



HAL
open science

Modules photovoltaïques colorés pour le bâtiment optimisés pour l'esthétique et la performance

Benjamin Riedel

► **To cite this version:**

Benjamin Riedel. Modules photovoltaïques colorés pour le bâtiment optimisés pour l'esthétique et la performance. Génie des procédés. Université Savoie Mont Blanc, 2023. Français. NNT : 2023CHAMA025 . tel-04544288

HAL Id: tel-04544288

<https://theses.hal.science/tel-04544288v1>

Submitted on 12 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **Energétique et Génie des Procédés**

Arrêté ministériel : 25 Mai 2016

Présentée par

Benjamin RIEDEL

Thèse dirigée par **Christophe MENEZO**, Professeur des universités à l'Université Savoie Mont-Blanc, et codirigée par **Philippe THONY**, Ingénieur de recherche au CEA Grenoble, préparée au LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (LOCIE) de l'USMB ainsi qu'au Laboratoire Application Modules (LAM) du CEA Grenoble-INES, dans l'École Doctorale SIE.

Modules photovoltaïques colorés pour le bâtiment optimisés pour l'esthétique et la performance

Thèse soutenue publiquement le **5/10/2023**, devant le jury composé de :

Mme Anne KAMINSKI-CACHOPO

Professeur des universités à l'IMEP-LAHC, Rapportrice

Mr Mathieu HEBERT

Professeur des universités, Université de Saint-Etienne, Rapporteur

Mme Laure-Emmanuelle PERRET

Senior Scientist, LMNT Consultancy, Examinatrice

Mr Mohamed AMARA

Chargé de recherche HDR, CNRS - INL, Examineur

Mme Anne MIGAN-DUBOIS

Professeure des universités, Université Paris Saclay, Présidente

Mr Philippe THONY

Ingénieur de recherche, CEA Grenoble - INES, Codirecteur de thèse

Mr Christophe MENEZO

Professeur des universités, Université Savoie Mont-Blanc, Directeur de thèse

Notre conception de 'la croissance' consiste essentiellement à détruire le vivant plus qu'à le préserver, car considéré comme une simple ressource. [...] C'est ce que certains libéraux appellent la liberté : être libre d'acheter une Ferrari et de prendre l'avion. Moi, j'appelle ça le meurtre. [...] La vie, sur Terre, est en train de mourir. L'ampleur du désastre est à la démesure de notre responsabilité. L'ignorer serait aussi insensé que suicidaire. Plus qu'une transition, je pense qu'il faut une révolution.

Aurélien Barrau, astrophysicien et philosophe

Une croissance exponentielle ne peut jamais continuer très longtemps dans un contexte d'espace et de ressources finis. [...] Il faut mettre fin à la croissance incontrôlée, le cancer de la société.

Donella et Dennis Meadows, auteurs de "The limits of growth", 1973.

Remerciements

L'ensemble de ce travail est d'abord dédié à ma mère, qui a insisté pour que je me dirige vers les études supérieures. Partie trop tôt pour vivre l'achèvement de l'aventure qu'elle a initiée, j'exprime envers elle une profonde gratitude pour l'ensemble des moyens qu'elle a mis en œuvre pour que je puisse accéder à des études de haut niveau. La finalisation de ce travail de thèse confirme que la direction prise il y a 10 ans fût bonne, c'est pourquoi je lui crédite cette réussite.

Je souhaite également remercier mon père, mon frère, ma sœur et plus largement l'ensemble des membres de ma famille pour leur soutien durant toutes ces années.

J'adresse de profonds remerciements à mon encadrant Philippe Thony, pour son dévouement, la confiance qu'il m'a accordée et les riches discussions scientifiques que nous avons partagé pendant ces années, depuis mon stage de fin d'étude à aujourd'hui. Je voudrais également remercier mon encadrant de stage Blaise Raybaud de m'avoir donné la chance d'intégrer les équipes de l'INES et de m'avoir fait découvrir les plaisirs de la vie en Savoie.

Je souhaite également remercier mon directeur de thèse Christophe Ménézo pour la confiance qu'il m'a donné et l'aide qu'il m'a apporté à la finalisation de ce travail.

Je voudrais remercier l'ensemble des collègues du feu SBST, là où tout a commencé, pour leur accueil chaleureux, leur soutien durant ces années de doctorat et leurs qualités humaines.

Je remercie l'ensemble des membres permanents du LOCIE pour leur accueil, leur soutien et l'aide qu'ils m'ont apporté. J'adresse également de profonds remerciements aux doctorants, post-doctorants et stagiaires pour les bons moments passés ensemble.

Je remercie les ingénieurs et les techniciens du SMSP, pour l'aide qu'ils m'ont apporté dans mon travail, leur soutien dans les moments difficiles et les bons moments de convivialité partagés. J'adresse également de nostalgiques pensées à mes collègues de bureau Jean-Baptiste, Victor, Nicolas, Carla, Antoine, Lucie et Julie. Ce fût un réel plaisir de travailler en leur compagnie.

J'aimerais également remercier mes colocataires Simon, Louison, Hafsa, Arnaud et Anto, famille fondée il y a trois ans, pour leur soutien et la qualité de la vie que nous avons construite.

Je remercie le CEA Grenoble pour avoir financé mes travaux et le LOCIE pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse.

Enfin, je souhaite remercier les membres du Jury pour avoir accepté de rapporter, examiner mon travail et participer à ma soutenance de thèse. Merci pour votre intérêt.

Résumé

Dans une optique de conception de bâtiments à énergie positive, il semble possible d'atteindre une couverture totale des besoins en énergie grâce à l'énergie solaire. Ces bâtiments doivent aussi permettre une gestion complète du confort intérieur et offrir une esthétique réussie conforme aux exigences des architectes. Ces trois points demandent une intégration optimale de composants multifonctionnels solaires photovoltaïques (BIPV). Cependant, l'intégration en façade de modules PV entraîne une baisse du rendement énergétique par rapport à un système au sol due, entre autres, à leur échauffement, au risque d'ombrages en milieu urbain et à la technique de colorisation utilisée pour obtenir une esthétique particulière. Pour répondre à cette dernière contrainte, un composant BIPV pour façade, alliant esthétique et performance selon une approche architecturale optimisée est nécessaire.

Ces travaux se concentrent sur le potentiel d'une technologie en particulier : l'impression céramique sur verre. Grâce à plusieurs campagnes expérimentales et des outils d'analyse numérique, des encres céramiques sont caractérisées sous différents aspects. D'abord, optiquement, où l'étude des phénomènes de diffusion permet d'appréhender le comportement de la lumière dans ces milieux complexes. Elles sont également caractérisées énergétiquement, grâce à la fabrication de nombreux modules PV avec faces avant imprimées. Le contrôle qu'offre la technologie sur les dessins numériques permet de tester différentes techniques pour jouer sur l'œil de l'observateur, comme des synthèses colorimétriques par pixelisation et des tramages. D'autres problématiques liées aux encres sont abordées, comme la montée en température des modules colorés ou encore l'impact des rayons UV sur leur vieillissement. L'analyse des résultats expérimentaux permet de déterminer des solutions globales pour optimiser l'intégration esthétique et le rendement de conversion électrique. Finalement, une méthodologie de conception de modules BIPV esthétiques optimisés est proposée, le choix final du compromis entre couleur et performance étant laissé à l'appréciation du concepteur.

Abstract

With a view to designing positive-energy buildings, solar energy can be used to cover all energy needs. These structures must also be able to manage all aspects of interior comfort, and be aesthetically pleasing to the eye, in line with architects' requirements. These three points call for optimal integration of multifunctional solar photovoltaic (BIPV). However, the integration of PV modules in facades leads to a reduction in energy yield, due among other things to their heating, the risk of shading in urban environments, and the coloring technique used to achieve a particular aesthetic. To address the latter constraint, a BIPV component for facades, combining aesthetics and performance in an optimized architectural approach, is required. This work focuses on the potential of a particular technology : ceramic printing on glass. Thanks to several experimental campaigns and numerical analysis tools, ceramic inks are being characterized from various angles. Firstly, optically, where the study of scattering phenomena enables us to understand the behavior of light in these complex media. They are also characterized energetically, thanks to the manufacture of numerous PV modules with printed front panels. The control that technology offers over digital drawings enables us to test different techniques for playing on the observer's eye, such as color synthesis by pixelization and rastering. Other ink-related issues are addressed, such as the temperature rise of colored modules or the impact of UV rays on their aging. Analysis of the experimental results enables us to determine global solutions for optimizing aesthetic integration and electrical conversion efficiency. Finally, a methodology for designing optimized aesthetic BIPV modules is proposed, with the final choice of the compromise between color and performance left to the designer's discretion.

Table des matières

Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	viii
Introduction	1
1 Les besoins esthétiques dans le BIPV	3
1.1 La place du BIPV dans la transition énergétique	3
1.1.1 Le changement climatique, les besoins de sobriété et d'énergie propre	3
1.1.2 L'importante part des bâtiments dans les émissions de carbone et les objectifs d'autoconsommation énergétique	5
1.1.3 Le développement industriel du BIPV	6
1.2 Importance de l'aspect esthétique des modules BIPV	6
1.3 La notion d'intégration	8
1.4 État de l'art du BIPV esthétique	9
1.4.1 Le module PV classique	9
1.4.2 BIPV esthétique non coloré à base de Silicium	11
1.4.3 Les films colorés	12
1.4.4 Cellules solaires avec traitement anti-reflet coloré	13
1.4.5 Les filtres interférentiels multicouches (DBR) sur les cellules ou le verre	14
1.4.6 Cellules solaires semi-transparentes et/ou colorées	17
1.4.7 Les encapsulants colorés	19
1.4.8 Le verre teinté	19
1.4.9 Le verre sérigraphié	20
1.4.10 Le verre imprimé	20
1.4.11 Comparaison des technologies BIPV esthétiques	22
1.5 Positionnement du sujet dans l'état de l'art	23
1.6 Conclusion du chapitre 1	24
2 Démarche mise en œuvre pour la caractérisation des encres céramiques	25
2.1 L'impression numérique sur verre	25
2.1.1 Présentation des encres céramiques	26
2.1.2 Observations au microscope des dépôts d'encres céramiques	27
2.2 Caractérisation optique des encres	27
2.2.1 Mesures en réflexion d'échantillons de verres imprimés à l'aide d'un spectrophotomètre à sphère intégrante	28

2.2.2	Mesure en transmission d'échantillons de verres imprimés à l'aide d'un spectrophotomètre à sphère intégrante	29
2.2.3	Colorimétrie	29
2.2.4	Mesures des échantillons de verre imprimés au colorimètre portable	33
2.3	Élaboration de dessins pour exploiter les limites de l'œil humain	34
2.3.1	La diffraction et les limites de l'œil humain	34
2.3.2	Création de différents type de tramage	36
2.4	Caractérisation énergétique des verres imprimés via fabrication de module PV colorés	37
2.4.1	Cellules PV utilisées dans l'étude	37
2.4.2	Interconnexions	38
2.4.3	Encapsulants	39
2.4.4	Face arrière	39
2.4.5	Lamination	39
2.5	Caractérisation énergétique des modules fabriqués en conditions standards (flash-test)	40
2.6	Mesures de performance en conditions extérieures et relevés de températures	41
2.7	Vieillessement de minimodules colorés sous rayonnement ultraviolet	42
2.8	Analyse des résultats expérimentaux et calcul numériques	43
2.8.1	Calcul de la part d'énergie solaire réfléchi (réflectance solaire)	43
2.8.2	Estimation de la transmittance interne des encres via les données optiques	44
2.8.3	Calcul des courants de court-circuit théoriques des modules fabriqués	45
2.9	Construction d'un modèle thermique dynamique pour comparer avec les mesures expérimentales	45
2.9.1	Estimation des pertes par convection	46
2.9.2	Estimation des pertes par rayonnement	48
2.9.3	Détermination des pertes en réflexion en conditions réelles via les mesures de puissances délivrées	49
2.9.4	Résolution discrète de l'équation de la chaleur en régime dynamique	50
2.10	Conclusion du chapitre 2	50
3	Évaluation énergétique des encres céramiques pour la performance solaire	51
3.1	Les encres céramiques : des milieux hétérogènes et diffusants	51
3.1.1	Composition chimique des dépôts d'encre	52
3.1.2	Observation des couches d'encre au microscope électronique à balayage	53
3.1.3	Mélanges réalisés par l'imprimante dans les dépôts d'encres	57
3.1.4	Observation des dépôts d'encres mélangées au microscope Keyence	58
3.1.5	Géométrie de surface des dépôts d'encre	59
3.1.6	Optique théorique des milieux diffusants	60
3.1.7	Modes de diffusion mis en jeu au sein des encres	64
3.1.8	L'approximation de Kubelka-Munk et les coefficients K/S des encres	64
3.1.9	Résultats de mesures des coefficients K/S réalisées avec le colorimètre : comparaison de deux épaisseurs d'encres différentes	65
3.2	Résultats de mesures spectrales des encres	66
3.2.1	Mesures en réflexion avec le spectrophotomètre à sphère intégrante	66

3.2.2	Comparaison des réflectances solaires selon les épaisseurs d'encre et les configurations	68
3.2.3	Mesures en transmission avec le spectrophotomètre à sphère intégrante et calcul de la transmittance interne des encres	69
3.2.4	Bilan sur les mesures spectrales	71
3.3	Caractérisation énergétique des modules fabriqués via les mesures I-V	72
3.3.1	Courbe courant-tension d'une cellule PV	72
3.3.2	Efficacité solaire des modules colorés par rapport au module de référence	73
3.3.3	Calcul de courants de court-circuit théoriques et comparaison avec les mesures I-V	74
3.3.4	Différences de réflectance entre verres imprimés seuls et modules laminés	74
3.3.5	Impact de l'emplacement de la couche imprimée sur les courants de court-circuit délivrés en conditions standards	75
3.3.6	Comparaisons des cellules PERC et des cellules HET sur l'efficacité des couleurs	76
3.4	Échauffement des modules en conditions réelles	77
3.4.1	Résultats de mesures de températures en conditions extérieures	77
3.4.2	Comparaison des résultats théoriques donnés par le modèle thermique avec les mesures en conditions extérieures	79
3.4.3	Évolution des paramètres pour correspondre avec les mesures	81
3.4.4	Répartition de l'énergie au sein des modules colorés	82
3.4.5	Bilan de l'analyse des échauffements des modules colorés en conditions extérieures	84
3.5	Analyse du vieillissement des modules imprimés aux rayons UV	85
3.6	Conclusion du chapitre 3	86
4	Optimisation esthétique des modules PV	89
4.1	L'intégration visuelle par imitation de l'environnement	89
4.1.1	Réduction de contraste au sein du module PV à l'aide d'interconnexions et encapsulant noirs	89
4.2	Aspects obtenus selon les impressions réalisées sur la face avant : tramages et pixelisations	90
4.2.1	Impact visuel de différents types de tramage et effet de moiré	91
4.2.2	Évaluation de l'efficacité de différentes techniques de pixelisation	92
4.3	Caractérisation colorimétrique des couleurs de base	94
4.3.1	Comparaisons des aspects visuels entre configuration intérieure et extérieure	94
4.3.2	Impact visuel de l'épaisseur d'encre : cas du blanc	95
4.3.3	Résultats de mesures obtenues grâce au colorimètre	96
4.3.4	Détermination de l'espace des couleurs réalisables (gamut) avec les encres céramiques	98
4.4	Élaboration et test d'une méthode pour optimiser l'esthétique et la performance des modules colorés : hypothèse de la linéarité	100
4.4.1	Utilisation de l'algorithme du simplexe pour résoudre le problème d'optimisation linéaire	101
4.4.2	Résultats issus de l'algorithme du simplexe	102

4.4.3	Aspect des modules optimisés	102
4.4.4	Écarts entre les couleurs obtenues et les couleurs cibles	103
4.4.5	Évaluation de la qualité de l'optimisation	105
4.4.6	Discussion sur la configuration optimale	107
4.4.7	Bilan concernant la méthode d'optimisation testée	108
4.5	Proposition d'amélioration de la méthode d'optimisation	108
4.5.1	Linéarité entre pertes énergétiques et luminance	108
4.5.2	Changement de système de coordonnées pour la synthèse colorimétrique	109
4.5.3	Limites de la méthode d'optimisation	110
4.6	Conclusion du Chapitre 4	110
	Conclusion générale	113
	Perspectives	117
	Bibliographie	121

Table des figures

1.1	Prévisions d'échauffement de la planète suivant différents scénarios : SSP1-1.9 : scénario très ambitieux pour représenter l'objectif 1,5°C de l'Accord de Paris; SSP1-2.6 : scénario de développement durable; SSP2-4.5 : scénario intermédiaire; SSP3-7.0 : scénario de rivalités régionales; SSP5-8.5 : développement basé sur les énergies fossiles[1]	4
1.2	Émissions de gaz à effet de serre par secteur dans le monde [2]	5
1.3	Prévisions de l'évolution du marché du BIPV [5]	6
1.4	Critère d'aide à la décision pour l'utilisation de modules BIPV [7]. L'étude a été menée auprès de 30 architectes qui ont noté l'importance de chaque critère sur une échelle de 0 à 9	7
1.5	Sondage mesurant l'importance des certaines libertés de design du BIPV auprès de spécialistes [8]	8
1.6	Structure d'une cellule Photovoltaïque [9]	10
1.7	Éléments constituant un module PV [10]	11
1.8	À gauche : Exemple d'une façade esthétique utilisant du BIPV non coloré (Energiepark West, Sattens, Autriche, 1996)[11]; À droite : Façade à base de silicium polycristallin sur le bâtiment Emmaüs à Paris[11]	12
1.9	Imitations d'un mur en brique grâce à un film imprimé intercalé [12]	13
1.10	Façade utilisant la technologie Solaxess en Suisse [14]	13
1.11	Interférences destructives dans un revêtement anti-reflet [16]	14
1.12	Cellules solaires colorées proposées par l'entreprise Lofsolar [17]	14
1.13	Schéma de principe d'un réflecteur de Bragg distribué [19]	15
1.14	Réflectivité d'un DBR en fonction de la différence d'indices; Réflectivité d'un DBR en fonction du nombre de périodes [19]; (Ce DBR est centré sur une longueur d'onde de 1550 nm)	15
1.15	a) Réflectance spectrale de différentes couches b) Épaisseur des couches correspondantes aux longueurs d'onde ciblées; À droite, exemple d'un filtre optique multicouches déposé sur une cellule en silicium amorphe [20]	16
1.16	Façade comportant quatre couleurs différentes proposées par Kromatix [21]	16
1.17	A gauche : Différentes couleurs obtenues avec des couches minces de silicium amorphe; A droite : vue détaillée d'un module "terracotta" [23]	17
1.18	Vitres utilisant du silicium amorphe semi-transparent [24]	17
1.19	Technologie BIPV semi-transparentes à base de CdTe [25]	18
1.20	Façade composée de la technologie DSC (dye sensitized cell) sur le campus de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne [26]	18
1.21	BIPV utilisant des encapsulants colorés couplés à des cellules CdTe (Soltech), à Linköping, Suède. [27]	19

1.22	Différentes couleurs de verres teintés dans la masse proposées par AGC Glass Europe [28]	20
1.23	Façade BIPV avec les modules sérigraphiés Suncol de chez SUNAGE [29]	20
1.24	Façades d'un bâtiment de l'AFIMall City à Moscou, imprimée par Dip-Tech [30]	21
1.25	Disque imprimé servant de démonstrateur Colorblast [32]; Un bâtiment utilisant la technologie ColorBlast conçu par Glass Partners Solutions [33]	22
1.26	Bâtiment Solaris à Zurich [34]	22
1.27	Produits BIPV disponibles dans le commerce, classés par typologie : (i) cellules solaires avec revêtement antireflet; (ii) couches PV actives semi-transparentes ou colorées; (iii) couches ou intercalaires contenant des filtres solaires, des revêtements colorés ou à motifs; (iv) films d'encapsulation polymères colorés; et (v) verre imprimé, revêtu ou à finition alternative. [35]	23
2.1	Fonctionnement d'une tête d'impression à cristal piézoélectrique pour les imprimantes à jet d'encre [36]	25
2.2	Impression réalisée par l'imprimante Dip-Tech [30]	26
2.3	Nuancier des encres primaires utilisées par l'imprimante (épaisseur d'environ 7 μm)	27
2.4	Schéma de principe d'une sphère intégrant dans les configurations transmittance et réflectance ([38])	28
2.5	Protocole expérimental de mesure en réflexion avec un absorbeur noir. A gauche, la mesure est effectuée avec la couche d'encre du côté incident. À droite, elle est effectuée du côté opposée	28
2.6	A gauche : Fonctions d'égalisation des couleurs établis par la CIE (RGB 1981) [39]; À droite : Espace colorimétrique numérique RGB [40]	30
2.7	À gauche : Distribution spectrale de l'illuminant D65 [41]; À droite : Fonctions d'égalisation des couleurs de l'observateur de référence CIE [42]	31
2.8	À gauche : Diagramme de chromaticité CIE xy [44]; À droite : Gamuts de différents supports numériques [45]	32
2.9	À gauche : Espace Colorimétrique CIE $L^*a^*b^*$ [46]; À droite Coordonnées polaires C^* et h^* [47]	33
2.10	Observation de la réflectance d'un module terracotta avec le colorimètre et détermination des coordonnées $L^*a^*b^*$ correspondants	34
2.11	Modèle optique de l'œil [48]	35
2.12	À gauche : Phénomène de diffraction au travers un diaphragme [49]; À droite : Schéma illustrant la limite de distinction de Rayleigh [50]	35
2.13	Mélange colorimétrique de pixels permis par le critère de Rayleigh [48]	36
2.14	Exemple de différents types de trames qui ont été testées	37
2.15	Aspect des cellules PERC DMEGC (face avant et face arrière) [51]	38
2.16	Squelette des modules PV fabriqués	38
2.17	Profils de température et de pression subi par l'empilement constituant le module PV au sein du laminateur ([52])	40
2.18	Simulateur solaire (3S Spire flash-test) utilisé pour la caractérisation I-V [53]	41
2.19	Banc de mesures extérieures dans la zone INCAS de l'INES	41
2.20	Cinq des 8 modules fabriqués pour le vieillissement. De gauche à droite : Papyrus White, Papyrus White Dotted, Grass Green, Grass Green Dotted, Pigeon Blue	42
2.21	Enceinte de vieillissement UV utilisée [54]	43

2.22	Spectre solaire à la surface de la terre AMG1.5 et réflectance spectrale utilisés pour le calcul de la réflectance solaire	44
2.23	Courbes utilisées pour calculer le courant de court-circuit. De gauche à droite : le spectre solaire AMG1.5, la réflectance du module, la transmittance interne de la couche imprimée, la transmittance interne du verre, la transmittance interne de l'encapsulant et la réponse spectrale de la cellule PV	45
3.1	Procédé de mélange, de séchage et de cuisson des encres céramiques sur verre [59]	51
3.2	Fragments de verres imprimés. En haut : analyse des composés chimiques en surface; en bas : observation et mesure de l'épaisseur	52
3.3	Photographies au MEB de l'encre verte; A gauche, vue de dessus; A droite, vue en coupe	54
3.4	Photographies au MEB de l'encre rouge; A gauche, vue de dessus; A droite, vue en coupe	55
3.5	Photographies au MEB de l'encre jaune; A gauche, vue de dessus; À droite, vue en coupe	55
3.6	Photographies au MEB de l'encre bleue; A gauche, vue de dessus; A droite, vue en coupe	56
3.7	Photographies au MEB de l'encre blanche; A gauche, vue de dessus; A droite, vue en coupe	57
3.8	Mélange des couleurs de base réalisée par l'imprimante en fonction de la couleur demandée	58
3.9	Vue de différents mélanges de couleurs imprimés au microscope Keyence	59
3.10	Vue 3D de l'état de surfaces de trames au microscope Keyence	60
3.11	Illustration de l'action diffusante d'un milieu hétérogène [61]	62
3.12	Efficacité de diffusion en fonction du paramètre de taille x pour un rapport d'indice valant 1.33 [62]. En bas à droite, le profil est tracé suivant un profil logarithmique pour mettre en évidence l'évolution de la diffusion suivant une puissance 4 dans le domaine de Rayleigh	63
3.13	Théorie de Mie; De gauche à droite : la diffusion Rayleigh, la diffusion de Mie pour les petites particules, la diffusion pour les grosses particules (inspiré de [62])	64
3.14	Réflectance d'un échantillon en fonction de son épaisseur X et du rapport K/S pour $R_g = 0.05$	65
3.15	Mesures de K/S maximum obtenues avec le colorimètre pour les encres d'épaisseur $3.5 \mu\text{m}$ (à gauche) et $7 \mu\text{m}$ (à droite)	66
3.16	Résultats de mesures en réflexion avec l'absorbeur noir pour 3 épaisseurs différentes : $7 \mu\text{m}$ (100%), $3.5 \mu\text{m}$ (50%) et $1.75 \mu\text{m}$ (25%) en configuration impression à l'extérieur	67
3.17	Résultats de mesures en réflexion avec l'absorbeur noir pour 3 épaisseurs différentes : $7 \mu\text{m}$ (100%), $3.5 \mu\text{m}$ (50%) et $1.75 \mu\text{m}$ (25%) en configuration impression à l'intérieur	67
3.18	Comparaison des résultats de mesures en réflexion avec l'absorbeur noir suivant les configurations pour une épaisseur de $7 \mu\text{m}$	68
3.19	Comparaison des résultats de mesures en réflexion avec l'absorbeur noir suivant les configurations pour une épaisseur de $3.5 \mu\text{m}$	68

3.20	Réflectance solaire calculée dans les deux configurations pour une épaisseur de 3.5 μm (en haut) et 7 μm (en bas)	69
3.21	Fraction de l'énergie transmise par les échantillons de verres imprimés avec une épaisseur de 7 μm dans les configurations extérieure et intérieure	70
3.22	Transmittance interne obtenue pour chaque encre d'une épaisseur de 7 μm à partir des mesures réalisées dans les deux configurations	70
3.23	Coefficients d'extinction obtenus pour chaque encre à partir de mesures réalisées dans les deux configurations	71
3.24	Comparaison des résultats de mesures en réflexion avec l'absorbeur noir suivant les configurations pour une épaisseur de 3.5 μm	71
3.25	Courbe I-V type d'une cellule PV [65]	72
3.26	Comparaison des courants de court-circuit mesurés en fonction de l'encre imprimée en surface de la face avant et le module de référence	73
3.27	Comparaison des courants de court-circuit mesurés et calculés	74
3.28	Comparaison des réflectances entre spectrophotomètre et colorimètre	75
3.29	À gauche : comparaison des courants de court-circuit mesurés et calculés ; À droite : Différences relatives du courant de court-circuit en configuration extérieure par rapport à la configuration intérieure	76
3.30	Pertes de courant de court-circuit en fonction des couleurs pour les modules avec cellules HET	76
3.31	Mesures extérieures de températures, de puissance délivrée, d'irradiance normale globale à 30°C et de vitesse de vent. La courbe pointillée correspond à la température de l'air.	78
3.32	En haut : Écarts relatifs des puissances délivrées par les modules colorés par rapport au module de référence ; en bas : écarts de température, pour les journées du 10 avril et du 18 juin.	79
3.33	Comparaison entre mesures et modèle pour la journée du 1er mai 2022	80
3.34	Comparaison entre mesures et modèle pour la journée du 10 avril	81
3.35	Le modèle coïncide avec les mesures (journée du 1er mai 2022)	82
3.36	Le modèle coïncident avec les mesures (journée du 3 mai 2023)	82
3.37	Répartition de l'énergie au sein des modules colorés pour la journée du 1er mai 2022. Les courbes délimitent les proportions occupées par chaque type d'échange au cours du temps	83
3.38	Répartition de l'énergie au sein des modules pour la journée du 3 mai 2023 (cas du blanc)	83
3.39	Profils de vieillissements UV de 8 mini-modules. À gauche, l'évolution des valeurs absolues des grandeurs en fonction de la quantité d'énergie reçue. A droite, l'évolution de l'écart par rapport à la valeur initiale avant vieillissement	85
4.1	De gauche à droite : Module avec cellules HET, encapsulant noir, verre sodocalcique, interconnexions brillantes ; Module avec cellule PERC, encapsulant noir, verre sodo-calcique, interconnexions brillantes ; Module avec cellule PERC, encapsulant noir, verre texturé interfloat, interconnexions noires	90

4.2	Photographie extérieure de la première série de modules conçus. De gauche à droite : 1. Trame stochastique terracotta 2. Trame stochastique pixelisée 3. Trame hexagonale terracotta 4. Trame hexagonale pixelisée 5. Pleine couverture terracotta 6. Module de référence non imprimé	91
4.3	À gauche : le contour des cellules est discernable à cause de l'effet de moiré produit par la trame hexagonale ; Au centre et à droite, les trames stochastiques (aléatoires) terracotta et pixelisée permet d'éviter le phénomène et le contour des cellules n'est pas discernable	92
4.4	Modules avec trames pixelisées : a) Disques de tailles différentes et de couleurs saturées (Disques rouges : 1 mm de diamètre) ; b) Disque de tailles identiques (1mm) et de couleurs sombres ; c) Même trame avec des disques de 0.5 mm	93
4.5	Photographie extérieure des modules avec les couleurs de base située sur le côté extérieur de la face avant	94
4.6	Photographie extérieure des modules rouges, jaunes et terracotta dans les deux types de configurations	95
4.7	Modules blancs avec différentes épaisseurs d'encre. De gauche à droite : 3.5 μm (50%), 7 μm (100%) et 1.75 μm (25%)	95
4.8	Évolution des coordonnées colorimétriques en fonction de l'épaisseur. À gauche, la répartition spatiale des couleurs selon les coordonnées a^*, b^*, C^*, h^* ; À droite, les coordonnées de luminance L^*	96
4.9	De gauche à droite : la distance euclidienne ΔE , les différences de chrominance ΔC^* et de teinte Δh^* entre les deux épaisseurs étudiées	97
4.10	Coordonnées RGB des modules colorés avec l'épaisseur maximum	98
4.11	Espace colorimétrique réalisable avec les encres céramiques (gamut) sur un diagramme de chromaticité	99
4.12	Les cinq vecteurs engendrant le volume des couleurs réalisables dans l'espace RGB. Deux vues différentes permettent de se représenter le volume octaédrique dans l'espace	100
4.13	Photographie extérieure des trois modules optimisés fabriqués. De gauche à droite : le module "terracotta", le module "bois" et le module "pierre". Les photographies inférieures présentent les motifs tramés vus de près	103
4.14	Comparaison en coordonnées RGB entre les couleurs mesurées sur les modules optimisées et les couleurs cibles. Les couleurs présentes en fond sont celles qui correspondent à ces coordonnées	104
4.15	Comparaison des coordonnées colorimétriques des modules optimisés et des couleurs cibles. À gauche, les coordonnées a^*, b^*, c^* et h^* . À droite, la luminance L^*	104
4.16	De gauche à droite : la distance euclidienne ΔE , les différences de chrominance ΔC^* et de teinte Δh^* entre les couleurs cibles et mesurées	105
4.17	Pertes de production en fonction de la chrominance C^* ; Les suffixes ext(érieur) et int(érieur) précisent où se trouve la face imprimée	106
4.18	Pertes de production en fonction de la Luminance L^* ; Les suffixes ext(érieur) et int(érieure) précisent où se trouve la face imprimée	107

Introduction

Ces travaux présentent une étude qui évalue le potentiel de la technologie d'impression numérique sur verre pour optimiser l'esthétique et la performance de modules BIPV colorés.

Le chapitre 1 présente le contexte climatique et économique dans lequel les travaux prennent place, avant de présenter un état de l'art des technologies de modules BIPV colorés déjà existantes.

La démarche entreprise et les moyens expérimentaux mis en œuvre sont ensuite présentés dans le chapitre 2.

Le chapitre 3 traite des résultats de caractérisation d'un point de vue des performances à l'aide de notions d'optique.

Enfin, le chapitre 4 aborde un point de vue esthétique de l'utilisation de la technologie combinée avec les résultats précédents et présente l'élaboration d'une méthode d'optimisation adaptée. La validité de cette méthode est évaluée et une amélioration est proposée.

Ce mémoire conclut en résumant les résultats obtenus et les notions abordées, en proposant différentes perspectives sur l'ensemble du travail réalisé.

1 Les besoins esthétiques dans le BIPV

1.1 La place du BIPV dans la transition énergétique

1.1.1 Le changement climatique, les besoins de sobriété et d'énergie propre

En 2023, l'évolution du climat de la planète est proche d'un point de non-retour. Si la tendance des émissions de gaz à effet de serre reste la même, le groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC) prévoit une augmentation de la température globale de la planète de 3°C d'ici à 2050 ainsi que des effets catastrophiques sur les conditions de vie humaines : extrême sécheresse, montée des eaux, pluies diluviennes, cyclones [1]. Malgré ces avertissements, les politiques des pays les plus émetteurs de gaz à effet de serre restent insuffisantes et les émissions continuent d'augmenter chaque année. Pourtant, il est impératif d'inverser cette tendance pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris signé en 2015 par 196 pays : une hausse de la température globale de la planète de seulement 1,5°C d'ici à 2100. Cinq scénarios décrivant les évolutions sociales, économiques, politiques et technologiques possibles d'ici à la fin du siècle ont été développés en se basant sur des trajectoires socio-économiques de référence (SSP pour Shared Socio-economic Pathways) (voir figure 1.1).

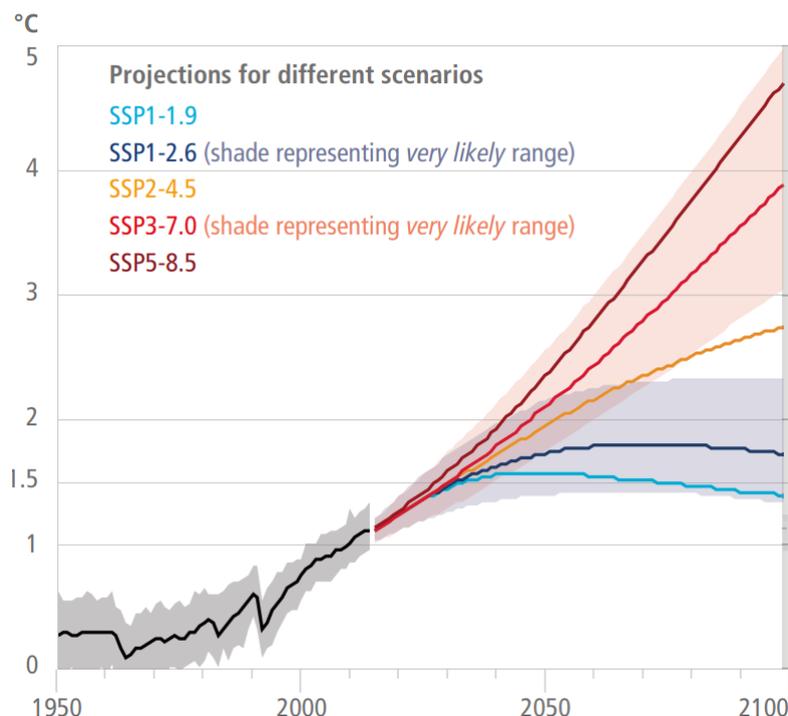


FIGURE 1.1 – Prévisions d'échauffement de la planète suivant différents scénarios :
SSP1-1.9 : scénario très ambitieux pour représenter l'objectif 1,5°C de l'Accord de Paris ;
SSP1-2.6 : scénario de développement durable ; SSP2-4.5 : scénario intermédiaire ; SSP3-7.0 :
scénario de rivalités régionales ; SSP5-8.5 : développement basé sur les énergies fossiles[1]

Parmi ces différentes trajectoires d'évolution du climat, seule la plus optimiste (SSP-1.9) reste proche de cet objectif. Pour parvenir à un tel résultat, les solutions résident dans des changements radicaux de nos modes de vie, une diminution drastique des consommations énergétiques (sobriété) en parallèle d'une transition vers des énergies décarbonées. Chaque pays doit donc identifier les secteurs les plus émetteurs de GES et les plus consommateurs d'énergie, et créer des politiques publiques afin de forcer chaque acteur à changer de comportement et parvenir à respecter ses engagements climatiques.

1.1.2 L'importante part des bâtiments dans les émissions de carbone et les objectifs d'autoconsommation énergétique

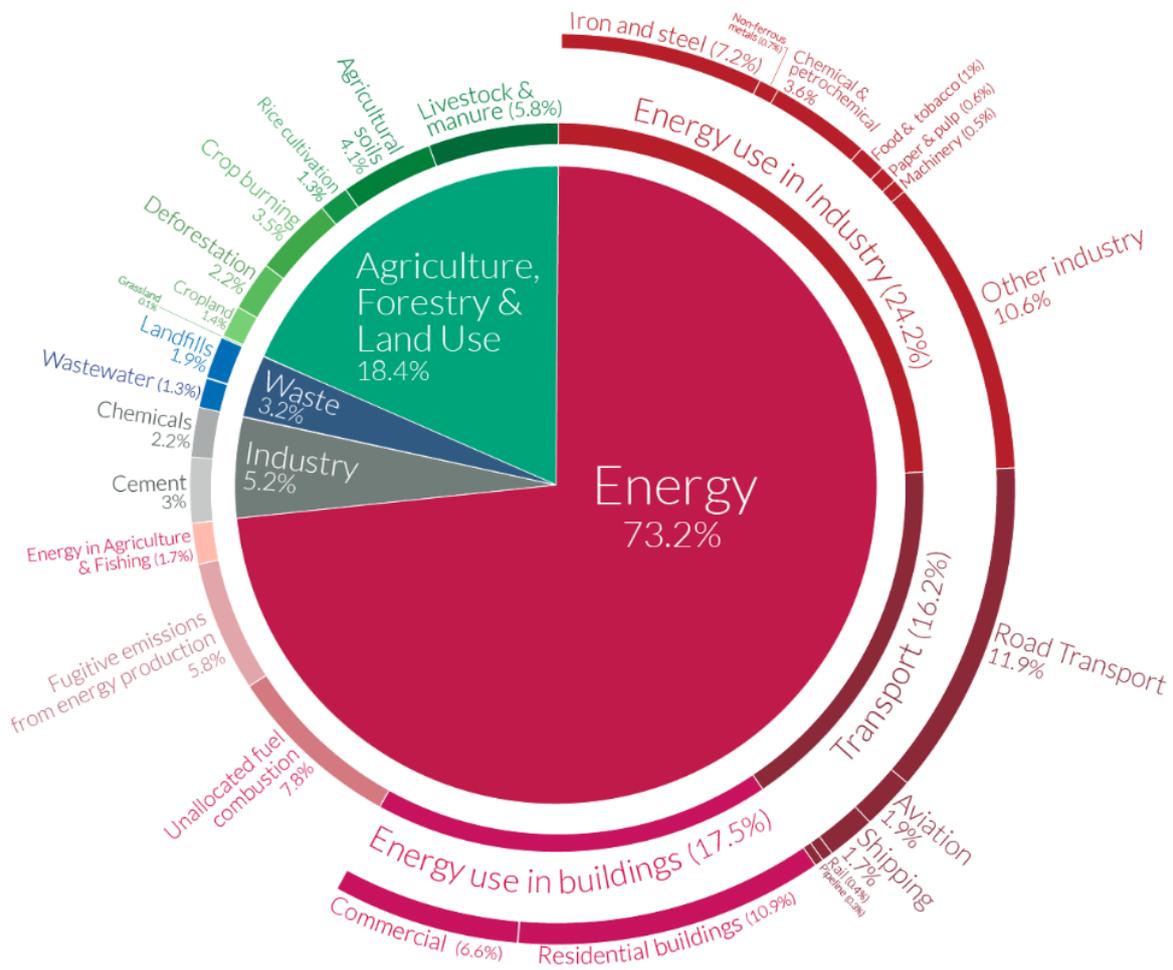


FIGURE 1.2 – Émissions de gaz à effet de serre par secteur dans le monde [2]

En 2016, environ 73 % des émissions de GES mondiales ont été générées pour la production d'énergie dédiée principalement à l'industrie (Métallurgique, Agroalimentaire, Chimique et pétrochimique), les bâtiments et les transports. Ainsi, l'industrie représente près de 30 % des émissions, alors que les secteurs des bâtiments et des transports y représentent respectivement 17,5 et 16 %. En Europe, le secteur des bâtiments représente 36 % des émissions de GES et est responsable de près de 40 % des consommations énergétiques finales. C'est donc le secteur le plus consommateur, devant les transports (33%) et l'industrie (21%) [3]. En effet, une grande partie de l'industrie qui produit pour l'Europe est délocalisée dans d'autres parties du monde, principalement en Asie.

Afin d'augmenter les économies d'énergie et de réduire les émissions de CO_2 , il est important de créer des bâtiments durables et de promouvoir la rénovation énergétique du parc immobilier. Pour ce faire, les bâtiments doivent être conçus et construits de manière à ce qu'ils ne nécessitent pas plus d'énergie qu'ils ne peuvent en produire au cours d'une année (autoconsommation). Les bâtiments doivent donc devenir producteurs d'énergie plutôt que consommateurs (Bâtiment à énergie positive). En France, la nouvelle réglementation énergétique RE2020 a pour

objectif de poursuivre l'amélioration de la performance énergétique et du confort des constructions, tout en diminuant leur impact carbone [4]. Elle renforce les exigences sur la performance de l'isolation, sur l'impact climatique des bâtiments neufs (analyse du cycle de vie) et insiste sur l'importance d'un bâtiment adapté aux conditions climatiques futures (confort d'été). De meilleures isolations, l'intégration de systèmes de production d'énergie renouvelable, ainsi que des conceptions plus intelligentes, utilisant des phénomènes passifs de chauffage et de refroidissement, sont les possibilités qui s'offrent à nous pour baisser significativement les besoins en énergie de nos bâtiments. Les technologies de modules photovoltaïques intégrés au bâtiment (BIPV), sur les toits et les façades, peuvent ainsi contribuer de manière décisive à atteindre l'objectif d'une conception de bâtiments véritablement durables.

1.1.3 Le développement industriel du BIPV

Depuis quelques années, la quantité de produits BIPV installés et vendus augmente de plus en plus, si bien que l'on prévoit une croissance exponentielle du secteur dans les années futures figure 1.3.

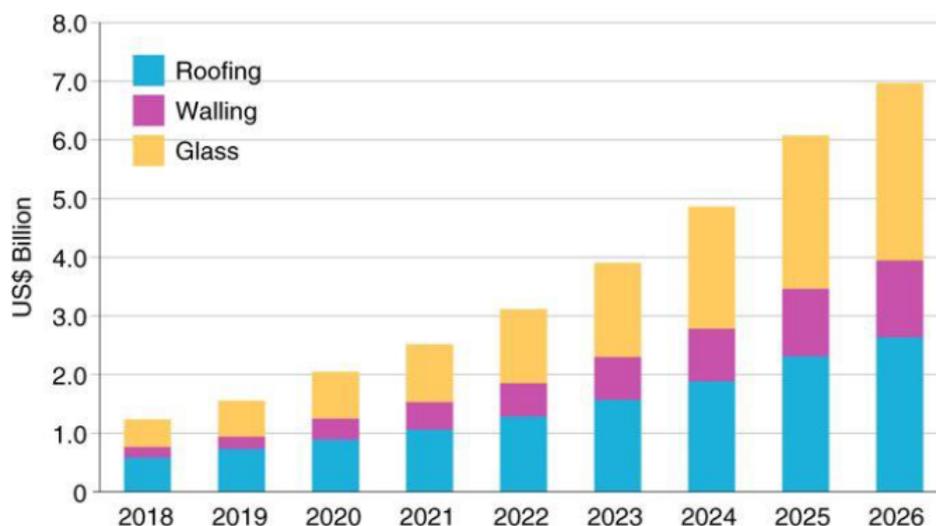


FIGURE 1.3 – Prévisions de l'évolution du marché du BIPV [5]

Ainsi, la présence de plus en plus forte de ces technologies sur les bâtiments, notamment sur les façades et les vitres, est source de nouvelles contraintes pour les acteurs du secteur. Dans un objectif d'incitation à l'utilisation systématique d'énergies décarbonées et à l'autoconsommation des bâtiments, une diminution de ces contraintes est nécessaire. Il convient donc d'identifier les différentes contraintes ainsi que leur importance relative pour orienter les recherches sur les facteurs les plus importants.

1.2 Importance de l'aspect esthétique des modules BIPV

L'intention des ménages d'installer des panneaux solaires présente une corrélation significative avec l'attrait visuel perçu de ceux-ci : les non-adoptants considèrent qu'ils ne sont pas attrayants et qu'ils ne correspondent pas à l'aspect extérieur des bâtiments. D'autres facteurs

impactent également l'adoption du BIPV dans la population, comme le prix. En effet, une part importante des futurs adeptes de l'énergie solaire n'est pas disposée à payer une prime pour l'esthétique des panneaux, car ils se soucient davantage de leur budget. Les différences entre adoptants probables et non-adoptants dépendent donc également de facteurs économiques et sociaux. Il est donc nécessaire de différencier les produits afin de répondre aux préférences des clients et à leur sensibilité au prix : tandis que certains fournisseurs peuvent se concentrer sur des produits montrant un compromis intégration/bas coûts importants, d'autres peuvent développer des solutions de conception à prix élevé adaptées aux clients haut de gamme.

Pour ce qui est des bâtiments neufs conçus par des architectes, certaines leçons et notions importantes peuvent être retenues des projets BIPV déjà réalisés [6]. D'abord, il existe un lien direct entre le moment où le BIPV est introduit dans la phase de conception, le choix de la technologie appropriée et la quantité de surface dédiée à la captation solaire. Ainsi, plus l'utilisation de technologies BIPV sera envisagée en amont des opérations, plus les choix esthétiques seront adaptés et l'énergie captée importante. La figure 1.4 montre l'importance de différents facteurs qui influencent les prises de décision des architectes pour travailler avec du BIPV.

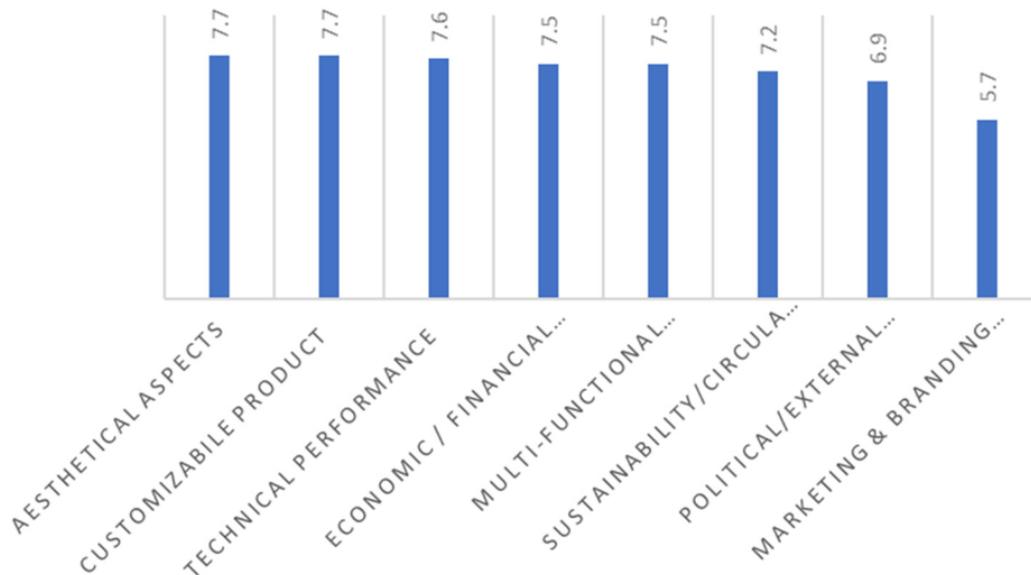


FIGURE 1.4 – Critère d'aide à la décision pour l'utilisation de modules BIPV [7]. L'étude a été menée auprès de 30 architectes qui ont noté l'importance de chaque critère sur une échelle de 0 à 9

Même si les notes sont proches, on observe que l'aspect esthétique et les possibilités de personnaliser l'aspect des modules sont considérés aussi importants (voir plus importants) que les critères techniques de performance ou les facteurs économiques. Le marketing et l'image de marque des modules PV semblent être le critère le moins significatif. Dans une autre étude, des spécialistes du BIPV indiquent l'importance de certaines libertés concernant le design des modules [8].

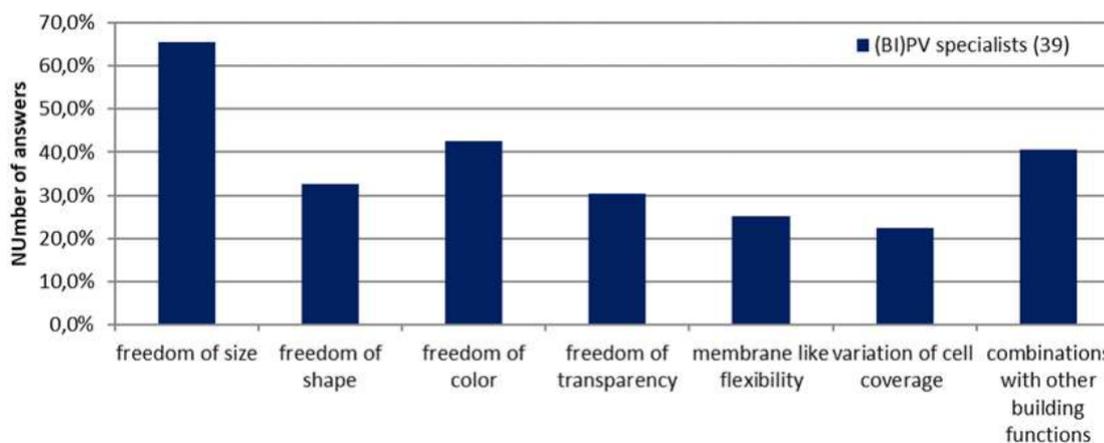


FIGURE 1.5 – Sondage mesurant l'importance des certaines libertés de design du BIPV auprès de spécialistes [8]

Les besoins les plus importants concernent les possibilités de choix de taille et de couleur. Viennent ensuite les possibilités de combinaisons avec d'autres équipements nécessaires au bâtiment, la forme, la transparence et la densité de couverture en cellule solaire. L'efficacité de la conception en amont est donc fortement aidée par la diversité des choix et des possibilités proposées. Le contrôle de l'aspect esthétique des modules BIPV et leur efficacité énergétique apparaissent ainsi comme des critères moteurs du marché [6]. L'industrie doit donc se concentrer à produire des modules BIPV dans différentes gammes d'aspects (couleur, forme, taille), tout en maintenant des performances acceptables, pour rendre leur utilisation plus facile et améliorer leur intégration dans la conception des bâtiments.

1.3 La notion d'intégration

L'évaluation de la qualité globale de l'intégration des modules BIPV dans les projets, le degré ou niveau d'intégration, est laissée au choix des architectes et peut constituer une de leurs préoccupations la plus importante [7]. Cette notion d'intégration dépend à la fois de la capacité des modules BIPV à remplir une fonction d'intégration architecturale et visuelle liée à l'art, et à la fois de leur capacité à remplir d'autres fonctions utiles comme la production d'énergie, l'isolation thermique ou l'étanchéité. L'apparition de ces nouvelles technologies devrait ainsi permettre à l'architecture de se renouveler, en les considérant éléments de la structure comme n'importe quel autre, des briques ou des fenêtres par exemple. Les architectes voient donc le BIPV comme un élément de la conception elle-même et non simplement un élément à ajouter sur celle-ci. Une bonne intégration du photovoltaïque dans le bâtiment ne peut donc être réalisée que si un processus de conception est mis en œuvre pour impliquer toutes les parties concernées dès le début et assurer au maximum les aspects visuels et fonctionnels de la technologie. Concernant l'intégration visuelle, celle-ci peut être voulue visible ou invisible. En effet, certains architectes préféreront par exemple l'aspect futuriste et technologique offert par les cellules PV, tandis que d'autres chercheront à camoufler au maximum leur présence, en jouant sur les reflets, couleurs et textures ou en tentant directement d'imiter les matériaux du paysage urbain. Cette dernière idée, qui cherche à dissimuler et camoufler un module BIPV de manière à ce que l'on ne puisse pas deviner sa présence, permet d'intégrer complètement celui-ci dans son environnement. Ainsi, si l'on admet qu'un objet que l'on ne peut distinguer est forcément esthétique,

la problématique de la subjectivité de l'esthétisme du BIPV peut être contournée dès lors où un projet essaiera de dissimuler sa présence.

1.4 État de l'art du BIPV esthétique

1.4.1 Le module PV classique

1.4.1.1 La cellule photovoltaïque

Une cellule PV est un dispositif électronique qui convertit directement la lumière du soleil en électricité. La lumière qui atteint la cellule solaire produit à la fois un courant et une tension pour générer de l'énergie électrique. Ce processus nécessite un matériau dans lequel l'absorption de la lumière fait passer un électron à un état d'énergie supérieur et dans lequel cet électron peut se déplacer vers un circuit externe. L'électron dissipe ensuite son énergie dans le circuit externe et retourne dans la cellule solaire. Divers matériaux et procédés peuvent potentiellement satisfaire aux exigences de la conversion de l'énergie photovoltaïque, mais dans la pratique, presque toute la conversion de l'énergie photovoltaïque utilise des matériaux semi-conducteurs assemblés sous forme de jonction "p-n". Les semi-conducteurs sont des matériaux qui deviennent conducteurs à partir d'un certain niveau d'énergie électrique appelé bande interdite. Cette propriété est due à l'organisation cristalline des atomes en leur sein. En réalisant un dopage, c'est-à-dire l'insertion d'atomes d'un autre élément dans cette structure, la conductivité (nombre de porteurs de charge) peut être augmentée ou diminuée. Par exemple, le silicium est dopé positivement par ajout d'atomes de Bore (diminution du nombre d'électrons libres) et négativement par ajout d'atomes de Phosphore (augmentation du nombre d'électrons libres). En créant une jonction entre des matériaux dopés négativement (N) et positivement (P), un champ électrique apparaît de N vers P et des paires, donnant à l'ensemble les caractéristiques d'une diode (les électrons ne peuvent circuler que dans un sens). Lorsque la lumière atteint la cellule, elle génère des paires d'électrons-trous et l'ajout de connecteurs métalliques de part et d'autres de la structure permet finalement de récupérer le courant (voir figure 1.6).

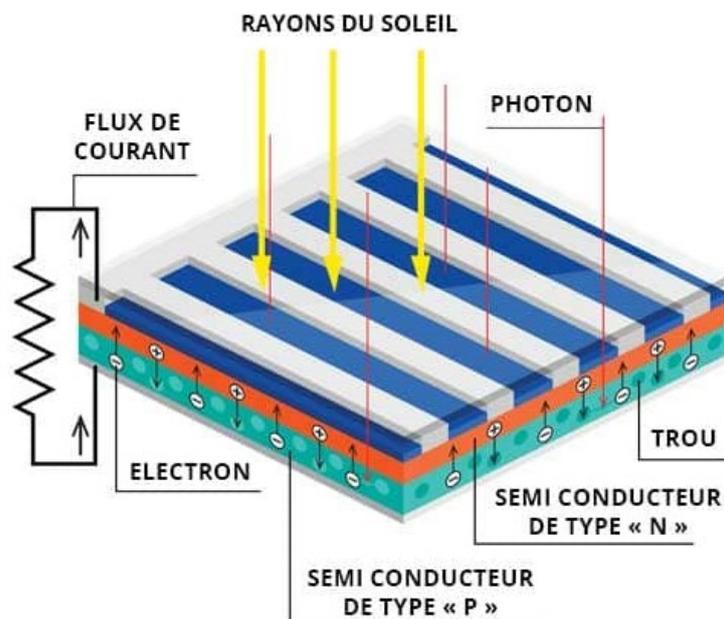


FIGURE 1.6 – Structure d'une cellule Photovoltaïque [9]

Les photons qui ont un niveau d'énergie inférieure à la bande interdite ne peuvent générer d'électricité et sont éventuellement convertis en chaleur dans le matériau (si celui-ci est opaque). Parmi les photons ayant un niveau d'énergie suffisant, seule une fraction de l'énergie en excès peut être convertie en électricité, le reste étant converti en chaleur. La valeur de cette fraction s'appelle la limite de Shockley-Queisser et dépend du matériau utilisé et du nombre de jonctions p-n créées. Ainsi, le rendement maximum d'une cellule PV à simple jonction dont la bande interdite est optimale pour le spectre solaire vaut environ 33%. Dans la pratique, les cellules PV au silicium monocristallin ont un rendement autour de 18%. Pour améliorer le rendement énergétique de l'ensemble, la surface est texturée et équipée d'un traitement anti-reflet. La texturation permet d'éviter les pertes par réflexions géométriques d'environ 10%, tandis que la couche anti-reflet minimise les pertes par réflexion due aux changements d'indices optiques, permettant d'améliorer le rendement absolu de la cellule de 0,3 à 0,6%. Les revêtements anti-reflets seront abordés plus en détail dans la suite de ce chapitre, notamment pour montrer les possibilités de coloration qu'ils offrent.

1.4.1.2 Assemblage

Un module PV classique est un empilement de différentes couches : la cellule PV, génératrice d'électricité, est intercalée entre 2 couches de polymère appelé encapsulant. L'ensemble est ensuite placé entre une face avant et une face arrière (fig), le plus souvent en verre et en polyfluorure de vinyle (PVF, Tedlar®).



FIGURE 1.7 – Éléments constituant un module PV [10]

Lors d'un processus appelé lamination, les feuilles d'encapsulant fondent puis se solidifient de manière à figer l'empilement définitivement. Les cellules sont alors protégées des chocs mécaniques, mais également d'une partie des rayonnements UV, absorbés par le verre et l'encapsulant. Le verre protège les cellules des chocs mécaniques, mais aussi d'une partie des rayonnements UV, comme le fait l'encapsulant. Le Tedlar® permet lui de protéger des hautes températures, des incendies et de la corrosion. Ces types de recette sont utilisés pour réaliser la plupart des modules PV avec face avant en verre, quelle que soit la technologie des cellules PV. Elles sont adaptées à de nombreux encapsulants comme l'EVA, le PVB, les silicones, les ionomères et les polyoléfinés. Suivant l'utilisation spécifique, le module est équipé d'une boîte de jonction pour protéger les connexions électriques et est positionné à l'intérieur d'un cadre en métal, le plus souvent en aluminium.

Outre les projets qui ont montré le potentiel esthétique des modules BIPV non colorés, ils existent de nombreuses autres technologies qui permettent de faire varier les aspects et qui donnent de plus grandes possibilités artistiques. Certaines utilisent des cellules PV semi-transparentes à base de silicium amorphe ou d'autres éléments chimiques. D'autres cherchent à colorer le module BIPV en utilisant des cellules colorées, des encapsulants et/ou verres colorés pour la face avant.

1.4.2 BIPV esthétique non coloré à base de Silicium

Les cellules PV à base de silicium poly ou monocristallin sont les plus répandues sur le marché (90%) et les plus efficaces. Des projets ont démontré qu'il était possible de concevoir des façades esthétiques en utilisant les technologies PV standards non colorées, comme le bâtiment Energiepark West, à Sattens en Autriche. Les architectes Heim et Müller ont été confrontés à l'aspect des cellules PV en silicium monocristallin comme contrainte principale et ont imaginé le reste du bâtiment de manière à ce que l'ensemble ait un rendu esthétique. [11]

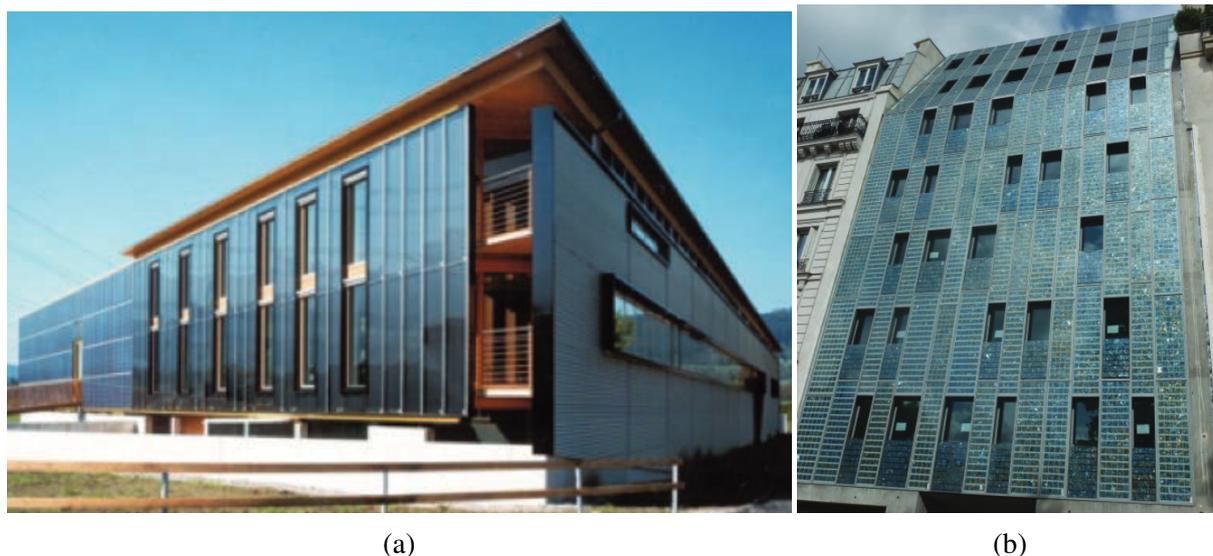


FIGURE 1.8 – À gauche : Exemple d’une façade esthétique utilisant du BIPV non coloré (Energiepark West, Sattens, Autriche, 1996)[11] ; À droite : Façade à base de silicium polycristallin sur le bâtiment Emmaüs à Paris[11]

D’autres projets ont cette fois-ci utilisé des cellules à base de silicium polycristallin, comme sur la façade d’un bâtiment Emmaüs à Paris (figure 1.8(b)). L’aspect du silicium polycristallin est notablement différent de celui du silicium monocristallin et est plus difficile à intégrer au sein du paysage urbain.

1.4.3 Les films colorés

Un film intercalaire coloré peut-être ajouté dans l’empilement des différentes couches intérieures du module PV avant le processus de fabrication (lamination). Ces intercalaires peuvent être de toute nature : des filtres optiques, des films spéciaux semi-transparents, du papier photographique imprimés ou encore du tissu, à condition qu’elles n’entravent pas le bon déroulement du processus de lamination. Cette technique a pour avantage d’être simple à réaliser par rapport à des traitements optiques. La société Dutch Solar Design a intercalé entre les cellules et la face avant d’un module un film semi-transparents imprimé représentant un mur en brique figure 1.9.



FIGURE 1.9 – Imitations d'un mur en brique grâce à un film imprimé intercalé [12]

Dans un autre exemple, un film réfléchissant une partie de la lumière visible, mais laissant passer les rayons infrarouges, est directement appliqué à la surface du verre de la face avant. Ce concept a été développé au Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique (CSEM) et commercialisé par Solaxess SA. Le rendu esthétique est une apparence blanche et mate, résultat d'une réflexion diffuse et équilibrée des longueurs d'ondes du visible, tandis qu'une importante partie infrarouge est transmise à la cellule solaire. Finalement, le module démontre une perte d'efficacité de 40 % par rapport à un module classique [13].



FIGURE 1.10 – Façade utilisant la technologie Solaxess en Suisse [14]

Le film est aujourd'hui disponible dans différentes nuances de gris, mais aussi de beige, de marrons, ou encore de vert, allant de 55% de performance pour les tons les plus clairs à 90% pour les tons les plus foncés par rapport à un module non coloré.

1.4.4 Cellules solaires avec traitement anti-reflet coloré

Le revêtement anti-reflet consiste à réaliser des interférences destructives lorsque la lumière se réfléchit et ainsi maximiser l'énergie transmise [15]. Il s'agit de choisir un matériau de ma-

nière à réduire la différence d'indices de réfraction avec le substrat, ainsi qu'à choisir une épaisseur autour du quart de la longueur d'onde que l'on souhaite faire disparaître dans la réflectance spectrale (voir figure 1.11).

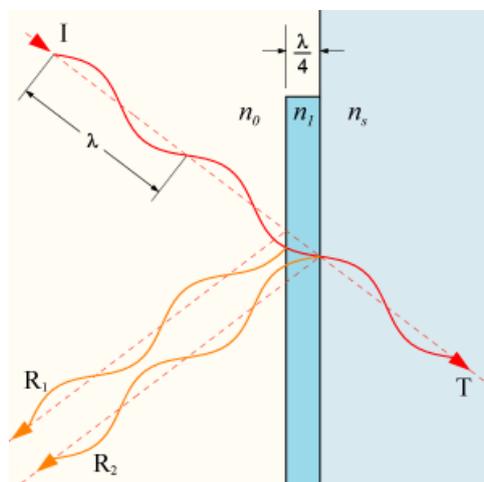


FIGURE 1.11 – Interférences destructives dans un revêtement anti-reflet [16]

Le revêtement anti-reflet est fréquemment utilisé dans les systèmes optiques. Dans le cas des cellules solaires, où l'objectif est de maximiser la transmission du spectre solaire, l'épaisseur est choisie autour de 150 nm et leur donne ainsi un aspect bleuté sombre (les ondes ayant des longueurs d'ondes proches de 600 nm sont peu perçues).

En variant l'épaisseur de cette couche, il est possible d'obtenir d'autres couleurs, comme le vert, le jaune, l'orange, ou encore le rose. Ces changements d'aspects entraînent bien sûr une baisse de performance de la cellule solaire, qui reflète davantage dans les gammes de longueur d'ondes correspondantes.



FIGURE 1.12 – Cellules solaires colorées proposées par l'entreprise Lofsolar [17]

D'après le fournisseur Lofsolar, ces cellules à "haute efficacité" ont des rendements énergétiques compris entre 16 et 18 %, ce qui correspond à environ 25% de pertes par rapport à des cellules usuelles (efficacité de 21%). Cependant, ces modèles de cellules ne sont pas très répandus. En effet, ils ne sont demandés que pour des projets spécifiques et l'investissement à l'échelle industrielle ne permet pas d'obtenir des prix compétitifs [18].

1.4.5 Les filtres interférentiels multicouches (DBR) sur les cellules ou le verre

À l'inverse d'un revêtement anti-réflexion qui vise à produire des interférences destructives et constructives, les réflecteurs de Bragg distribués (DBR) permettent de réaliser des interfé-

rences constructives autour d'une longueur d'onde cible. Ce sont des empilements de plusieurs couches minces (voir figure 1.13) alternant entre un matériau à haut indice de réfraction et à un matériau à faible indice de réfraction. Cette structure permet de réfléchir des ondes en phases autour de la longueur d'onde égale à 4 fois l'épaisseur des couches.

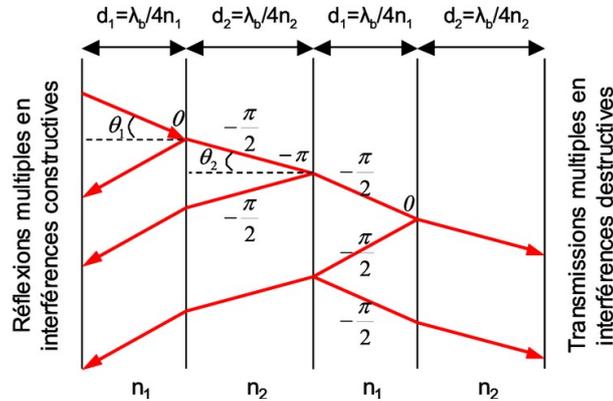


FIGURE 1.13 – Schéma de principe d'un réflecteur de Bragg distribué [19]

Plus la différence d'indices est importante, et plus la réflectance est importante. Cependant, cela élargit la bande passante et enrichit le signal résultant d'autres longueurs d'onde, donnant une couleur moins saturée (moins pure). Au contraire, plus le nombre de couches empilées (les périodes) augmente, et plus le pic de réflexion autour de la longueur d'onde souhaitée sera important et fin (figure 1.14). Augmenter le nombre de périodes permet donc de purifier une couleur.

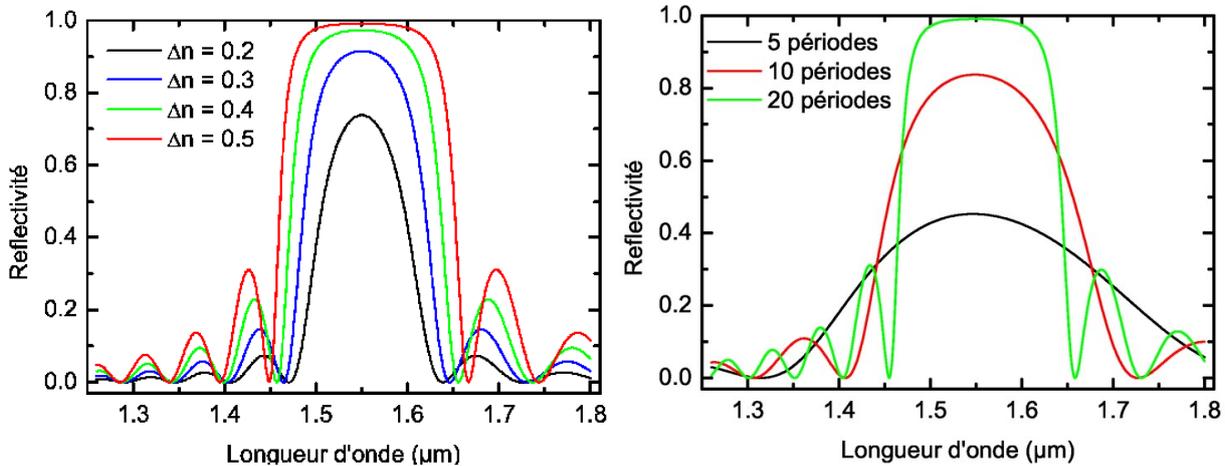


FIGURE 1.14 – Réflectivité d'un DBR en fonction de la différence d'indices ; Réflectivité d'un DBR en fonction du nombre de périodes [19]; (Ce DBR est centré sur une longueur d'onde de 1550 nm)

1.4.5.1 Cellules avec DBR

En associant plusieurs DBR d'épaisseurs différentes, il est alors possible de créer plusieurs pics de longueurs d'onde dans la réflectance spectrale pour obtenir une nouvelle couleur, résultante d'une synthèse additive de l'ensemble. Sur la figure 1.15, un réseau composé de 3

empilements d'épaisseurs différentes des matériaux ZnS et ZnO a été déposé parmi d'autres couches sur des cellules en silicium amorphe, créant différents pics de longueur d'onde dans la réflexion [20].

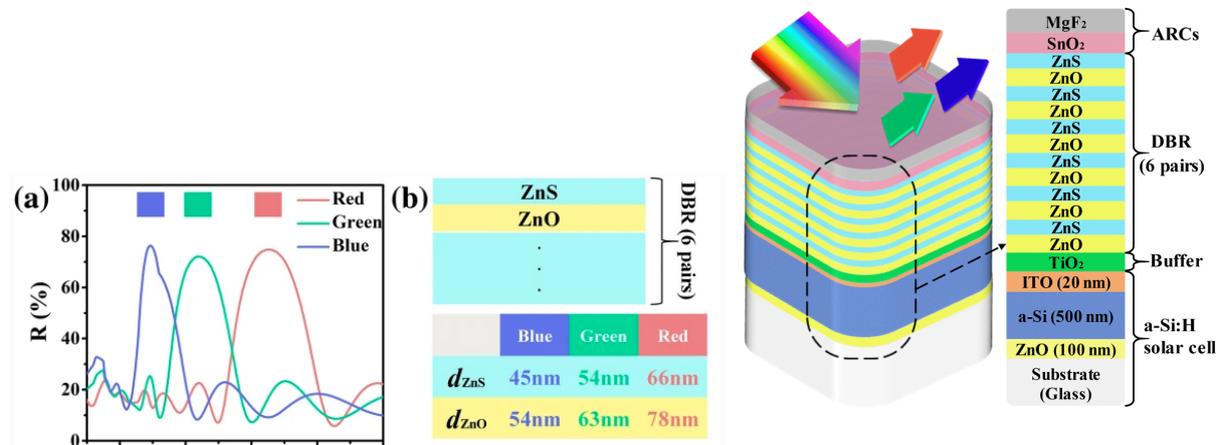


FIGURE 1.15 – a) Réflectance spectrale de différentes couches b) Épaisseur des couches correspondantes aux longueurs d'onde ciblées ; À droite, exemple d'un filtre optique multicouche déposé sur une cellule en silicium amorphe [20]

1.4.5.2 Verres avec DBR

Une technologie utilisant un filtre interférentiel sur le verre de la face avant appelée Kromatix est commercialisée par l'entreprise SwissInso, qui proposent 10 aspects différents dans des tons de bleu, vert, dorée, gris, ou encore bronze. Une photographie de quatre de ces couleurs utilisées sur la façade d'un bâtiment est montrée figure 1.16.



FIGURE 1.16 – Façade comportant quatre couleurs différentes proposées par Kromatix [21]

Ces modules montrent une perte de rendement énergétique comprise entre 10 et 14 % suivant la couleur. Cependant, le peu de couleurs différentes disponibles restreint fortement les possibilités esthétiques envisageables. Théoriquement, il serait possible de créer d'autres couleurs en produisant d'autres pics spectraux à l'aide de plusieurs réflecteurs de Bragg superposés. Cela

implique néanmoins une augmentation du coût de production. D'autres projets expérimentaux utilisant les DBR ont démontré la possibilité d'obtenir des tons très saturés de vert, rouge et bleu [22].

1.4.6 Cellules solaires semi-transparentes et/ou colorées

Il existe d'autres types de cellules solaires qui ne sont pas en cristal de silicium, comme celles au silicium amorphe (a-Si) (voir figure 1.18), celles au tellure de cadmium (CdTe) (voir figure 1.19) ou encore celles en alliage de cuivre, indium, gallium et sélénium (CGIS).

Les cellules en silicium amorphe sont fabriquées par dépôt sous vide à partir de plusieurs gaz, le plus souvent en dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (PECVD). Ces cellules ont une épaisseur d'un micromètre, dont 0,3 μm sont occupés par le silicium, et ont un rendement moyen compris entre 4 et 10%. En utilisant des filtres interférentiels déposés en couches minces, on peut obtenir certaines couleurs variant des tons noirs/jaunes à la couleur rouge et orange Terracotta (voir figure 1.17).

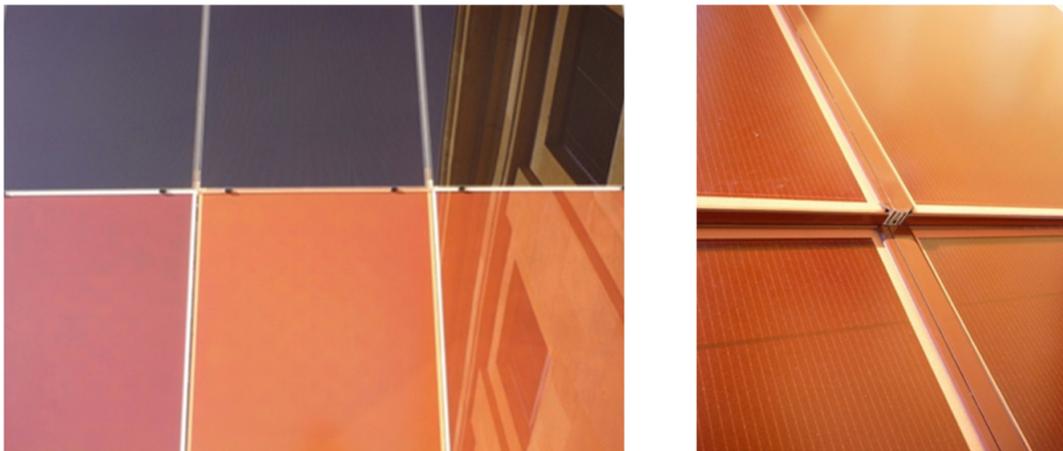


FIGURE 1.17 – A gauche : Différentes couleurs obtenues avec des couches minces de silicium amorphe ; A droite : vue détaillée d'un module "terracotta" [23]

Les procédés de dépôt sous-vide permettent de réaliser de fines couches semi-transparentes pouvant être appliquées dans les vitrages des bâtiments (voir figure 1.18).

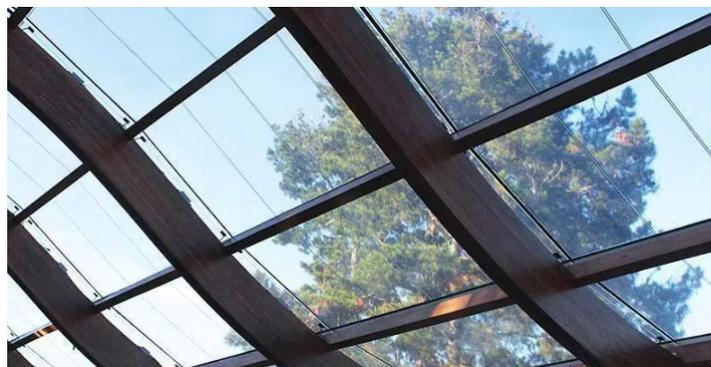


FIGURE 1.18 – Vitres utilisant du silicium amorphe semi-transparent [24]

Il est alors possible de réaliser de l'ombrage dans le bâtiment tout en produisant de l'électricité. Ces technologies sont intéressantes pour les grandes façades vitrées de certains édifices, comme dans les quartiers d'affaire. En effet, malgré un rapport entre les surfaces de toiture et de façade faible, ces édifices présentent une quasi-intégralité des façades recouvertes de vitres, ce qui donne l'opportunité d'utiliser de manière importante ces technologies tout en offrant un rendu plus esthétique par rapport à d'autres technologies plus productrices d'énergie.



FIGURE 1.19 – Technologie BIPV semi-transparentes à base de CdTe [25]

Certaines technologies permettent cette fois-ci d'obtenir différentes couleurs en même temps que la transparence, comme les cellules solaires organiques ou les cellules solaires à pigment photosensible (DSC). Ces dernières sont conçues pour réaliser de la photosynthèse artificielle, comme des feuilles végétales, où un pigment absorbe la lumière et créer des électrons excités, sensibilisant davantage la cellule dans certaines longueurs d'ondes.



FIGURE 1.20 – Façade composée de la technologie DSC (dye sensitized cell) sur le campus de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne [26]

1.4.7 Les encapsulants colorés



FIGURE 1.21 – BIPV utilisant des encapsulants colorés couplés à des cellules CdTe (Soltech), à Linköping, Suède. [27]

D'autres éléments d'un module PV autres que les cellules peuvent aussi être colorées, comme les encapsulants ou le verre de la face avant. Les encapsulants sont des polymères utilisés pour protéger les cellules solaires et les assembler définitivement avec leurs faces avant et arrières. Les plus utilisés sont l'éthylène vinyle acétate (EVA), la polyoléfine (POE) et le poly(butyral de vinyle) (PVB). Ils ont l'avantage d'avoir un indice optique proche de celui du verre, permettant de minimiser les réflexions lumineuses à l'interface avec celui-ci. Ils sont idéalement incolores, mais peuvent aussi être colorés (rose, bleu, vert, jaune, orange, rouge). Cependant, leur vieillissement aux rayons ultra-violet peut entraîner un changement de couleur observable. De plus, leur importante épaisseur est responsable d'une absorption significative de l'énergie lumineuse qui les traverse, ayant pour résultat une baisse de rendement du module PV.

1.4.8 Le verre teinté

Une manière simple de colorer un module PV est d'utiliser du verre teinté pour la face avant. En ajoutant certains minéraux au mélange vitreux lors de sa fabrication, on peut obtenir différentes nuances de couleurs : de l'oxyde de cobalt ou de manganèse pour du bleu, du chrome ou de l'argent pour du jaune, de l'oxyde de fer pour le vert, de l'oxyde de cuivre pour du rouge. AGC Glass Europe est l'une des entreprises qui commercialise ce genre de verre.

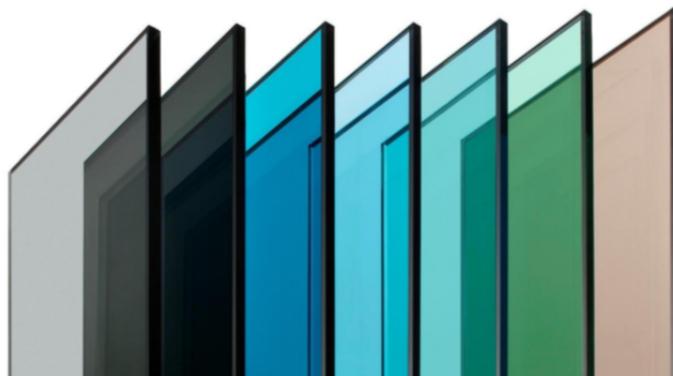


FIGURE 1.22 – Différentes couleurs de verres teintés dans la masse proposées par AGC Glass Europe [28]

Cependant, la présence de ces minéraux dans l'intégralité de l'épaisseur du verre entraîne une absorption de l'énergie lumineuse importante, allant de 27 % pour le vert à 91% pour le gris foncé. Ainsi, pour minimiser l'épaisseur traversée et l'énergie absorbée, les traitements du verre en surface ou les dépôts de fines couches s'avèrent souvent plus efficace.

1.4.9 Le verre sérigraphié

L'entreprise Suisse SUNAGE produit des modules colorés grâce à une technologie de sérigraphie de couche minérale à haute température appelée Suncol. Aujourd'hui, la collection propose 18 aspects de matériaux de constructions différents ainsi que 18 autres couleurs unies, donnant davantage de possibilités pour réaliser une bonne intégration visuelle dans le paysage urbain.



FIGURE 1.23 – Façade BIPV avec les modules sérigraphiés Suncol de chez SUNAGE [29]

1.4.10 Le verre imprimé

Une autre méthode de coloration du verre de la face avant est l'impression numérique en surface. Grâce à une imprimante utilisant des encres céramiques, n'importe quelle image nu-

mérique peut être imprimée en surface d'un verre. Celui-ci est ensuite trempé, figeant les encres dans le temps et le rendant très robuste mécaniquement. La force de cette technologie réside dans le contrôle qu'offre le dessin sur ordinateur et l'impression numérique. En effet, des dessins complexes avec une résolution pouvant aller à 1410 dpi (dots per inch) peuvent être demandés à l'imprimante. De plus, une grande gamme de couleurs est réalisable (plus de 6 000). Enfin, les encres ont une durée de vie estimée à plus de 50 ans, ce qui correspond à la durée de vie des bâtiments. Cette technologie est déjà utilisée pour créer des façades vitrées esthétiques sans couplage avec un système photovoltaïque, comme à l'AFIMall City à Moscou, où un bâtiment possède une façade rappelant les images d'une forêt figure 1.24.



FIGURE 1.24 – Façades d'un bâtiment de l'AFIMall City à Moscou, imprimée par Dip-Tech [30]

L'entreprise KameleonSolar propose des modules PV personnalisés avec verre imprimé appelés ColorBlast. Plus de 4000 couleurs sont réalisables, avec une durabilité de 100 ans. Les principales sont présentées sur un disque chromatique figure 1.25. N'importe quelle image peut être réalisée en impression, dans des formes et tailles personnalisées, avec une surface texturée ou plate, et avec la possibilité de choisir entre une configuration avec l'encre à l'intérieur du module ou bien à l'extérieur. Selon les couleurs choisies, les puissances délivrées varient entre 3,3 et 4,7 Wc par cellule et ne dépassent pas 168 Wc par mètre carré. Il existe tout de même une liste de 600 couleurs optimisées pour la transmission optique. Grâce à l'utilisation d'un motif tramé et à l'optimisation des disques qui le composent, la lumière peut passer à travers les interstices pour générer de l'énergie dans les cellules solaires. En même temps, les disques agissent comme des pixels pour créer une image ou une couleur homogène à une distance d'environ 5 mètres. La lumière est également capable de passer à travers les éléments de la trame, selon la transmittance spectrale de la couleur choisie. L'espace entre les points cause un assombrissement de la couleur globale, mais que l'on peut contrer en rehaussant les couleurs numériquement. Certaines couleurs visées sont si vives que le motif doit avoir un taux de couverture plus important pour les représenter fidèlement [31]. Pour chaque projet, un motif personnalisé peut permettre d'obtenir la couleur désirée ainsi que la puissance nominale la plus élevée possible. Finalement, les cellules deviennent invisibles. Cette technologie offre donc diverses possibilités pour camoufler la présence des cellules PV et optimiser l'énergie qui leur est transmise.

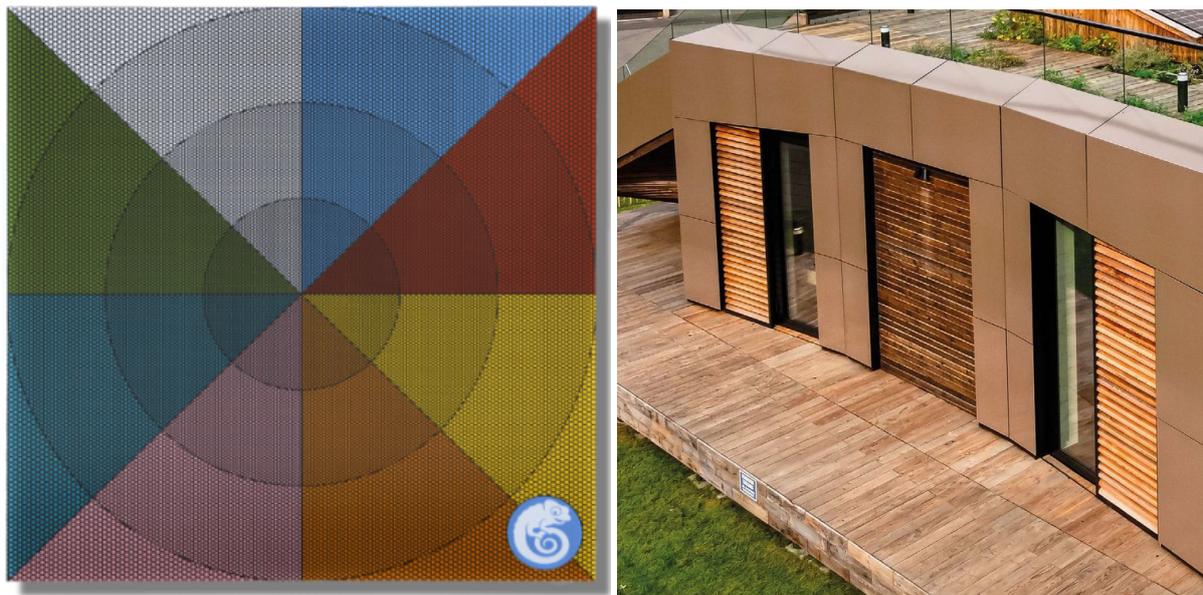


FIGURE 1.25 – Disque imprimé servant de démonstrateur Colorblast [32]; Un bâtiment utilisant la technologie ColorBlast conçu par Glass Partners Solutions [33]

Certains projets ont déjà utilisé cette technologie pour réaliser des façades BIPV, comme l'entreprise Ertex Solar GmbH, qui a recouvert les façades et le toit d'un bâtiment situé à Zurich avec des modules BIPV brun, offrant un rendu homogène, figure 1.26.



FIGURE 1.26 – Bâtiment Solaris à Zurich [34]

1.4.11 Comparaison des technologies BIPV esthétiques

Les auteurs Pelle et al. [35] ont regroupé dans un tableau (figure 1.27) les différentes technologies disponibles dans le commerce pour réaliser des façades BIPV esthétiques, en les classant par type et en recensant leurs efficacités énergétiques, couleurs, dimensions ou flexibilités respectives.

Product	Producer	Typology	Shape	Dimension [mm]	Colour	Efficiency [%]	Nominal Power [Wp/m ²]
Coloured solar cells	LOF Solar	i	Rectangular	Custom	>10	14.5–18	120–165
Colorblast	Kameleon Solar	v	Custom	Custom	~6000	8–15	80–150
Kromatix	SwissINSO	v	Rectangular	1000 × 1640 664 × 1587	Custom	11.9–18	120–285
Kaleo	CSEM	iii	Rectangular	Custom.	Custom	Depending on coverage	na
Solaris Heritage (tile)	Freesuns	v	Rectangular	Custom.	2	up to 12.8	131–156
Solaxess	Solaxess	iii	Custom	Custom	5	11–15	106–147
DSD-PV	Dutch Solar Design	iii		900 × 1200 mm	Custom	Depending on coverage	na
Suncol® uniform	Glassfer & Sunage	v	Custom.	Custom	>15	12.7–15	90–250
Suncol® texturing	Glassfer & Sunage	v	Custom.	Custom	Custom	Depending on coverage	90–250
InvisibleCell®	Invent	v	Rectangular	997 × 1663	Custom	Depending on coverage	162
Coloured amorphous silicon PV glass	Onyx solar	iv	Rectangular	Custom	Custom	na	28–58
Soltech Facade	Soltech	ii	Rectangular	1200 × 600	4	1.2–11.2	na

FIGURE 1.27 – Produits BIPV disponibles dans le commerce, classés par typologie : (i) cellules solaires avec revêtement antireflet ; (ii) couches PV actives semi-transparentes ou colorées ; (iii) couches ou intercalaires contenant des filtres solaires, des revêtements colorés ou à motifs ; (iv) films d'encapsulation polymères colorés ; et (v) verre imprimé, revêtu ou à finition alternative. [35]

Les technologies les plus productrices au mètre carré semblent être celles qui utilisent un verre imprimé ou revêtu en face avant. Les modules Kromatix de SwissINSO, qui possèdent des filtres optiques multicouches, montrent des puissances nominales allant de 120 à 285 Wc/m². Les modules Suncol de Glassfer et Sunage avec verre sérigraphié proposent quant à eux des puissances nominales allant de 90 à 250 Wc/m², comparable à la technologie précédente. Cependant, le choix de couleur chez ces deux fabricants reste relativement faible (moins d'une dizaine chez SwissINSO, moins d'une quarantaine chez Sunage), comparé à l'imposante diversité de couleurs proposée par KameleonSolar et ses modules ColorBlast. En effet, l'entreprise propose environ 6000 nuances différentes en utilisant du verre imprimé en surface avec des encres céramiques. Ces derniers sont moins efficaces énergétiquement (de 80 à 150 Wc/m²), mais leur puissance nominale reste du même ordre de grandeur que d'autres produits beaucoup moins diversifiés en couleur (Cellules colorées de Lofsolar, tuile Solaris Heritage de Freesuns, Solaxess).

1.5 Positionnement du sujet dans l'état de l'art

En général, l'optimisation d'un système est davantage facilitée lorsque les moyens mis en jeu pour l'étude offrent un contrôle précis des paramètres. En comparant les différentes technologies présentées, celles qui offrent d'importants degrés de libertés sont celles qui proposent la

conception d'un revêtement via la réalisation d'un dessin sur ordinateur. Au contraire, les fournisseurs qui utilisent des revêtements anti-reflet ou multicouches ne proposent pas de concevoir précisément l'aspect du module PV, seulement un choix à faire dans un catalogue restreint. L'impression numérique sur verre, en plus de proposer un grand nombre de couleurs, est aujourd'hui accessible chez des fournisseurs verriers. Cela rend cette technologie adéquate pour une étude cherchant à faire varier des paramètres facilement et à moindre coût.

Ainsi, on pourra s'intéresser à l'impact des dépôts d'encre sur la production électrique des modules PV, leurs aspects esthétiques et les nouvelles problématiques qu'ils font apparaître. L'étude en parallèle des propriétés optiques de ces encres peut aider à comprendre comment la lumière interagit avec celles-ci, de manière à pouvoir déterminer des paramètres optimaux à privilégier. Pour déterminer ces paramètres, des conditions sur le point de vue esthétique considéré doivent être déterminées. D'autres aspects liés à des problèmes auxquels font face habituellement les modules PV peuvent aussi être explorés, comme l'impact des encres sur leur échauffement ou encore sur leur vieillissement.

1.6 Conclusion du chapitre 1

Pour conserver une planète vivable, les émissions de gaz à effet de serre doivent considérablement chuter. Les bâtiments représentent une part importante de ces émissions, spécifiquement à cause de leur demande en énergie. Un déploiement massif de la technologie BIPV peut aider significativement à couvrir ces besoins, si bien que le marché est en plein essor. Les modules BIPV ont des caractéristiques multifonctionnelles liées à l'intégration esthétique et technique dans l'enveloppe du bâtiment, dans le réseau électrique et les systèmes. Ils nécessitent donc une conception spécifique. La présence croissante de ces éléments dans les projets fait apparaître de nouvelles contraintes dans la conception des bâtiments, notamment esthétiques.

L'expansion des modules BIPV colorés personnalisés, qui dissimulent complètement les cellules PV de la vue, contribuerait à améliorer l'acceptation sociale du photovoltaïque dans les zones où il est perçu comme inesthétique par les architectes et les riverains. Ce haut niveau de personnalisation constitue la force et le caractère unique des produits BIPV mais aussi une limite, puisqu'il empêche la production en série des modules et, par conséquent, il limite la réduction de leur coût. Il est donc nécessaire de surmonter les barrières techniques, sociales et économiques pour atteindre une plus grande échelle d'applications BIPV et ainsi améliorer leur rentabilité.

L'état de l'art présente différentes technologies permettant de personnaliser l'aspect des modules BIPV, et certaines se démarquent par leur accessibilité et l'important contrôle qu'elles offrent sur le rendu visuel. La technologie d'impression numérique sur verre est disponible chez des fournisseurs verriers et utilise des images conçues sur ordinateur. Le dessin numérique permet de faire varier des paramètres aisément et à moindre coût. Les possibilités pour réaliser des tests semblent alors quasi infinies. Ce travail de recherche se concentre ainsi sur le potentiel de la technologie d'impression sur verre pour optimiser le compromis entre esthétisme et performance de modules BIPV personnalisés. La démarche abordée dans ces travaux est présentée dans le chapitre 2.

2 Démarche mise en œuvre pour la caractérisation des encres céramiques

Le travail de recherche consiste à évaluer le potentiel que peut représenter l'impression numérique sur verre pour une transformation esthétique des modules PV optimisée. Grâce à de nombreux moyens expérimentaux et des notions théoriques d'optique, l'idée est de déterminer quels sont les paramètres importants sur lesquels la conception doit se concentrer. Finalement, les résultats doivent permettre de comprendre le comportement d'un module PV esthétique en fonction des caractéristiques du verre imprimé qui constitue sa face avant.

2.1 L'impression numérique sur verre

Tout comme les imprimantes numériques pour papier, les imprimantes pour céramique utilisent des têtes d'impression à buses pour projeter l'encre directement sur le verre. Elles sont placées sur un chariot qui balaie la surface du verre, disposé à plat. Des matériaux céramiques piézoélectriques permettent de contrôler l'ouverture des buses et réaliser des dépôts de gouttes correspondant au rendu désiré (figure 2.1).

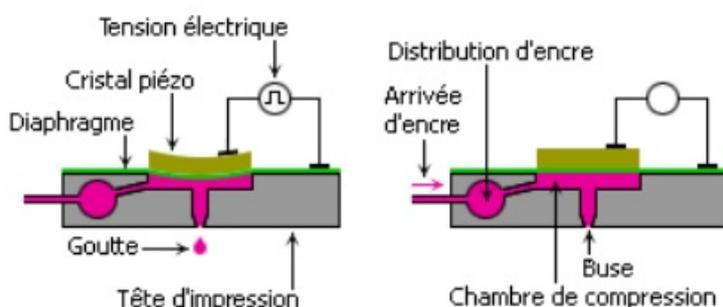


FIGURE 2.1 – Fonctionnement d'une tête d'impression à cristal piézoélectrique pour les imprimantes à jet d'encre [36]

Le procédé d'impression est le suivant :

1. Après avoir choisi la taille, l'épaisseur et le type de verre à utiliser, celui-ci est placé à plat sur l'imprimante
2. Le logiciel qui contrôle l'impression doit être paramétré pour que l'aspect final soit le plus proche possible de celui désiré comme la taille de l'image et la variation spatiale de l'épaisseur de chaque encre (opacité)
3. Impression : Chaque tête d'impression parcourt la vitre tandis que chaque buse projette les quantités d'encres selon les signaux piézoélectriques associés à l'image d'entrée. Chaque

goutte est séchée immédiatement par de l'air soufflé. Le temps de réalisation varie en fonction de la taille de la surface à imprimer et du niveau de détail des motifs

4. Trempe thermique : Une fois l'impression terminée, la vitre est portée à haute température dans un four jusqu'à atteindre une température proche de sa température de ramollissement (entre 550 et 700 °C), puis est refroidie brutalement en surface grâce à des jets d'air. Ce traitement thermique permet d'améliorer la résistance mécanique des verres (entre deux et cinq fois plus résistant) et de figer les encres définitivement dans le verre (durée de vie de plus de 50 ans)



FIGURE 2.2 – Impression réalisée par l'imprimante Dip-Tech [30]

Aujourd'hui, l'entreprise israélienne Dip-Tech s'est imposée en tant que leader de la production d'imprimantes à encre céramique sur verre, pour diverses applications dans le domaine de l'architecture, l'automobile ou les produits vaisseliers. Ils produisent eux-mêmes les encres utilisées dans leurs imprimantes.

De nombreux verriers utilisent des imprimantes numériques pour réaliser les verres colorés demandés par leurs clients, qui sont souvent des acteurs du bâtiment. Ainsi, une application BIPV de cette technologie s'ancre directement dans les domaines d'actions de ces fournisseurs. Ce travail s'intéresse donc à l'utilisation de cette technologie en particulier, basée sur un modèle populaire de l'entreprise Dip-Tech, disponible chez les verriers. Les procédés de décoration du verre utilisent des émaux colorés, qui sont des poudres pouvant être vitrifiées et cuites à la surface du verre. Les couleurs sont obtenues par ajout de différents oxydes et un liant est utilisé pour faciliter l'application sur le verre.

2.1.1 Présentation des encres céramiques

Les pigments et colorants utilisés pour la décoration du verre sont connus depuis plusieurs décennies. Les pigments sont des cristaux colorés dispersés dans les émaux ou les pâtes. Ils doivent résister aux attaques physiques et chimiques de la phase liquide formée pendant la cuisson. Les colorants sont des substances qui, pendant la cuisson, se dissolvent dans la phase liquide. Ils donnent de la couleur en diffusant des éléments de transition dans les émaux et les pâtes [37].

De nouvelles méthodes de synthèse rapides, qui utilisent des fours rotatifs, des fours à rouleaux et le broyage par jet ont permis de garder des coûts de fabrication compétitifs, tandis que

le nombre et la quantité de composants et d'additifs dangereux ont été réduits au minimum pour répondre aux exigences en matière de santé et d'environnement. Ces innovations ont ainsi permis la production de ces encres à grande échelle, ouvrant de nouvelles possibilités d'utilisation comme l'impression numérique.

L'imprimante utilisée par le fournisseur verrier crée des mélanges entre 6 encres : rouge, verte, bleue, jaune, blanche et noire, dites couleurs "primaires" figure 2.3. Pour pouvoir estimer et prédire le potentiel énergétique d'une couleur donnée, il est judicieux de caractériser optiquement ces couleurs de base.

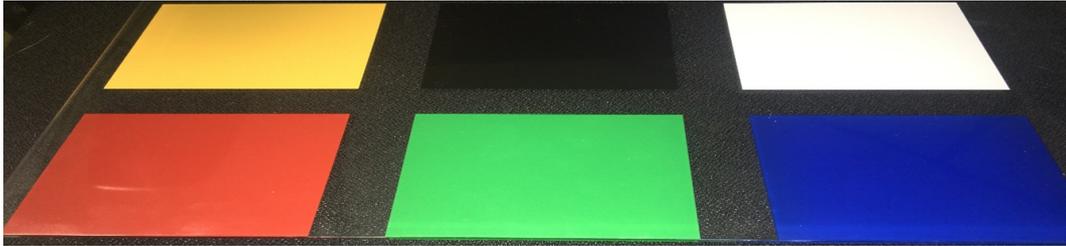


FIGURE 2.3 – Nuancier des encres primaires utilisées par l'imprimante (épaisseur d'environ 7 μm)

Un nuancier de chacune de ces couleurs a été fourni. Les encres sont composées de pigments en suspension dans un liquide qui permet de les étaler. Dans le cas des encres céramiques, ce sont des particules de pigments oxydées dans un mélange de silice, de liants et de fondants. Pour évaluer l'influence de l'épaisseur de l'encre sur l'impact énergétique et visuel, deux valeurs différentes ont été choisies, l'épaisseur maximale réalisable, qui correspond à environ 7 μm , et sa moitié, 3.5 μm .

2.1.2 Observations au microscope des dépôts d'encres céramiques

Les surfaces imprimées sont observées à l'aide de deux types de microscope. Un microscope électronique à balayage (MEB) permet d'observer la structure interne des encres de base et d'en déduire les éléments chimiques qui les composent, par analyse aux rayons X. Il permet également de mesurer précisément l'épaisseur de la couche d'émail.

Ensuite, à l'aide d'un microscope optique Keyence, on peut observer avec plus de détails les motifs imprimés, les nuances de couleur et leur répartition au sein d'un mélange, mais on peut aussi réaliser des images 3D de la surface du verre. Les profils altimétriques des motifs tramés peuvent ainsi être analysés.

2.2 Caractérisation optique des encres

Pour connaître quelles parts de l'énergie sont transmises, réfléchies et absorbées par les encres (caractérisation optique), leurs transmittance spectrale et de réflectance sont mesurés à l'aide d'un spectrophotomètre à sphère intégrante. Cette dernière permet de capter les rayons diffusés dans toutes les directions grâce à de multiples réflexions en son sein figure 2.4 avant d'atteindre le détecteur. La globalité des phénomènes de réflexion, diffusion et de transmission est ainsi pris en compte par l'appareil grâce aux différentes configurations possibles. Cet instru-

ment permet de travailler entre des longueurs d'ondes comprises entre 280 et 2500 nm, ce qui correspond à la gamme d'émission du spectre solaire.

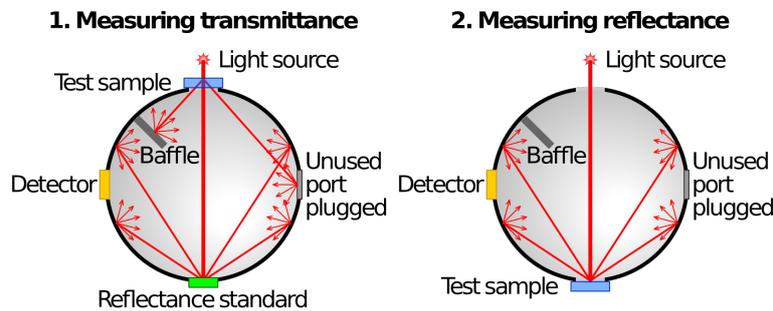


FIGURE 2.4 – Schéma de principe d'une sphère intégrante dans les configurations transmittance et réflectance ([38])

2.2.1 Mesures en réflexion d'échantillons de verres imprimés à l'aide d'un spectrophotomètre à sphère intégrante

Les échantillons sont d'abord caractérisés en réflexion. Dans cette configuration, l'échantillon est placé à l'extérieur du spectrophotomètre. Les verres transparents, le protocole consiste à réaliser des mesures avec un réflecteur connu placé derrière. figure 2.5. On utilise ainsi un absorbeur noir préalablement caractérisé en réflexion. Ce choix limite les apports de lumière qui pourraient perturber la mesure et diminue les incertitudes. De plus, cela rapproche les paramètres expérimentaux des conditions d'un module PV, où les cellules PV jouent le même rôle d'absorbeur.

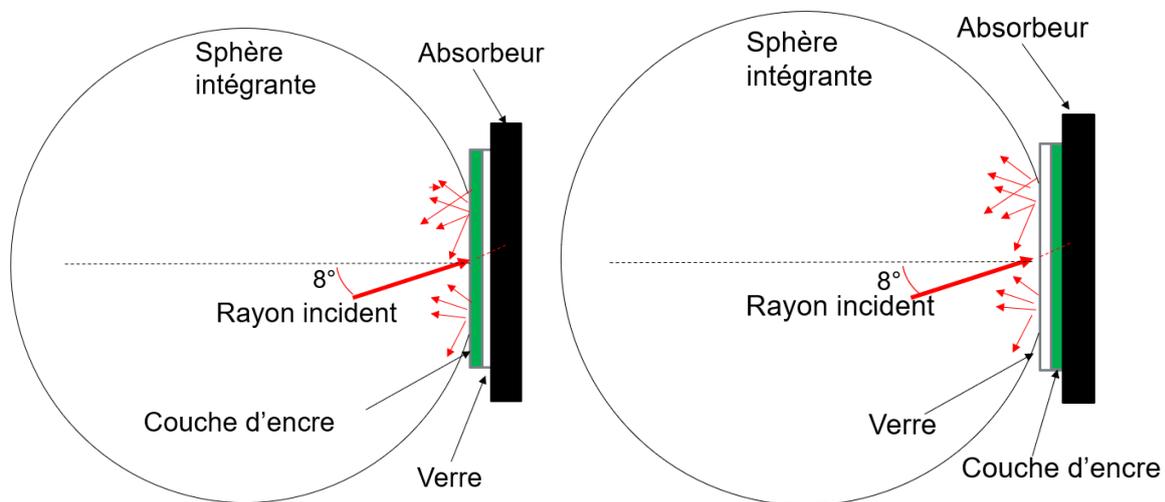


FIGURE 2.5 – Protocole expérimental de mesure en réflexion avec un absorbeur noir. A gauche, la mesure est effectuée avec la couche d'encre du côté incident. À droite, elle est effectuée du côté opposée

Ce protocole est réalisé selon 4 cas faisant varier deux paramètres, l'épaisseur et le côté du verre où se trouve l'encre. Des mesures sont donc obtenues dans les deux configurations

possibles, avec l'encre du côté incident et l'encre du côté opposé, et pour deux épaisseurs différentes, l'épaisseur maximum pouvant être déposée par l'imprimante (environ 7 μm) et sa moitié (autour de 3,5 μm). Du fait de la conservation de l'énergie, l'absorbance peut se déduire des valeurs de réflectance et de transmittance. Un protocole de mesure en transmission est donc mis en œuvre.

2.2.2 Mesure en transmission d'échantillons de verres imprimés à l'aide d'un spectrophotomètre à sphère intégrante

Pour réaliser des mesures en transmission, les échantillons doivent être placés à l'intérieur du spectrophotomètre. Malheureusement, ceux-ci sont trop grands et doivent donc être découpés à une taille inférieure à 7 cm. Du fait des importantes contraintes internes dues à la trempe thermique, une découpe entraîne un bris en de multiples petits morceaux. Pour éviter de perdre le verre, le nuancier est passé dans un laminateur avec une feuille d'encapsulant EVA, adhérent au verre. Ceci permet de fixer les morceaux et de les maintenir solidaires, donnant des échantillons de la taille souhaitée après découpe. La couche d'EVA est donc à considérer dans les résultats de mesure. Celle-ci ayant un indice optique proche de celui du verre, les réflexions potentielles à l'interface et les pertes optiques sont minimisées. Cependant, le fait que le verre soit cassé en de multiples morceaux ajoute également un biais.

Les résultats de mesure permettent d'estimer les quantités d'énergie qui traversent le verre et qui sont susceptibles d'atteindre la cellule PV. Ils permettent également de déterminer sa réflectance, responsable de sa couleur. La colorimétrie permet de la quantifier et de réaliser des comparaisons.

2.2.3 Colorimétrie

La colorimétrie a pour objectif de donner une description numérique de la couleur des objets. Elle a été standardisée par la communauté internationale de l'éclairage (CIE) en 1931 et est basée sur la perception humaine. En effet, la couleur d'un objet est une perception interprétée par notre cerveau. Trois principaux facteurs sont à considérer : d'abord, la source de lumière qui éclaire l'objet en question, appelée illuminant. Ensuite, la réflexion ou la transmission de la lumière induite par l'objet. Enfin, la nature du capteur qui reçoit cette lumière, c'est-à-dire les yeux de l'observateur.

2.2.3.1 Les espaces colorimétriques

Le premier système colorimétrique a été basé sur les courbes d'égalisation des trois types de cônes de l'œil humain figure 2.6, sensibles aux couleurs rouge, verte et bleue. Ces courbes ont été déterminées expérimentalement par synthèse additive de couleurs monochromatiques correspondant aux longueurs d'onde suivante :

- $\lambda_R = 700\text{nm}$ (rouge)
- $\lambda_G = 546,1\text{nm}$ (vert)
- $\lambda_B = 435,8\text{nm}$ (bleu)

Ces couleurs sont ainsi considérées comme des primaires. Pour atteindre certaines couleurs du spectre visible, une des trois sources primaires devait être retirée et superposée à la couleur cible, donnant des valeurs négatives sur les quantités à ajouter figure 2.6.

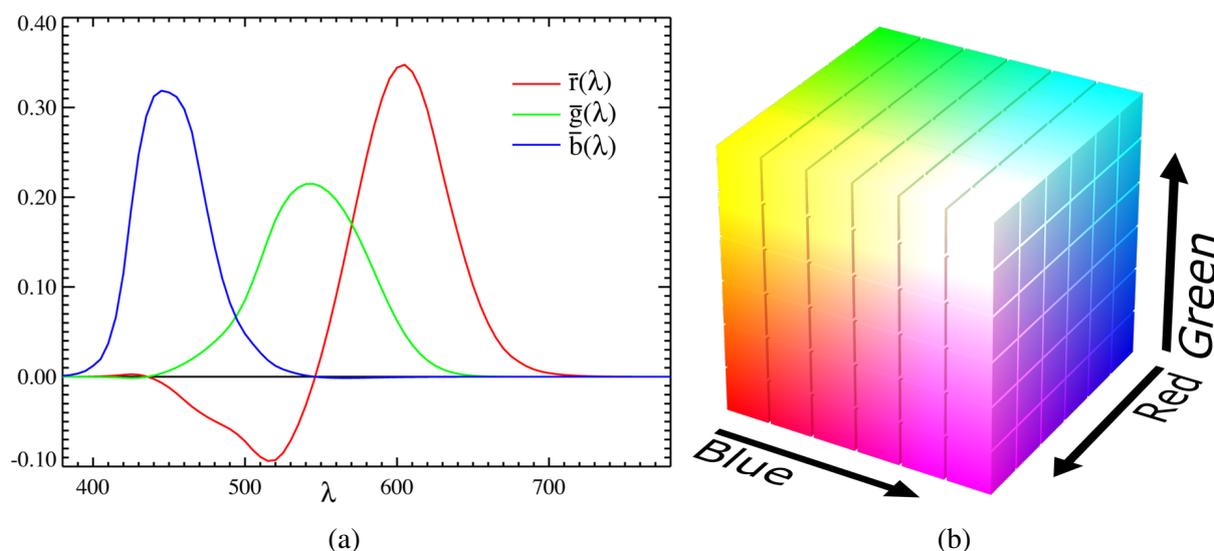


FIGURE 2.6 – A gauche : Fonctions d'égalisation des couleurs établis par la CIE (RGB 1981) [39]; À droite : Espace colorimétrique numérique RGB [40]

Ces trois fonctions constituent l'observateur de référence CIE 1931. En réalisant des calculs d'intégrales comprenant la réflectance spectrale d'un objet et chacune de ces fonctions, on obtient les coordonnées RGB correspondant. Ce système de coordonnées permet de réaliser des calculs de synthèse colorimétrique additive de manière simple, grâce à sa linéarité :

$$C = r.R + v.V + b.B \quad (2.1)$$

Il est construit avec des vecteurs unitaires orthogonaux, et est donc représenté par un volume de la forme d'un cube (figure 2.6). Ce système comporte toutefois des désavantages, comme l'incapacité à décrire des couleurs très saturées sans l'utilisation d'une composante négative. D'autres espaces colorimétriques découlant de celui-ci ont ensuite été créés pour s'adapter aux besoins d'étude de ces grandeurs et aux applications plus récentes, impliquant l'ensemble des couleurs distinguées par la vision humaine. L'espace XYZ est le plus utilisé par la colorimétrie scientifique.

2.2.3.2 L'espace CIE 1931 XYZ

Dans ce système colorimétrique, les yeux de l'observateur sont décrits par les fonctions colorimétriques de l'observateur de référence, élaborées par la CIE section 2.2.3.2. Elles sont, elles aussi, construites à partir des fonctions d'égalisation de l'œil humain, mais sont adaptées aux calculs colorimétriques grâce à leurs valeurs positives. L'illuminant le plus commun standardisé par la CIE est le D65 section 2.2.3.2 (Daylight 6500K), correspondant au spectre d'émission d'un corps noir à une température de 6500 kelvin. La réflexion ou la transmission induite par un objet s'obtient en réalisant des mesures de la fraction de lumière réfléchie ou transmise en fonction de la longueur d'onde, c'est-à-dire des mesures de spectres, à l'aide d'un spectrophotomètre.

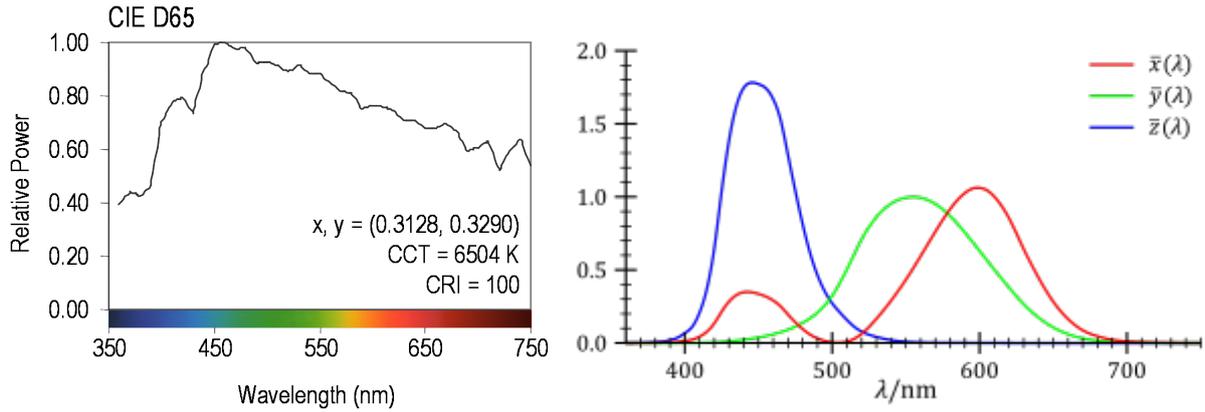


FIGURE 2.7 – À gauche : Distribution spectrale de l'illuminant D65 [41]; À droite : Fonctions d'égalisation des couleurs de l'observateur de référence CIE [42]

En réalisant des calculs d'intégrales prenant en compte la source, la réflectance spectrale et la courbe de réponse en sensibilité de chaque type de cône, on obtient trois grandeurs X,Y,Z formant des coordonnées dans un espace en 3 dimensions, dit l'espace colorimétrique des tristimulus XYZ [43]. Dans ce système de coordonnées, les valeurs des tristimulus XYZ sont normés par un terme défini de manière à ce que la luminance de la source, le tristimulus Y, soit égale à 1 :

$$\begin{aligned} X &= k \cdot \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda & Y &= 1 = k \cdot \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \cdot \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda & k &= \frac{1}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Ainsi, les tristimulus d'un objet selon sa réflectance spectrale $R(\lambda)$ sont :

$$\begin{aligned} X &= k \cdot \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda & Y &= k \cdot \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \cdot \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.3)$$

Cet espace est en trois dimensions, mais peut être représenté plus aisément en deux dimensions en normant chaque tristimulus par la somme des trois. L'équation d'un plan passant par les extrémités des vecteurs unitaires ($x + y + z = 1$) permet de comparer des couleurs de luminance égale dans un diagramme de chromaticité (figure 2.8) :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y \quad (2.4)$$

Sur ce diagramme, le couple de valeurs (x,y) forme les coordonnées cartésiennes de chromaticité, tandis que le tristimulus Y correspond à la luminance (photométrie). Avec cette transformation, on peut comparer des couleurs de luminances égales et les ensembles de couleurs

perceptibles ou réalisables par différents supports, appelés gamuts. Le gamut de la vision humaine est l'ensemble borné par les chromaticités de chaque longueur d'onde pure (saturée) du spectre visible, et la droite des pourpres, reliant les extrémités bleue et rouge. On peut y placer les couleurs correspondantes aux spectres d'émission de différents corps en fonction de leur température (la couleur blanche de la lumière du soleil correspond bien au centre du gamut et la température de 5500K). Enfin, les gamuts de différents systèmes de coordonnées peuvent être tracés sur un même diagramme pour comparer le potentiel colorimétrique des écrans, des imprimantes ou des appareils photos.

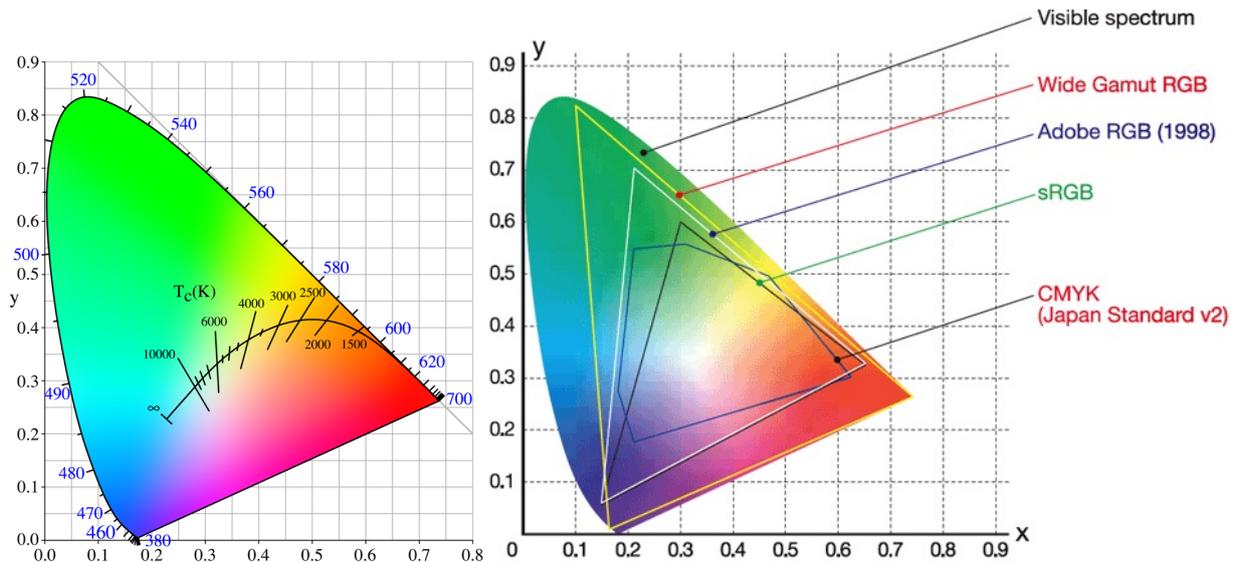


FIGURE 2.8 – À gauche : Diagramme de chromaticité CIE xy [44]; À droite : Gamuts de différents supports numériques [45]

2.2.3.3 L'espace CIE L*a*b* de 1976

L'espace colorimétrique CIE L*a*b* a été créé en 1976 avec l'idée de transformer les notions de tristimulus XYZ dans un espace plus proche de la perception humaine. En effet, bien que les cellules coniques de l'œil répondent approximativement à la lumière rouge, verte et bleue, les impulsions nerveuses envoyées au cortex visuel sont des signaux en termes de luminosité (L*) et de couleurs opposées, rouge-vert (a*) et jaune-bleu (b*). L'intensité lumineuse L* (appelée luminance) est alors séparée du couple [a*,b*] (appelé chrominance), et la couleur peut ainsi être décrite en deux dimensions (figure 2.9), indépendamment de l'intensité lumineuse. Ce système de coordonnées est devenu très populaire, si bien qu'il est devenu l'unique système recommandé pour la spécification et la comparaison des couleurs. Les transformations depuis l'espace XYZ dépendent des coordonnées X_n, Y_n, Z_n du point blanc considéré, correspondant à l'illuminant :

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad a^* = 500 \cdot \left(\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right) \quad b^* = 200 \cdot \left(\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right) \quad (2.5)$$

Pour évaluer la différence entre 2 couleurs, on calcule la distance euclidienne, c'est-à-dire la racine des carrés des écarts entre chaque coordonnée :

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2.6)$$

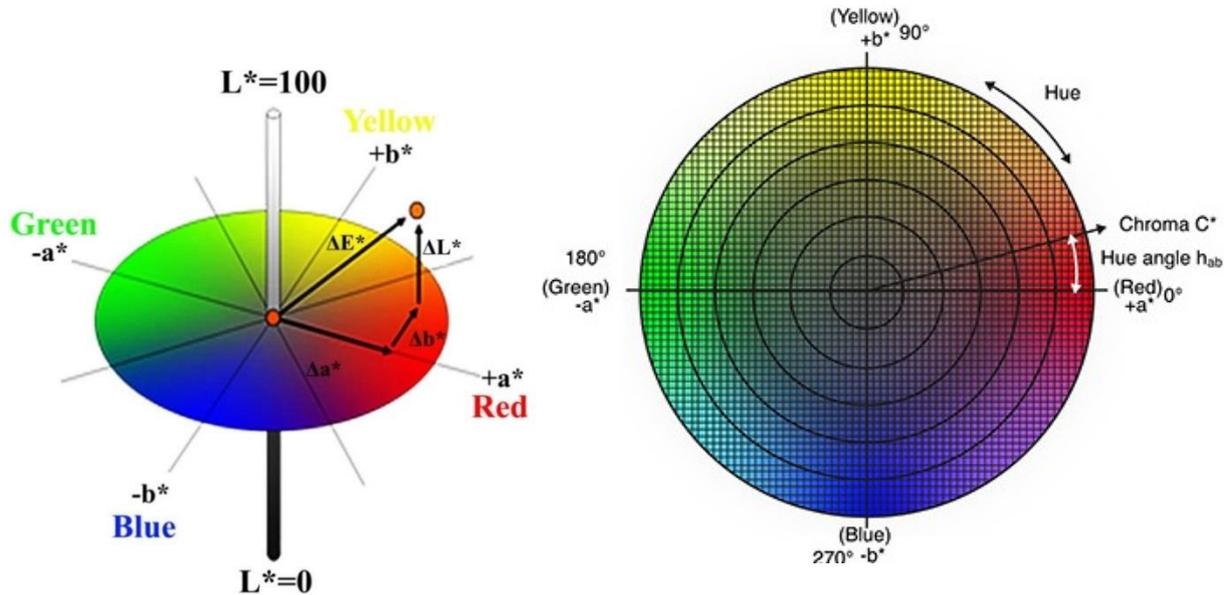


FIGURE 2.9 – À gauche : Espace Colorimétrique CIE $L^*a^*b^*$ [46] ; À droite Coordonnées polaires C^* et h^* [47]

Pour une description encore plus intuitive, on utilise un système de coordonnées polaire, où l'angle représente la teinte (de l'anglais hue) avec le paramètre h , et la distance au centre (le rayon) représente la saturation (ou chromaticité) avec le paramètre C^* :

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad h^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2.7)$$

2.2.4 Mesures des échantillons de verre imprimés au colorimètre portable

La couleur d'un objet peut être directement mesurée grâce à un colorimètre. Cet instrument contient un spectrophotomètre dont la bande spectrale est réduite à l'intervalle [400 nm ; 700 nm], qui correspond à l'intervalle de sensibilité de l'œil humain. Il réalise ensuite les calculs colorimétriques précédemment présentés suivant les normes de la CIE. On peut ainsi déterminer directement les coordonnées colorimétriques d'un objet selon sa réflectance spectrale (figure 2.10).



FIGURE 2.10 – Observation de la réflectance d’un module terracotta avec le colorimètre et détermination des coordonnées $L^*a^*b^*$ correspondants

Cependant, le colorimètre utilisé, du fait de son caractère portable, possède une sphère intégrante bien plus petite que le spectrophotomètre, et réalise donc des mesures moins homogènes. De plus, la transparence des verres étudiés donne différents résultats suivant l’objet qui se trouve derrière. Dans le cadre d’une application BIPV, les mesures peuvent être réalisées directement sur un module PV laminé. En utilisant l’appareil, il est possible de changer de réglages concernant l’illuminant source, l’espace de couleur d’arrivée et même l’angle d’incidence de la source (2° ou 10°).

2.3 Élaboration de dessins pour exploiter les limites de l’œil humain

Un dessin numérique ou une image doit être déterminée pour être imprimée sur le verre. Évidemment, suivant les couleurs de l’image numérique partagée au fournisseur verrier, les caractéristiques optiques de la face imprimée seront différentes. Pour contrôler et optimiser la couleur d’une surface, il existe des méthodes de tramage basées sur les limites de la vision humaine.

2.3.1 La diffraction et les limites de l’œil humain

L’œil humain est constitué d’une pupille, qui joue le rôle d’un diaphragme, d’un cristallin, qui est une lentille convergente, et d’une rétine, l’écran sur lequel s’affiche l’image résultante figure 2.11.

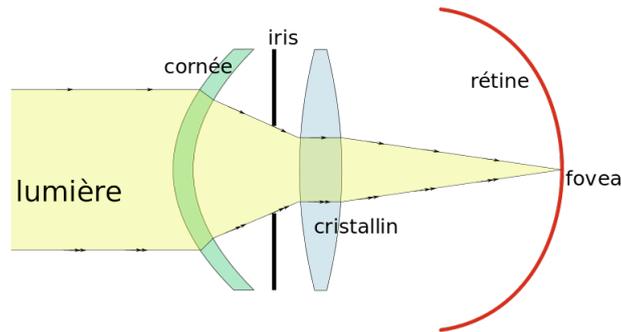


FIGURE 2.11 – Modèle optique de l'œil [48]

Proche de la zone centrale se trouve la fovéa, pourvue de capteurs colorimétriques, appelés les cônes. Dans la zone périphérique se trouvent les bâtonnets, sensibles à l'intensité lumineuse. Comme toute onde au travers d'un diaphragme, un phénomène de diffraction est induit lors du passage dans la pupille figure 2.12. Les rayons lumineux sont alors déviés suivant leur distance à l'axe optique. Ce phénomène s'appelle "l'étalement du point" et montre que l'image d'un objet au travers d'une lentille est toujours plus grande que cet objet. Mathématiquement, cela équivaut à réaliser un produit de convolution entre chaque point de l'image source et ses voisins.

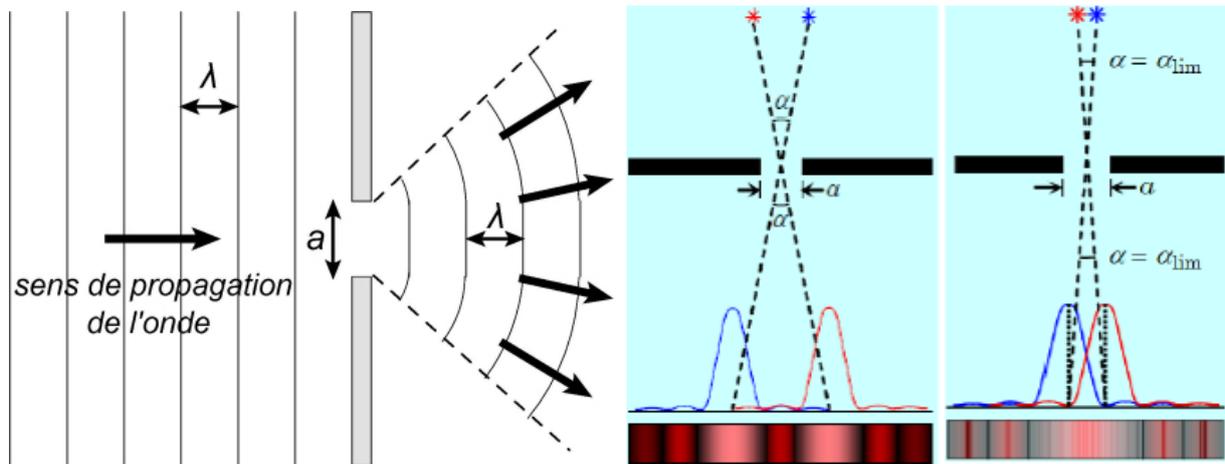


FIGURE 2.12 – À gauche : Phénomène de diffraction au travers un diaphragme [49]; À droite : Schéma illustrant la limite de distinction de Rayleigh [50]

Afin d'adapter la quantité de lumière qui atteint la rétine, le diamètre de la pupille est fonction de l'intensité lumineuse. La pupille peut être ouverte jusqu'à 7 mm dans le noir et 2 mm dans un endroit très lumineux. La limite de résolution due à la diffraction est déterminée par le critère de Rayleigh et dépend seulement de la longueur d'onde et du diamètre de la pupille :

$$\alpha_{lim} = 1,22 \frac{\lambda}{a} \quad (2.8)$$

Sachant que la lumière visible est comprise dans une gamme de longueur d'onde allant de 380 nm à 780 nm, cet angle limite de résolution est compris entre 0.0038° et 0.027° , donnant une valeur moyenne 0.015° (environ une minute d'arc). Cet angle de résolution correspond à environ 1 mm à 10 m de distance. Si des points sont espacés et observés à une distance donnant un angle inférieur à la limite de résolution, ils sont alors perçus confondus (figure 2.12).

Grâce à l'effet de la diffraction, des points de différentes couleurs peuvent se mélanger au niveau de la rétine et produire une synthèse colorimétrique additive (figure 2.13). Les pixels des écrans sont conçus à cet effet.

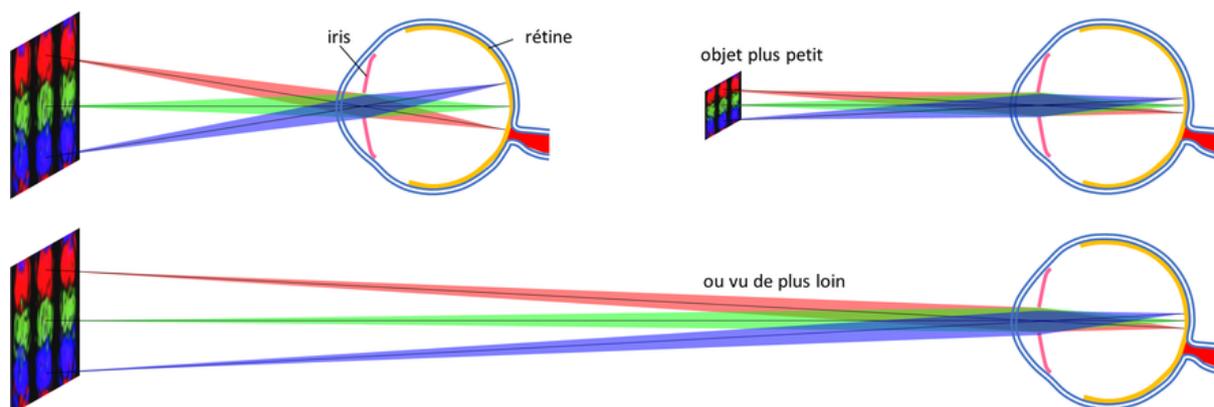


FIGURE 2.13 – Mélange colorimétrique de pixels permis par le critère de Rayleigh [48]

Un moyen d'optimiser la surface imprimée peut donc être d'exploiter les limites de résolution de l'œil humain, en réalisant le mélange colorimétrique à l'intérieur de l'œil au lieu de réaliser un mélange des encres sur le verre, à la manière d'un écran qui utilise des pixels de 3 couleurs. Il existe des méthodes de tramage pour produire ce genre de dessin.

2.3.2 Création de différents type de tramage

Le tramage consiste à réaliser des motifs périodiques, en faisant varier les paramètres tels que la forme du motif, sa taille et sa fréquence spatiale. Grâce à un logiciel de dessin vectoriel, on peut facilement contrôler ces paramètres et produire différents dessins pour qu'ils soient imprimés sur la surface du verre. Les paramètres qui ont pu être évalués sont le taux de couverture, le type de disposition des motifs, la couleur et l'effet de la pixelisation.

Un exemple de certaines trames qui ont pu être testées se trouve figure 2.14.

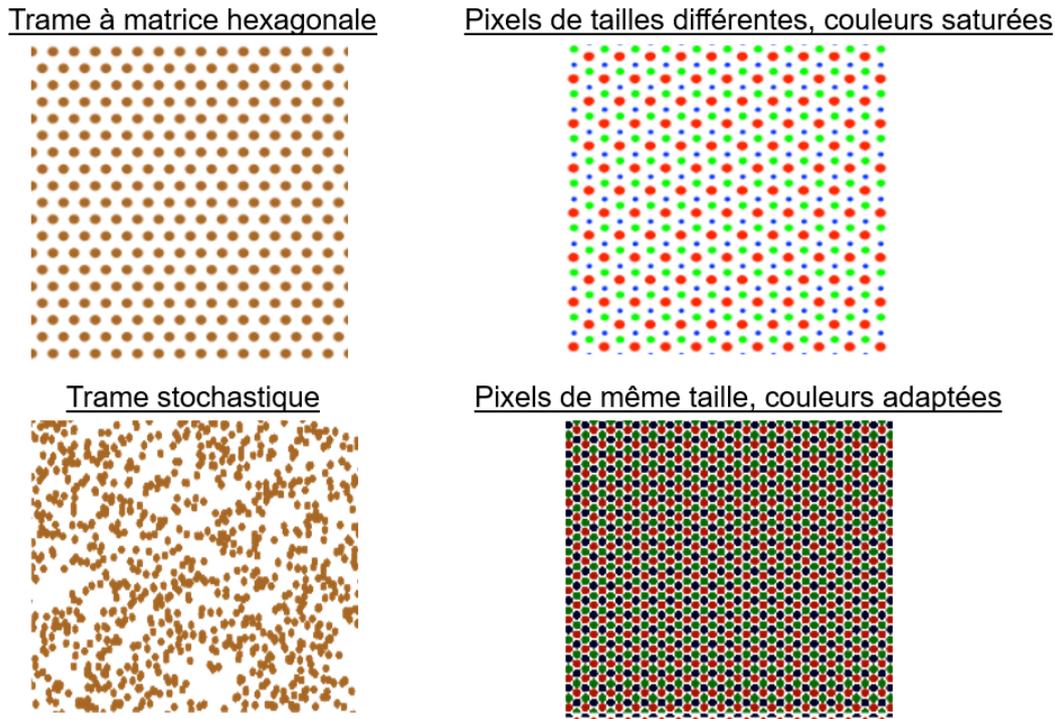


FIGURE 2.14 – Exemple de différents types de trames qui ont été testées

Suite à ces tests, une méthode d'optimisation de trames a été élaborée et testée. La conception des verres finalisée, les modules PV peuvent ainsi être fabriqués.

2.4 Caractérisation énergétique des verres imprimés via fabrication de module PV colorés

Comme montré figure 1.7, un module PV comporte une face avant, une face arrière, et des cellules PV encapsulées dans des polymères. Pour évaluer l'impact énergétique de ces dessins sur la production solaire, il convient de fabriquer des modules PV comportant des verres imprimés en face avant. Chaque module doit être identique exceptée la face avant. L'encre étant présente sur un seul côté du verre, deux dispositions possibles de celle-ci peuvent être testées, à l'intérieur ou à l'extérieur du module. Pour plus de praticité et minimiser les coûts, un petit format est envisagé. Le fournisseur de verre imposant une taille minimum de 20 cm, le choix de l'utilisation de quatre cellules convient. De plus, les incertitudes de mesures liées aux différences de production entre chaque cellule sont davantage minimisées par rapport à des modules monocellulaires.

2.4.1 Cellules PV utilisées dans l'étude

Des cellules bifaciales PERC (Passivated Emitter Rear Contact) du fabricant chinois DMECGC ont été utilisées du fait de leur popularité et leur importante disponibilité au laboratoire. Ces cellules sont en silicium monocristallin et possèdent une face arrière passivée. Elles mesurent 156 mm de côtés et ont une épaisseur d'environ 210 micromètres. Elles possèdent 5

bus-bars de 0.7 mm de largeur et 110 fingers en face avant. La face arrière comporte 5 points de soudures de 1,7 mm d'épaisseur et 156 fingers.

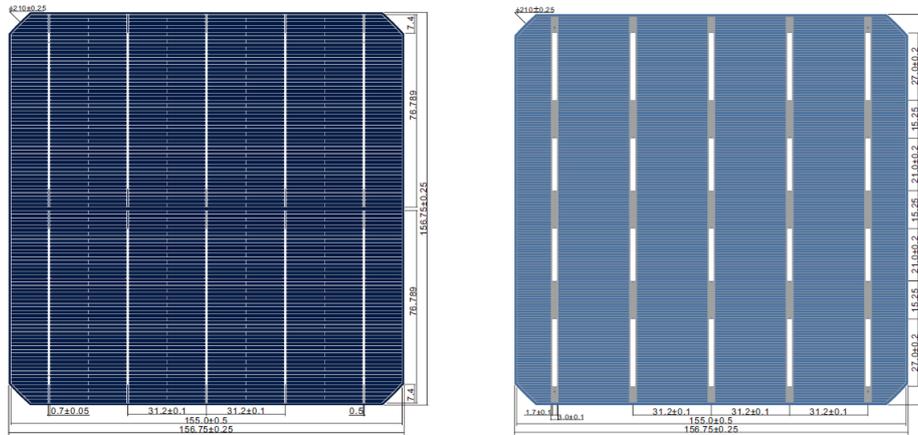


FIGURE 2.15 – Aspect des cellules PERC DMEGC (face avant et face arrière) [51]

La caractérisation électrique donne des puissances pouvant aller jusqu'à 5,42 W (22,2 % d'efficacité), un courant de court-circuit d'environ 10 A et une tension de circuit ouvert de 670 mV. Leur réponse spectrale, qui correspond à l'intensité délivrée en fonction de la puissance incidente reçue pour chacune des longueurs d'onde, a été mesurée au laboratoire. Pour évaluer l'impact du type de cellule PV sur l'efficacité énergétique des verres imprimés, des cellules de type hétérojonction (HET) sont également utilisées dans certains modules colorés. Des comparaisons peuvent donc être faites entre les cellules PERC et les cellules HET.

2.4.2 Interconnexions

Les cellules doivent être connectées de manière à former un string (guirlande). Des bus-bars (5 sur chaque face) sont soudés sur la cellule et reliés à des rubans, constituant les interconnexions du module. Elles sont constituées d'un alliage de cuivre et d'étain recouvert d'argent. Les rubans forment également les connexions à l'extérieur du module permettant de récupérer le courant électrique. Cet ensemble est appelé le "squelette" du module.

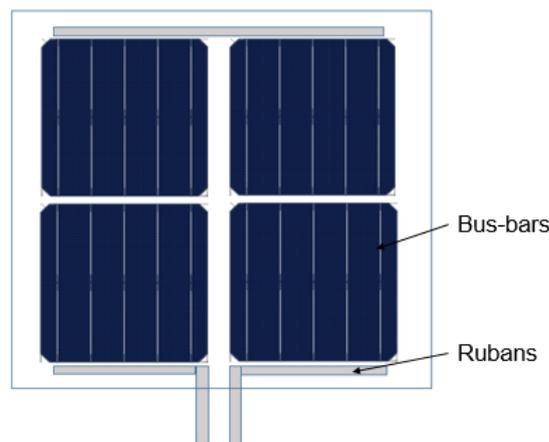


FIGURE 2.16 – Squelette des modules PV fabriqués

Dans le cadre de l'évaluation esthétique, des essais seront réalisés avec des interconnexions colorées en noir.

2.4.3 Encapsulants

Afin de protéger les cellules et de figer l'empilement lors de la lamination, des encapsulants doivent être utilisés. Les plus connus sont l'EVA, le PVB ou le POE. Ces polymères sont produits sous forme de rouleaux de feuilles de différentes épaisseurs, de manière à pouvoir découper la forme souhaitée. Dans le cas de l'étude, un encapsulant noir de type ionomère est utilisé pour la face arrière afin de limiter le contraste avec les cellules solaires et dissimuler davantage celles-ci. Ce choix conditionne celui concernant l'encapsulant de la face avant, qui doit être de même nature pour permettre une bonne adhésion entre les deux. Un encapsulant de type ionomère, transparent, est donc utilisé pour la face avant.

2.4.4 Face arrière

La face arrière, dite "backsheet", sert de substrat à l'encapsulant arrière. Elle peut être de différente nature, mais est souvent en verre ou en Tedlar®. Ce dernier est moins lourd et moins coûteux que le premier. Il a donc été choisi pour être utilisé tout au long de l'expérience. Comme les encapsulants, il est aussi fourni sous forme de rouleaux et peut être découpé de la manière souhaitée. Du fait de la présence de l'encapsulant arrière noir, la couleur du backsheet a peu d'importance. Finalement, c'est un film Tedlar® de couleur noire qui a été utilisé.

2.4.5 Lamination

Pour assembler les éléments et obtenir un module PV, il faut procéder à la lamination. Pendant ce processus, composés de différents paliers de température et de pression, l'encapsulant va fondre et épouser les formes de la cellule PV tout en adhérant aux faces avant et arrières. En refroidissant, il se solidifie en liant définitivement l'ensemble. On place donc l'ensemble dans un laminateur spécialement conçu pour la fabrication de module PV, de la marque 3S (Swiss Solar Systems). Possédant deux chambres de pressions et une plaque chauffante, il fait subir à son contenu des conditions de pression et de température programmées dans le temps, la "recette" de lamination. On distingue cinq étapes lors de ce processus. L'empilement est d'abord déposé à température ambiante sur la plaque chauffante se trouvant entre 100 et 150°C (1). Il apparaît alors une déformation du verre due à sa différence de température avec la plaque, rendant hétérogène le profil de température entre le centre et les bords du module (2). Pour éviter ce gradient de température et garantir une meilleure adhésion de l'encapsulant (réticulation homogène), des broches surélèvent le module, permettant ainsi un chauffage homogène sans contact direct avec la plaque (3). Pendant ce temps, la chambre inférieure du laminateur est pompée, éliminant l'air et les substances volatiles pour éviter la formation de bulles dans les modules. Lorsque le point de ramollissement de l'encapsulant est franchi et que la température est homogène, le module PV est directement pressé sur la plaque chauffante grâce à la mise à l'air libre de la chambre supérieure (4). Le contact avec la plaque augmente alors la vitesse de chauffage et initie le processus de post-polymérisation de l'encapsulant jusqu'à la densité de réticulation souhaitée (5). Un refroidissement contrôlé termine ensuite le processus.

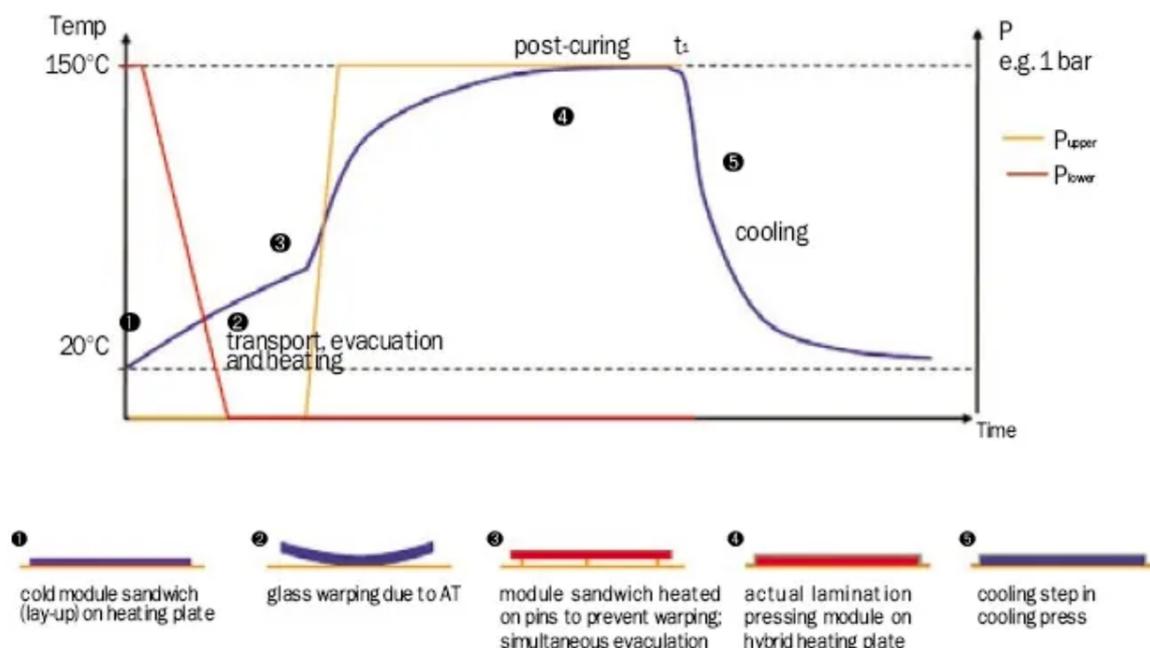


FIGURE 2.17 – Profils de température et de pression subi par l’empilement constituant le module PV au sein du laminateur ([52])

Le programme de lamination dépend des encapsulants choisis, et notamment de leur température de changement d’état. Dans le cas des ionomères, cette température est de 155°C. Environ 15 minutes après le début du procédé, la recette est terminée et les modules peuvent être sortis pour refroidir lentement. Les modules peuvent ensuite être caractérisés énergétiquement via des mesures I-V en conditions standards.

2.5 Caractérisation énergétique des modules fabriqués en conditions standards (flash-test)

Pour caractériser un module PV, on s’intéresse principalement à sa courbe I-V délivrée en conditions standards, c’est-à-dire la réponse en courant et tension sous un ensoleillement (1000 W/m^2) et une température (25°C) normalisés. On utilise alors des dispositifs qui respectent des normes concernant le spectre émis et la précision de mesures. Des corrections sont appliquées pour prendre en compte les différences avec le spectre réel d’émission du soleil et les variations de températures ambiantes. Le dispositif qui a été utilisé (Spire), fonctionne avec une lampe à Xénon. Le module est connecté par ses bornes en tension et courant, puis recouvert d’un drap noir.



FIGURE 2.18 – Simulateur solaire (3S Spire flash-test) utilisé pour la caractérisation I-V [53]

Le dispositif produit un flash pendant un court instant, applique un nombre important de tensions sous forme de balayage et mesure l'intensité délivrée pour chaque point. Le caractère court du flash permet au module PV de ne pas s'échauffer pendant les mesures. Les tensions appliquées, l'intensité mesurée ainsi que les différents coefficients de corrections appliqués par le logiciel associé dépendent de la recette. Celle-ci doit être adaptée à la taille du module et au type de cellules utilisées.

2.6 Mesures de performance en conditions extérieures et relevés de températures

Pour confirmer les mesures réalisées au flash-test, il convient de disposer les modules en extérieur sous un éclairage solaire réelle. Certains modules ont donc été placés sur un banc de mesure (figure 2.19) incliné à 30 ° par rapport au sol et orienté plein sud (180 ° Nord).



FIGURE 2.19 – Banc de mesures extérieures dans la zone INCAS de l'INES

Des mesures I-V ainsi que des mesures de température au dos des modules ont été réalisées en continu pendant plusieurs mois. Les conditions météorologiques telles que l'ensoleillement, la vitesse du vent et la température de l'air sont également mesurés en temps réels grâce à un mât présent sur le site.

2.7 Vieillessement de minimodules colorés sous rayonnement ultraviolet

Le rayonnement UV présent dans le spectre solaire est source de dégradations des performances énergétiques des modules PV. Ainsi, la question du vieillissement sous rayonnement UV est également explorée dans le cas des modules colorés. En effet, il est possible qu'au fur et à mesure des années, la couleur de ces modules se détériore. La couche d'encre peut également protéger les cellules PV des rayonnements UV et diminuer le processus de vieillissement. Un vieillissement différent suivant la couleur de la face avant peut éventuellement être observé. Cependant, les fournisseurs de verres imprimés indiquent que ces encres peuvent durer jusqu'à 100 ans ([32]). Des verres imprimés de petite taille, disponibles au laboratoire, ont été utilisés pour fabriquer des modules monocellulaires, neuf modules colorés et un module de référence.



FIGURE 2.20 – Cinq des 8 modules fabriqués pour le vieillissement. De gauche à droite : Papyrus White, Papyrus White Dotted, Grass Green, Grass Green Dotted, Pigeon Blue

Une enceinte de vieillissement UV permet d'irradier des modules PV avec un spectre centré sur les UV. Elle permet de vérifier si les modules respectent la norme, qui est aujourd'hui de 60 KWh. Celle utilisée dans cette campagne expérimentale est l'enceinte ATLAS UV XL-1000 de ASLI. Le spectre UV est émis par une lampe à Xénon. Le placement des modules au sein d'un carrousel rotatif permet d'homogénéiser l'éclairement entre les modules. Il règne une atmosphère à une température de 80°C à l'intérieur.



FIGURE 2.21 – Enceinte de vieillissement UV utilisée [54]

Pour déterminer les différentes tendances de vieillissement au cours du temps, les modules sont caractérisés en courbe I-V toutes les 150 heures. Après 900 heures et 130 kWh d'éclaircissement, 7 points de mesure ont pu être obtenus pour chaque module.

2.8 Analyse des résultats expérimentaux et calcul numériques

En parallèle de la campagne expérimentale, des démarches de calcul numériques ont été mis en œuvre pour confirmer les résultats expérimentaux et aider à leur analyse. Ainsi, des calculs théoriques de courants de court-circuit, une estimation de l'absorbance des encres et un modèle thermique dynamique ont été réalisés.

2.8.1 Calcul de la part d'énergie solaire réfléchi (réflectance solaire)

Pour estimer la part de l'énergie solaire qui est réfléchi, on calcule le ratio du flux réfléchi sur le flux incident, c'est-à-dire l'intégrale de la réflectance spectrale mesuré pondérée par l'intégrale du spectre solaire *AMG1.5*, rapportée à l'intégrale du spectre solaire :

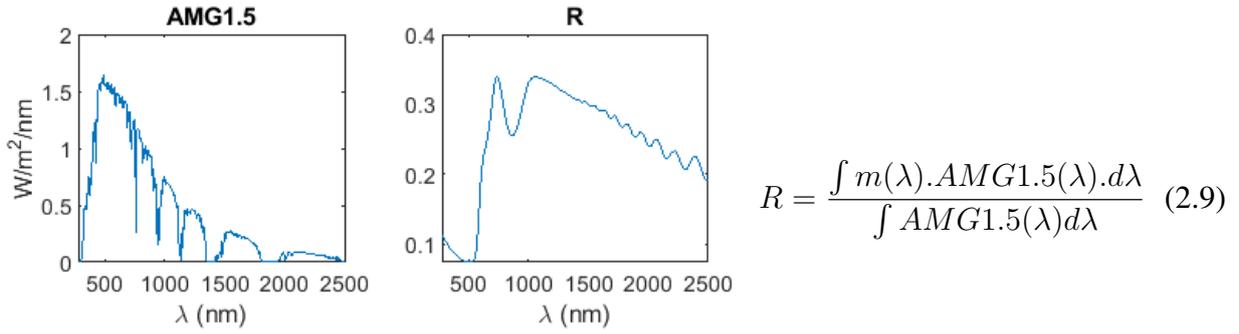


FIGURE 2.22 – Spectre solaire à la surface de la terre AMG1.5 et réflectance spectrale utilisés pour le calcul de la réflectance solaire

L'intégrale est bornée entre 280 et 2500 nm, gamme d'émission du spectre solaire. Cette grandeur sera appelée réflectance solaire par la suite.

2.8.2 Estimation de la transmittance interne des encres via les données optiques

Grâce à l'utilisation des mesures spectrales obtenues en réflexion et en transmission, on peut en déduire une absorbance spectrale propre à cette encre et à son épaisseur. La mesure en transmission m_T a été réalisée en présence d'EVA sur le côté non imprimée de l'échantillon. Elle peut donc être approximée par l'égalité suivante :

$$m_T(\lambda) = (1 - R(\lambda)) \cdot T_c(\lambda) \cdot T_v(\lambda) \cdot T_{EVA}(\lambda) \quad (2.10)$$

R est la réflectance de l'échantillon déterminée grâce aux mesures en réflexion, T_c , T_v et T_{EVA} les transmittances internes de la couche d'encre, du verre et de l'EVA. Ces deux dernières sont connues. La transmittance interne des couches d'encres s'exprime donc comme :

$$T_c(\lambda) = \frac{m_T(\lambda)}{(1 - R(\lambda)) \cdot T_v(\lambda) \cdot T_{EVA}(\lambda)} \quad (2.11)$$

D'après la loi de Beer-Lambert, la transmittance interne d'un milieu décroît exponentiellement selon son épaisseur z et son coefficient d'extinction κ tel que $T(z, \lambda) = e^{-\kappa(\lambda) \cdot z}$. Le coefficient d'extinction est donc déterminé :

$$\kappa(\lambda) = -\frac{1}{z} \cdot \ln(T_c(\lambda)) \quad (2.12)$$

La transmittance interne d'une couche d'encre d'une épaisseur 2 fois plus petite peut être déterminée selon la formule :

$$T\left(\frac{z}{2}, \lambda\right) = e^{-\kappa(\lambda) \cdot \frac{z}{2}} = (e^{-\kappa(\lambda) \cdot z})^{0,5} = \sqrt{T_c(z, \lambda)} \quad (2.13)$$

Grâce à cette relation, on peut réaliser un calcul de courant de court-circuit I_{sc} théorique que l'on pourra comparer avec ceux réellement mesurés sur les modules fabriqués.

2.8.3 Calcul des courants de court-circuit théoriques des modules fabriqués

La théorie permet de calculer les courants de court-circuit des modules fabriqués en utilisant les données optiques [55]. Il s'agit de réaliser des calculs d'intégrales qui considèrent les réflectances spectrales $R(\lambda)$, les transmittances spectrales internes des différentes couches $T_i(\lambda)$ (verre, encres, encapsulant), le spectre d'émission de la source $AMG1.5(\lambda)$ et la réponse spectrale de la cellule PV $RS(\lambda)$.

$$I_{sc} = \int_{380}^{1200} AMG1.5(\lambda) \cdot S \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot T_c(\lambda) \cdot T_v(\lambda) \cdot T_e(\lambda) \cdot RS(\lambda) d\lambda \quad (2.14)$$

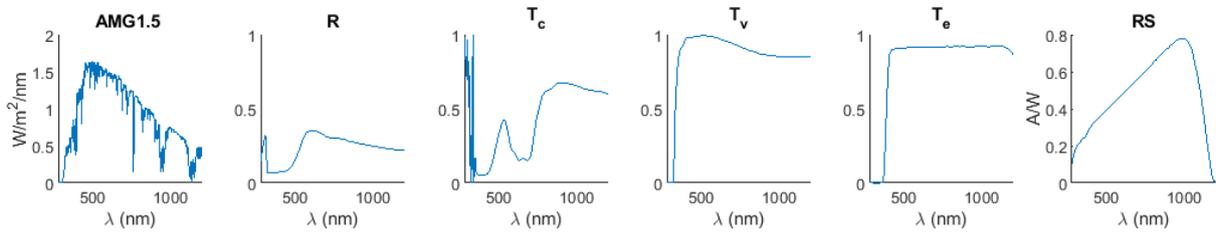


FIGURE 2.23 – Courbes utilisées pour calculer le courant de court-circuit. De gauche à droite : le spectre solaire AMG1.5, la réflectance du module, la transmittance interne de la couche imprimée, la transmittance interne du verre, la transmittance interne de l'encapsulant et la réponse spectrale de la cellule PV

Dans cette formule, les réflectances et transmittances aux interfaces entre les milieux ne sont pas considérées. Celles-ci dépendent fortement des indices de réfraction et des angles d'incidences. Les encres étant des milieux diffusants, de nombreux angles sont mis en jeu au cours de la propagation et parvenir à quantifier ces effets de manière précise relève d'une grande complexité.

2.9 Construction d'un modèle thermique dynamique pour comparer avec les mesures expérimentales

L'élaboration d'un modèle thermique pour chaque module permet de vérifier ce qui est mesuré expérimentalement, tant au niveau thermique qu'au niveau optique. En effet, les différences entre le modèle et les mesures de températures dépendent d'abord des propriétés optiques.

Un modèle thermique dynamique est donc élaboré en résolvant l'équation de la chaleur à chaque pas de temps :

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t}(t) = \Phi_{entrant}(t) - \Phi_{sortant}(t) \quad (2.15)$$

où C_p est la capacité calorifique du module. Elle est égale à la somme des capacités calorifiques de chaque élément composant le module PV :

$$C_p = \sum_k \rho_k \cdot V_k \cdot c_{p,k} = \sum_k \rho_k \cdot e_k \cdot S \cdot c_{p,k} \quad (2.16)$$

Les valeurs utilisées dans le calcul sont détaillées table 2.1

Matériau	e (mm)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg/K)
Verre	4	3000	500
Ionomère	0.2	960	2090
Cellule PV	0.15	2330	677
Ionomère noir	0.2	960	2090
Tedlar®	0.1	1200	1250

TABLE 2.1 – Caractéristiques des matériaux compris dans le module PV [56]

Le flux entrant correspond à l'ensemble de l'énergie qui arrive du soleil $E.S$ et qui n'est pas réfléchi par le module.

$$\Phi_{entrant} = (1 - R).E.S \quad (2.17)$$

Le flux sortant comprend l'énergie qui quitte le module sous forme de production électrique et sous forme de pertes thermiques, par convection et rayonnement.

$$\Phi_{sortant} = \Phi_{elec} + \Phi_{conv} + \Phi_{rad} \quad (2.18)$$

Ce bilan considère l'ensemble du module comme système, supposé à une température uniforme. La conduction thermique au sein du module n'est donc pas considérée.

Le banc de mesure nous permet de connaître le flux électrique sortant $\Phi_{elec} = P_{mes}$, le flux entrant G_T , la température de l'air T_a et la vitesse du vent v_w .

2.9.1 Estimation des pertes par convection

Le flux sortant en échange convectif peut être estimé en déterminant la valeur du coefficient d'échange h_{conv} selon les abbaques de la mécanique des fluides. On détermine d'abord la nature des écoulements en évaluant le nombre de Reynolds :

$$Re = V_w * L * \nu_a \quad (2.19)$$

avec $\nu_a = 1.57.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ la viscosité dynamique de l'air à 25°C et $L = 0.36 \text{ cm}$ la longueur d'un module.

Les mesures de vents ne dépassant jamais 5 m/s, le nombre de Reynolds ne sera jamais supérieure à 10^5 . Dans le cas d'une plaque plane située dans le lit d'écoulement, la limite de transition d'un régime laminaire vers un régime turbulent est autour de 5.10^5 . Les écoulements considérés seront donc toujours laminaires. Une unique formule concernant le nombre de Nusselt peut ainsi être utilisée pour l'ensemble des calculs. Celle-ci correspond à la formule empirique élaborée pour une plaque plane se trouvant dans un écoulement laminaire :

$$Nu = 0.664.Re^{0.5}.Pr_a^{1/3} \quad (2.20)$$

2.9 Construction d'un modèle thermique dynamique pour comparer avec les mesures expérimentales

avec $Pr_a = 0.707$ le nombre de Prantl de l'air à 25°C. Enfin, on détermine le coefficient d'échange de convection forcée grâce à la définition du nombre de Nusselt :

$$h_{conv,force} = \frac{k_a \cdot Nu}{L} \quad (2.21)$$

où $k_a = 0.0626 \text{ W/m}^2/\text{K}$ est la conductivité thermique de l'air.

On détermine ensuite le coefficient d'échange par convection naturelle, qui doit être évalué notamment dans le cas des journées sans vent. Cet échange est due à un mouvement naturelle du fluide résultant des variations locales de températures et de la poussée d'archimède. L'angle d'inclinaison γ est un paramètre important et l'échange d'énergie n'est pas le même sur chaque face du module. Le nombre de Nusselt dans le cas de la convection naturelle se détermine selon les nombres de Prantl et de Grashoff :

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu_a^2} = 9.81 \cdot \frac{L^3}{\nu_a^2} \cdot \frac{T - T_a}{T_a} \quad (2.22)$$

avec $g = 9.81$ l'accélération de la pesanteur et $\beta = \frac{1}{T}$ le coefficient de dilatation d'un gaz supposé parfait. On utilise ensuite les corrélations indiquées selon l'angle d'inclinaison [57]. L'angle d'inclinaison étant de 60° par rapport à la verticale, les formule utilisées pour le calcul des nombres de Nusselt pour les faces supérieures et inférieures sont :

$$Nu_{nat,sup} = 0.057 + 0.098 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{Gr \cdot Pr_a}{1 + \frac{0.492}{Pr_a}}\right)^{1/3} \quad (2.23)$$

$$Nu_{nat,inf} = 0.308 + 0.362 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{Gr \cdot Pr_a}{1 + \frac{0.492}{Pr_a}}\right)^{1/4} \quad (2.24)$$

De la même manière que pour la convection forcée, on peut déterminer un coefficient d'échange en convection naturelle pour les deux faces :

$$h_{conv,nat,face} = \frac{Nu_{nat,conv,face} \cdot k_a}{L} \quad (2.25)$$

Finalement, le coefficient d'échange total en convection est la somme des coefficients d'échange en convection forcée et naturelle :

$$h_{conv} = h_{conv,force,sup} + h_{conv,force,inf} + h_{conv,nat,sup} + h_{conv,nat,inf} \quad (2.26)$$

Ici, on considère les échanges en convection forcée sur les deux faces identiques ($h_{conv,force,sup} = h_{conv,force,inf}$) et indépendants de la direction du vent. Ceci est une approximation pour alléger les calculs. En réalité, les échanges dépendent du sens de l'écoulement et de la forme géométrique en son sein, où une asymétrie implique directement une différence de coefficient d'échange.

Ce coefficient caractérise l'échange d'énergie globale entre l'air et la surface du module. Le flux convectif total vaut alors :

$$\Phi_{conv} = h_{conv} \cdot S \cdot (T - T_a)$$

Les pertes énergétiques par convection étant déterminée, il convient maintenant de déterminer les pertes par rayonnement.

2.9.2 Estimation des pertes par rayonnement

Contrairement aux phénomènes de convections qui nécessitent d'utiliser des formules empiriques, les échanges par rayonnement sont déterminés par des solutions analytiques. En effet, le flux émis par un corps est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi_{rad,emis} = S.\epsilon.\sigma.T^4 \quad (2.27)$$

où $\sigma = 5.67.10^{-8}$ est la constante de Stefan-Boltzmann. et ϵ est l'émissivité du corps considéré comparée à celle d'un corps noir (pour lequel $\epsilon = 1$).

D'après la loi de Planck, plus la température d'un corps est élevée, plus les longueurs d'ondes présentes dans le rayonnement qu'il émet sont petites. Il faut donc séparer les flux émis par le soleil, qui est à une température d'environ 5500K en surface, et le flux émis par l'atmosphère terrestre et les objets qui nous entourent, à des températures situées autour de la température ambiante, environ 300K. Les pertes par rayonnement ne considèrent que les échanges entre les corps à cette température (grandes longueurs d'ondes) dont font partie les modules PV, tandis que le rayonnement reçu par le soleil (courtes longueurs d'ondes) est déjà considéré dans le terme $\Phi_{entrant}$.

Le flux absorbé par un corps est le produit du rayonnement qu'il reçoit de la part des autres corps et de son absorbance α sur la gamme de longueur d'onde correspondante. Dans le cas des grandes longueurs d'ondes (GLO) :

$$\Phi_{rad,abs} = \alpha_{GLO}.\Phi_{GLO} = S.\alpha_{GLO}.F.\epsilon_{corps}.\sigma.T_{corps}^4 \quad (2.28)$$

où F est le facteur de forme entre les deux corps, qui prend en compte la géométrie de la scène et la manière dont les deux corps se "voient". L'absorbance et l'émissivité d'un corps dépendent donc de la longueur d'onde considérée. D'après la loi de Kirchoff, ces deux grandeurs sont égales pour une même longueur d'onde λ :

$$\alpha_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \quad (2.29)$$

Finalement, on définit les pertes radiatives grâce au flux net, qui est la différence entre le flux émis et le flux absorbé :

$$\Phi_{rad} = \Phi_{rad,emis} + \Phi_{rad,abs} \quad (2.30)$$

Dans les conditions du protocole expérimentales, les modules sont inclinés de seulement 30 degrés par rapport à l'horizontale. On suppose donc que les deux principaux corps avec qui ils échangent sont le ciel et le sol.

$$\Phi_{rad} = \Phi_{ciel} + \Phi_{sol} \quad (2.31)$$

Les modules sont disposés à environ 1 m au dessus du sol, qui a une taille très grande devant la leur. Ce rapport de taille implique que l'ensemble de la face arrière voit le sol, permettant de poser un facteur de forme égal à 1. En suivant le même raisonnement avec la taille de la voûte céleste, on pose que le facteur de forme entre la face avant et le ciel vaut également 1. Ainsi, en appliquant la loi de Kirchoff, le flux net échangé avec le ciel vaut :

$$\Phi_{rad,ciel} = \Phi_{emis,ciel} - \Phi_{abs,ciel} \quad (2.32)$$

$$= S.\epsilon_c.\sigma.T^4 - S.\alpha.\epsilon_{ciel}.\sigma.T_{ciel}^4 \quad (2.33)$$

$$= S.\sigma.\epsilon_c.(T^4 - \epsilon_{ciel}.T_{ciel}^4) \quad (2.34)$$

2.9 Construction d'un modèle thermique dynamique pour comparer avec les mesures expérimentales

où ϵ_c est l'émissivité de la couche d'encre à la surface de la face supérieure (mesurée).
Le résultat concernant le flux échangé avec le sol est de la même forme :

$$\Phi_{sol} = \Phi_{emis,sol} - \Phi_{abs,sol} \quad (2.35)$$

$$= S.\epsilon_t.\sigma.T^4 - S.\alpha.\epsilon_{sol}.\sigma.T_{sol}^4 \quad (2.36)$$

$$= S.\sigma.\epsilon_t.(T^4 - \epsilon_{sol}.T_{sol}^4) \quad (2.37)$$

où $\epsilon_t = 0.9$ est l'émissivité de la surface inférieure, en Tedlar®.

Finalement, le flux radiatif total vaut :

$$\Phi_{rad} = \Phi_{rad,ciel} + \Phi_{rad,sol} \quad (2.38)$$

$$= S.\epsilon.\sigma.T^4 - S.\alpha.\epsilon_{ciel}.\sigma.T_{ciel}^4 + S.\epsilon.\sigma.T^4 - S.\alpha.\epsilon_{sol}.\sigma.T_{sol}^4 \quad (2.39)$$

$$= S.\sigma.(T^4 - \epsilon_{ciel}.T_{ciel}^4) + S.\epsilon_t.(T^4 - \epsilon_{sol}.T_{sol}^4) \quad (2.40)$$

Le sol étant du gazon, son émissivité est choisie à $\epsilon_{sol} = 0.85$. Sa température est choisie égale à la température de l'air. Quant au ciel, sa température et son émissivité dépend fortement de la nébulosité à l'instant t. Les mesures étant observées par journée ensoleillée, l'émissivité vaut $\epsilon_{ciel} = 0.91$. Pour la température, on utilise la formule empirique suivante [58] :

$$T_{ciel} = 0.0552.T_a^{1,5} \quad (2.41)$$

Finalement, le bilan donne :

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t}(t) = (1 - R).E(t).S - P_{mes}(t) - \Phi_{conv}(t) - \Phi_{rad}(t) \quad (2.42)$$

La part d'énergie réfléchi, qui dépend de l'angle d'incidence et la position du soleil dans le ciel, peut être estimée en croisant les résultats de performance en conditions standards et ceux obtenus en conditions réelles.

2.9.3 Détermination des pertes en réflexion en conditions réelles via les mesures de puissances délivrées

Du fait de l'angle d'incidence et du déplacement du soleil dans le ciel, les pertes énergétiques par réflexion sont plus importantes que dans les conditions standards de test, où l'irradiance arrive de manière perpendiculaire au module. De plus, les pertes dues à l'échauffement du module sont à considérer par rapport à la température de test qui est de 25°C. Ainsi, la comparaison du rendement en conditions extérieures par rapport au rendement en conditions de test permet d'évaluer ces pertes.

$$P_{ext} = (1 - R(\theta)).(1 - \alpha_v).\eta_{cell}.GNI.S.(1 - \beta.(T - 25))$$

$$P_{STC} = (1 - R(0^\circ)).(1 - \alpha_v).\eta_{cell}.GNI.S$$

$$1 - R(\theta) = \frac{P_{ext}}{P_{STC}.(1 - \beta.(T - 25))} \quad (2.43)$$

2.9.4 Résolution discrète de l'équation de la chaleur en régime dynamique

Pour être résolu numériquement, cette équation est discrétisée dans le temps selon les points de mesure :

$$C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = (1 - R).E.S - P_{mes} - \Phi_{conv} - \Phi_{rad}$$

$$\Delta T = \frac{\Delta t}{C_p} \cdot [(1 - R).E.S - P_{mes} - \Phi_{conv} - \Phi_{rad}]$$

En discrétisant sur chaque pas de temps $\Delta t = 60s$ tel que $\Delta T = T(t\Delta t) - T(t)$, on obtient :

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \frac{\Delta t}{C_p} \cdot (1 - R).E.S - P_{mes} - \Phi_{conv}(t) - \Phi_{rad}(t) \quad (2.44)$$

Pour fonctionner, la résolution nécessite d'implémenter une valeur initiale $T(t_0)$. La nuit, les modules restent à une température située autour de la température de l'air. On initialise donc la première telle que $T(t_0) = T_a(t_0)$ où t_0 correspond aux instants précédents le lever du soleil. De cette manière, le comportement en température des modules peut être modélisé pour chaque journée.

2.10 Conclusion du chapitre 2

Des moyens expérimentaux et théoriques sont mis en œuvre pour tenter de comprendre les phénomènes physiques qui interviennent au sein de modules PV possédant une face avant imprimée et colorée à l'aide d'émaux céramiques. Les résultats seront analysés et interprétés d'un point de vue énergétique et colorimétrique dans les chapitres suivants, de manière à identifier les paramètres à optimiser dans une application BIPV.

3 Évaluation énergétique des encres céramiques pour la performance solaire

L'étude de la performance des modules PV consiste principalement en l'analyse de données des mesures de la courbe I-V, c'est-à-dire l'évolution du courant délivré en fonction de la tension appliquée à ses bornes. L'élévation en température d'un module ayant un impact sur sa performance, son impact dans le cas de l'utilisation de verre imprimé est également étudié. Une étude de vieillissement aux rayons UV de modules monocellulaires sera également présentée. Le courant délivré par le module PV dépend de l'énergie solaire qui atteint la cellule. Il dépend donc de la nature des milieux que la lumière a traversé en amont, dont le verre imprimé. On s'intéresse donc d'abord aux caractéristiques optiques des encres utilisées par l'imprimante.

3.1 Les encres céramiques : des milieux hétérogènes et diffusants

Les encres céramiques sont fabriquées en mélangeant des pigments et une base de particules de silices broyées, appelée la fritte (figure 3.1).

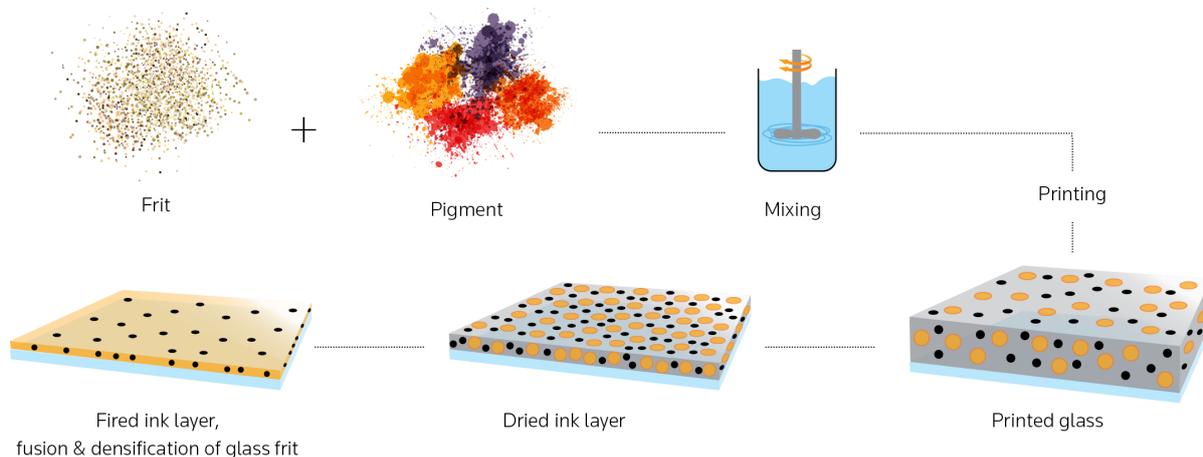


FIGURE 3.1 – Procédé de mélange, de séchage et de cuisson des encres céramiques sur verre [59]

La fritte comporte généralement des additifs pour améliorer la résistance du mélange, baisser son point de fusion ou encore pour rendre plus brillant le verre final. L'ensemble est ensuite plongé dans un solvant afin d'obtenir une encre avec des propriétés rhéologiques et une mouillabilité précises. L'encre est ensuite pulvérisée sur le verre par les buses de l'imprimante, avant d'être rapidement séchée par des jets d'air. Ceci a pour effet de faire évaporer les solvants et

diminuer l'épaisseur de la couche déposée. Enfin, le verre imprimé subit une cuisson, ayant pour effet de densifier la couche et de la faire fusionner avec la surface du verre. L'ensemble est ensuite figé définitivement en procédant à une trempe thermique.

Des fragments de verre imprimés avec les encres de base de l'imprimante sont observées grâce à un microscope électronique à balayage (MEB) figure 3.2.

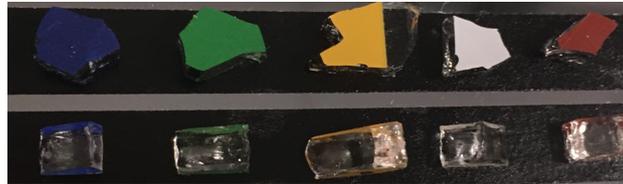


FIGURE 3.2 – Fragments de verres imprimés. En haut : analyse des composés chimiques en surface ; en bas : observation et mesure de l'épaisseur

L'analyse chimique des composés donne ainsi des indications quant aux concentrations de ceux-ci dans le mélange et leurs indices de réfraction.

3.1.1 Composition chimique des dépôts d'encre

Le Microscope électronique à balayage (MEB) permet de déterminer les éléments chimiques via l'analyse de rayons X émis par la surface des encres. Il apparaît la présence de bismuth, de silicium, d'oxygène, de sodium et d'aluminium, ainsi qu'un élément différent pour chaque encre, qui correspond au pigment. La silice SiO_2 est la molécule principale du verre, très souvent mélangée avec du dioxyde de sodium Na_2O , jouant un rôle de fondant, c'est-à-dire pour abaisser la température de fusion du mélange lors de la fabrication. L'alumine Al_2O_3 est utilisée comme additif pour accroître la résistance à l'eau. Aujourd'hui, le bismuth est utilisé en remplacement du plomb (toxique), rendant le verre plus lumineux, plus dense et abaissant davantage le point de fusion du mélange [60].

Élément	Masse (u)	Rouge	Vert	Jaune	Bleu	Blanc
Bi	208,98	34,8%	34,5%	34,1%	30,3%	32,7%
O	15,99	28,4%	33,1%	33,5%	31,4%	33,2%
Si	28,09	10%	9,7%	10,1%	8,5%	9,7%
C	12,01	9,1%	10,3%	12%	11,2%	8,5%
Na	22,99	2,9%	2,8%	3,1%	3,1%	2,9%
Al	26,98	0,8%	0,9%	0,8%	9,2%	1%
Ti	47,87	/	3,1%	6,4%	/	12%
Co	58,93	/	/	/	6,3%	/
Fe	55,84	14,1%	/	/	/	/
Ni	58,69	/	3,2%	/	/	/
Zn	65,38	/	2,6%	/	/	/

TABLE 3.1 – Fractions massiques des éléments chimiques détectés dans les encres de base

Les pigments utilisés sont le dioxyde de fer Fe_2O_3 pour le rouge, l'aluminate de cobalt Al_2CoO_4 pour le bleu, le dioxyde de titane TiO_2 pour le blanc, le jaune et le vert, dans lequel sont ajoutés les dioxydes de zinc et de nickel ZnO et NiO . Quant à l'élément Carbone, il provient probablement de restes non évaporés de la bismutite $Bi_2(CO_3)O_2$ après la trempe. Dans la cuisson des émaux, les métaux utilisés pour les pigments sont souvent introduits sous forme de carbonates. Lors du processus, le carbone s'échappe et les métaux se retrouvent sous forme d'oxydes. Dans le cas de l'impression céramique sur verre, les émaux sont cuits, séchés puis subissent une trempe thermique. Celle-ci constitue une variation très rapide de température (choc thermique) et il est possible que l'ensemble du carbone n'ait pas le temps de s'échapper. Il peut également s'agir de matière organique déposée à la surface par un opérateur. L'importante quantité de Bismuth présente pour chaque encre montre qu'il constitue un élément de base du mélange accompagnant les pigments. Après cuisson, les éléments peuvent former du silicate de bismuth $Bi_{12}SiO_{20}$ (indice de réfraction 2,5).

3.1.2 Observation des couches d'encre au microscope électronique à balayage

Le MEB permet d'observer la surface d'un échantillon grâce aux interactions entre électrons et matière. Il possède une sonde électronique qui projette un faisceau d'électrons vers la surface à analyser, qui réagit en réémettant des électrons de différentes natures. En particulier, les électrons rétro diffusés renseignent sur le type d'atome présent. Plus l'atome est lourd, et plus les électrons rétrodiffusés seront nombreux. Ainsi, après amplification des signaux électroniques reçus et reconstitution des images, on peut discerner les frontières entre différents matériaux suivant les différences d'énergies captées. Les zones les plus claires correspondant aux zones les plus concentrées en atome lourd, tandis que les zones les plus sombres en sont les zones les moins concentrées. Selon les analyses chimiques, les atomes les plus lourds sont les métaux

utilisés dans les pigments sous formes d'oxydes, et le bismuth, présent dans le mélange vitreux commun à toutes les encres.

Les encres sont observées en vue de dessus et en coupe, sur la tranche. Cette dernière permet également de mesurer les épaisseurs des couches. Les photographies concernant l'encre verte sont présentées figure 3.3.

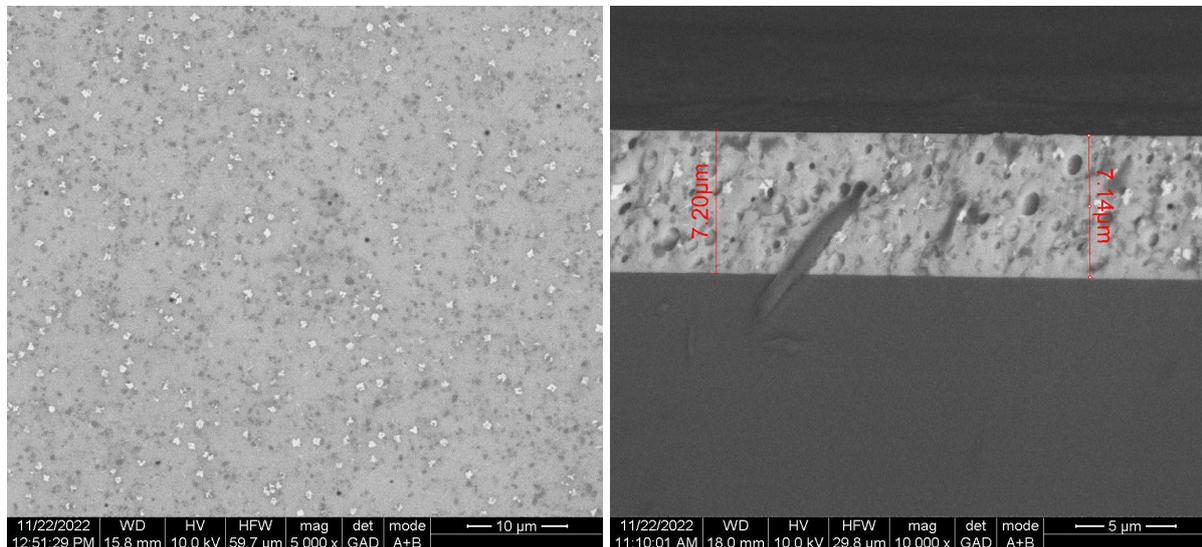


FIGURE 3.3 – Photographies au MEB de l'encre verte ; A gauche, vue de dessus ; A droite, vue en coupe

L'encre verte montre un certain nombre d'agglomérats blancs au sein d'un mélange gris clair, avec quelques taches formant des nuages assombrissants. Les agglomérats blancs ont des tailles allant de 0.1 à 0.6 μm, avec des géométries variables. Enfin, on peut distinguer quelques rares taches très sombres d'environ 0.5 μm. Sur la vue en coupe, on retrouve ces agglomérats clairs, accompagnés de certaines cavités, qui pourraient correspondre aux taches très sombres observées en surface.

Les photographies concernant l'encre rouge sont présentées figure 3.4.

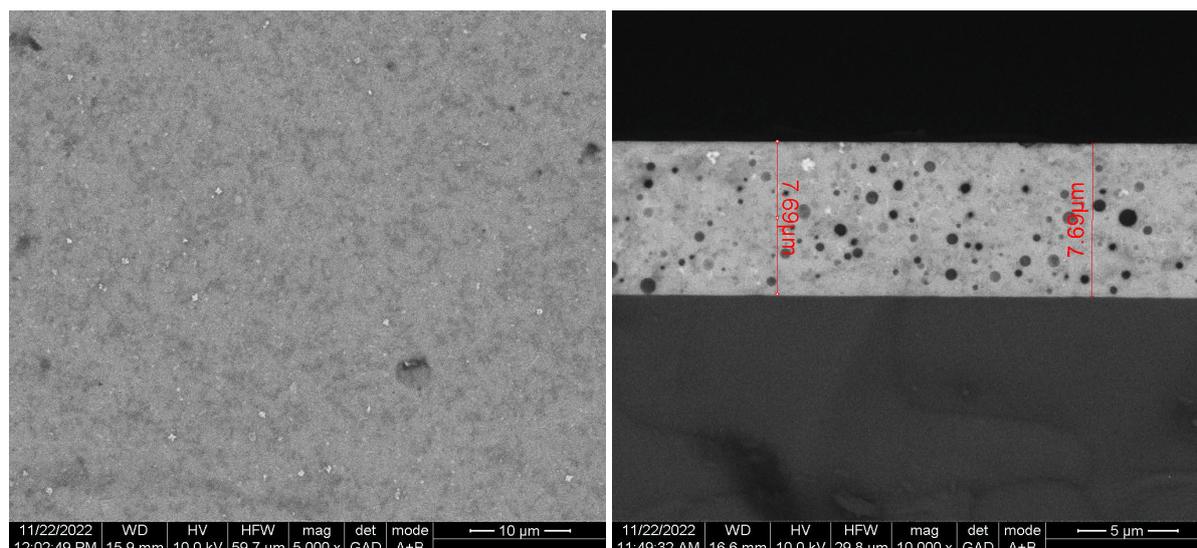


FIGURE 3.4 – Photographies au MEB de l'encre rouge ; A gauche, vue de dessus ; A droite, vue en coupe

La vue de dessus de l'encre rouge nous montre également la présence d'agglomérats clairs en plus petites quantités, et au sein d'un mélange d'une couleur plus homogène que l'encre verte. La vue en coupe permet de se rendre compte des mêmes observations, avec une forte présence des cavités précédemment observées, ayant des formes très sphériques comme des "bulles". On peut également souligner que ce caractère poreux semble plus important dans l'encre rouge que dans l'encre verte. Ces images permettent de se rendre compte de la répartition spatiale des oxydes métalliques utilisés dans les pigments. Dans le cas de l'encre rouge, il s'agit de l'oxyde de fer. Ces agglomérats ont des tailles qui varient entre 0.3 et 0.8 μm .

Les photographies de l'encre jaune sont présentées figure 3.5.

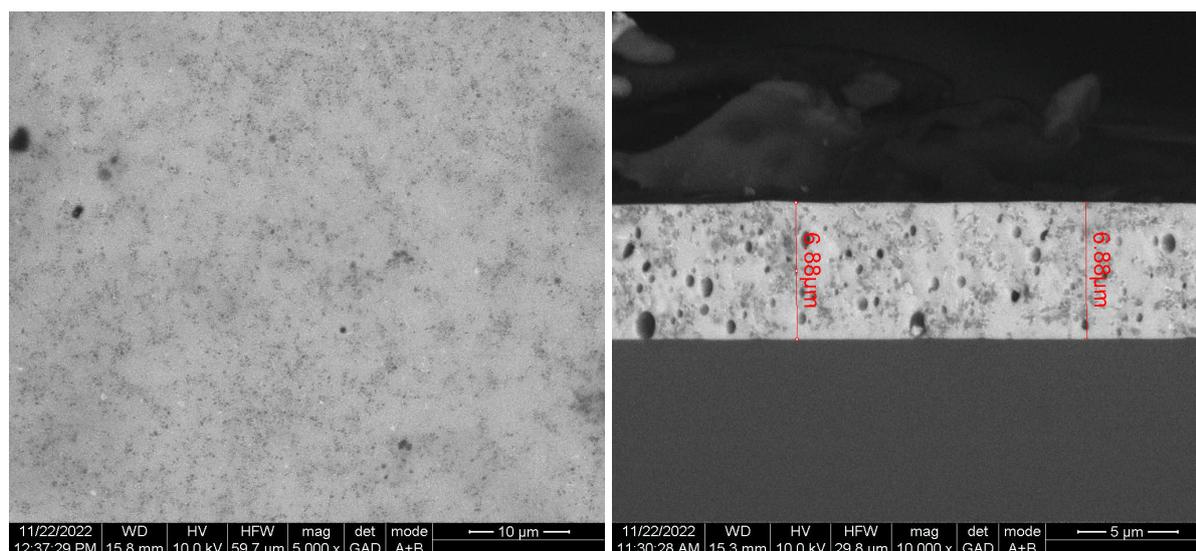


FIGURE 3.5 – Photographies au MEB de l'encre jaune ; A gauche, vue de dessus ; À droite, vue en coupe

Concernant l'encre jaune, on distingue peu de variations de tons, où de très fines taches noires forment des nuages assombrissant un mélange gris clair. C'est un mélange homogène comme l'encre rouge, mais globalement plus clair. Seuls quelques agglomérats clairs peuvent être distingués en bas à gauche de la vue de dessus. La vue en coupe permet d'observer de nouveau les cavités sphériques et une porosité qui semble moins importante que dans l'encre rouge, mais plus importante que dans l'encre verte.

Les photographies concernant l'encre bleue sont présentées figure 3.6.

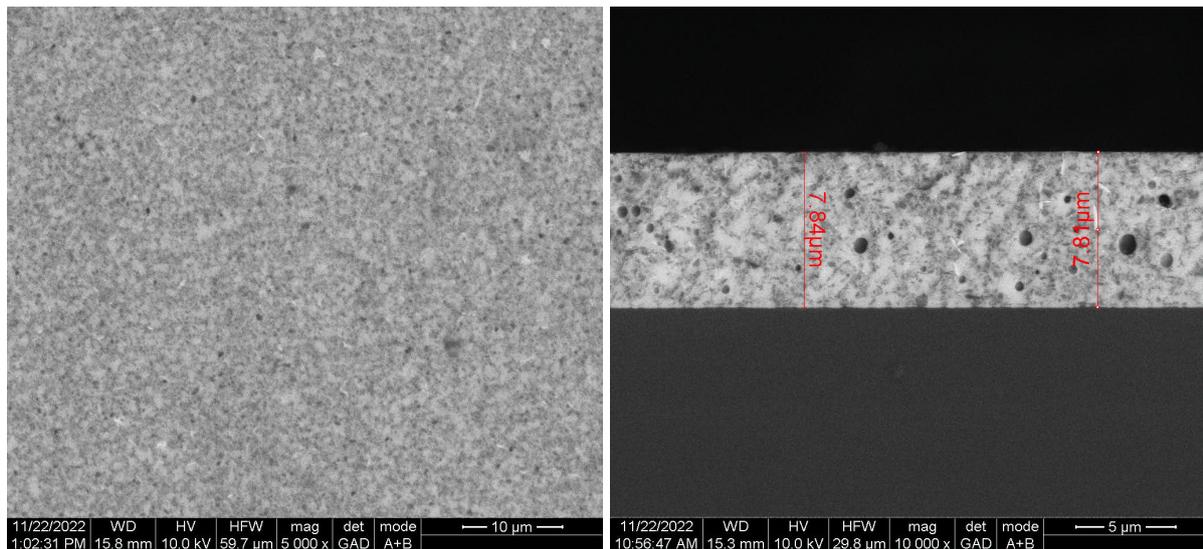


FIGURE 3.6 – Photographies au MEB de l'encre bleue ; A gauche, vue de dessus ; A droite, vue en coupe

L'encre bleue montre un mélange globalement plus sombre, ou un fond gris foncé est parsemé de taches plus claires. Aucun agglomérat clair n'est observé. La forte présence de ces taches sombres est également observée sur la vue en coupe, où des cavités sphériques sont de nouveaux observées, mais en plus petite quantité que dans les encres précédentes.

Les photographies concernant l'encre blanche sont présentées figure 3.7.

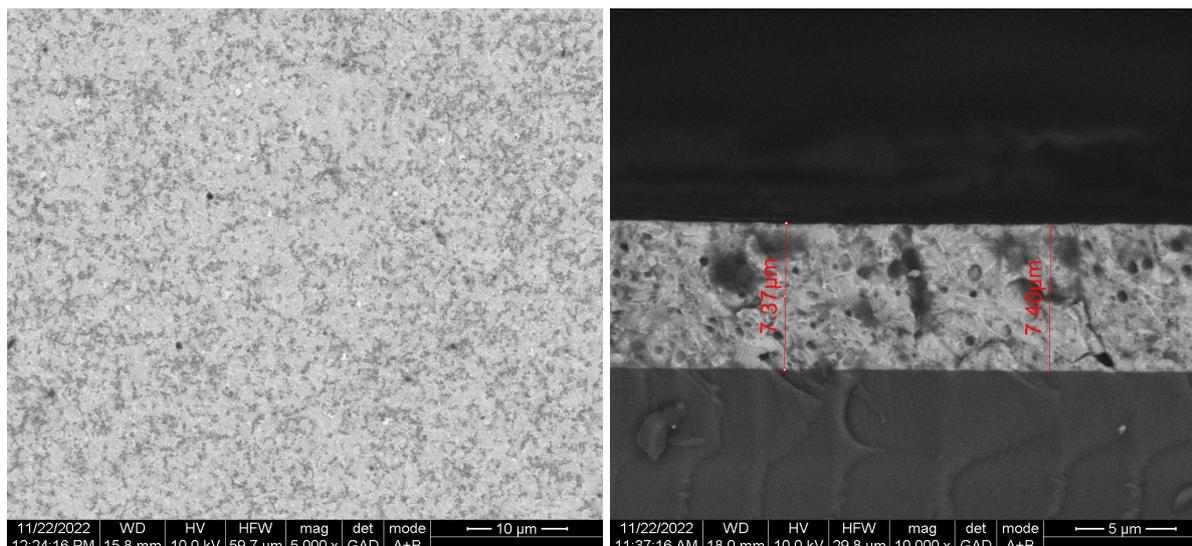


FIGURE 3.7 – Photographies au MEB de l’encre blanche ; A gauche, vue de dessus ; A droite, vue en coupe

Quant à l’encre blanche, c’est une répartition équilibrée de tâches gris clair et gris foncé qui forment une couleur globale plutôt homogène. Quelques agglomérats clairs peuvent être aperçus, comme dans l’encre jaune. La vue en coupe permet d’observer cette structure.

Les mesures des épaisseurs des encres sont différentes : 7,7 µm pour le rouge, 7,2 µm pour le vert, 7 µm pour le jaune, 7,8 µm pour le bleu et 7,5 µm pour le blanc, avec des variations de 0,1 µm dus à la rugosité de la surface supérieure. Ces variations peuvent s’expliquer par la position des fragments qui n’est pas strictement perpendiculaire à l’axe optique. Le fabricant annonçait un dépôt de 40 µm avant trempe thermique et séchage. Il semble donc que les solvants, qui servent à appliquer correctement l’encre sur la surface avant de s’évaporer, représentent une partie importante du volume (environ 80%).

Les structures internes des encres montrent des hétérogénéités, comme des cavités sphériques ou des bulles d’air, allant de 0,1 µm à 1,5 µm de diamètre dans le cas du rouge, leur donnant un caractère diffusant. L’effet diffusant dépend de la taille des hétérogénéités devant la longueur d’onde considérée, mais également de leur concentration. D’un endroit à un autre d’une même encre, la répartition des hétérogénéités ainsi que leurs tailles varient. Il y a donc des variations de structures à différentes échelles au sein de ces milieux. Ces changements de taille et de concentration observés dans ces encres fait apparaître d’importantes difficultés à modéliser le comportement de la lumière dans ce genre de milieu. Des méthodes statistiques peuvent aider à estimer les impacts des différents éléments.

3.1.3 Mélanges réalisés par l’imprimante dans les dépôts d’encres

Les quantités d’encres de base utilisée par l’imprimante suivant la couleur d’entrée a pu être partagé par le fournisseur verrier (figure 3.8).

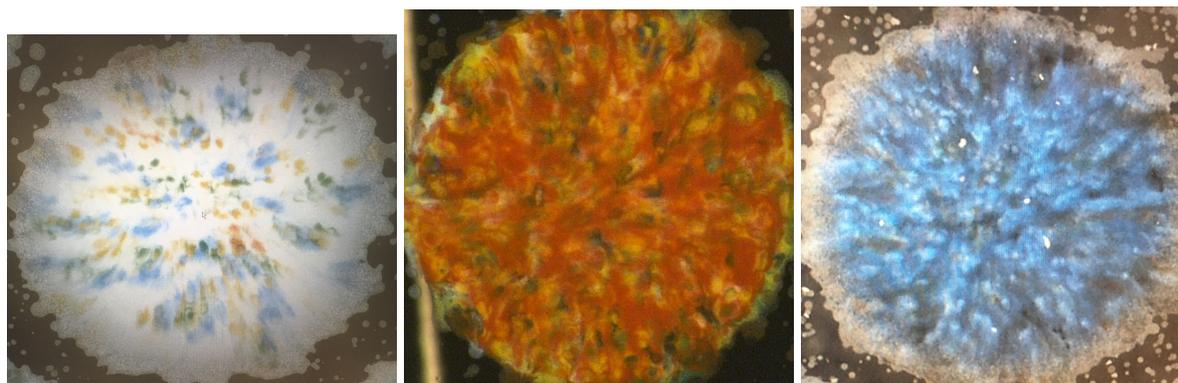
Couleur												
RGB	122,75,33	149,84,29	167,103,38	255,0,0	0,255,0	0,0,255	251,0,7	35,255,7	0,4,255	255,37,0	7,249,0	4,51,255
Bleu	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
Rouge	91%	88%	71%	50%	0%	15%	51%	0%	15%	49%	0%	14%
Jaune	74%	87%	95%	15%	22%	0%	15%	23%	0%	18%	22%	0%
Noir	13%	3%	0%	0%	0%	6%	0%	0%	6%	0%	0%	6%
Vert	29%	18%	17%	0%	76%	0%	0%	75%	0%	0%	78%	0%
Blanc	32%	37%	44%	29%	58%	11%	29%	62%	4%	38%	57%	23%

FIGURE 3.8 – Mélange des couleurs de base réalisée par l’imprimante en fonction de la couleur demandée

Le pourcentage affiché correspond au taux d’ouverture de chaque buse. Le système de coordonnées RGB permet de réaliser des mélanges par combinaisons linéaires des vecteurs de base rouge (255,0,0), vert (0,255,0) et bleu (0,0,255). La valeur maximum d’un vecteur peut être comprise entre 0 et 1, 0 et 100 ou bien 0 et 255, qui correspondent au nombre de bits maximum présents dans un ordinateur. Le vecteur de base rouge, qui correspond au rouge le plus saturé possible, est réalisé grâce à un mélange de rouge ouvert à 50 %, de jaune ouvert à 15% et de blanc ouvert à 29%. Le vecteur de base vert est lui réalisé grâce à un mélange de jaune ouvert à 22%, de vert ouvert à 76% et de blanc ouvert à 58%, tandis que le vecteur de base bleu est réalisé avec un mélange de bleu ouvert à 100%, de rouge ouvert à 15%, de blanc ouvert à 11% et de noir ouvert à 6%. Dans le cas de plusieurs tons de marron, la couleur est réalisée à l’aide de 5 couleurs de base, une majorité de rouge et de jaune, du blanc, du vert et du noir. Pour une application BIPV, l’utilisation de l’encre noire est contre-productive, car elle absorbe beaucoup d’énergie alors que la couleur des cellules présentes en arrière-plan est déjà noire. De plus, la théorie de la colorimétrie indique qu’une couleur peut être réalisée avec seulement 3 couleurs de base. Pourtant, la réalisation des couleurs marrons en utilise 4 voire 5 (voir figure 3.8).

3.1.4 Observation des dépôts d’encres mélangées au microscope Keyence

Des images de certaines couleurs imprimées, qui sont des mélanges des couleurs de base, sont observées au microscope Keyence. En particulier, des disques appartenant à un motif tramé, sont montrées figure 3.9.



(a) Point d'une trame de couleur Papyrus White (RAL 9018) de diamètre 1 mm (b) Point d'une trame de couleur terracotta (RAL 8029) de diamètre 1 mm (c) Point d'une trame de couleur Pigeon Blue (RAL 5014) de diamètre 1 mm

FIGURE 3.9 – Vue de différents mélanges de couleurs imprimés au microscope Keyence

Par exemple, on voit que le blanc "Papyrus White" (RAL 9018), est composé sans surprise d'une majorité de blanc, mais également de petites quantités de bleu, de vert, de jaune, et même de rouge, en quantité plus infime encore. L'encre noire ne semble pas être utilisée. Celle-ci est cependant utilisée dans les couleurs "terracotta" (RAL 8029) et "Pigeon Blue" (RAL 5014). Dans le premier, on observe majoritairement du rouge, du noir, ainsi qu'un peu de blanc et de jaune. Dans le deuxième, majoritairement du bleu, du noir et du blanc, qui est plus forte présence tout autour du disque. Ce détail montre que l'encre blanche a été appliquée avant l'encre bleue. En effet, celle-ci est si transparente que les verriers imprime d'abord de l'encre blanche pour obtenir un éclat plus important et une couleur plus présente. Le fait que le disque blanc soit plus large que le disque bleu peut être volontaire, pour éviter un étalement plus important lorsque des couches d'encres sont superposées. Ce phénomène peut être le résultat d'une mouillabilité différente des encres sur le verre, ou bien d'une mouillabilité différente lorsque appliquée sur une autre encre plutôt que sur le verre.

L'étude de l'état de surface dans l'impression de trames permet d'imaginer comment sont appliquées les encres.

3.1.5 Géométrie de surface des dépôts d'encre

Des images 3D de la surface de motifs tramés sont montrées figure 3.10. Les profils altimétriques montrent que les encres coulent comme des "dunes", ou des "bosses". Ainsi, la distance entre les creux et les sommets peut valoir moins de 1 mm et atteindre 2 mm.

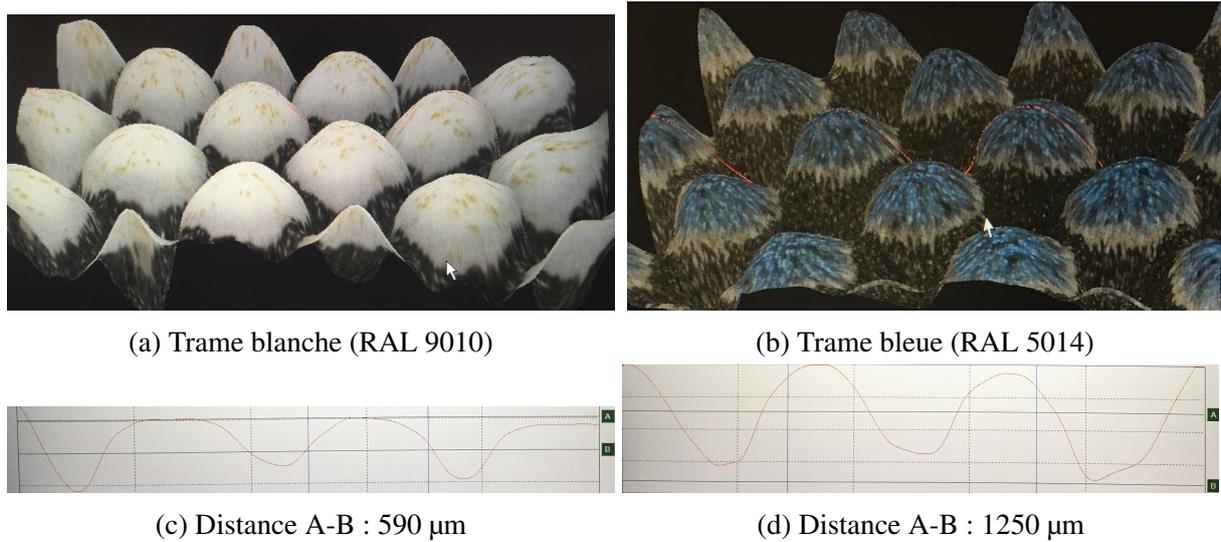


FIGURE 3.10 – Vue 3D de l'état de surfaces de trames au microscope Keyence

Ces géométries peuvent avoir un impact sur la réflectance aux interfaces, que ce soit du côté concave ou du côté convexe de ces "bosses", et ainsi jouer sur la quantité d'énergie transmise finalement à la cellule PV en fonction du placement de l'encre à l'extérieur ou à l'intérieur. Dans ce dernier cas, cette rugosité peut également impacter la tenue mécanique des encapsulants et donc la cohésion de l'ensemble de l'empilement.

Les éléments présents et les géométries observées rendent compte du caractère hétérogène et diffusant de ces milieux. Pour appréhender leurs interactions avec la lumière, des notions d'optiques théoriques doivent être présentées.

3.1.6 Optique théorique des milieux diffusants

La lumière est une onde électromagnétique. Elle se propage en ligne droite dans les milieux homogène comme le vide, l'air ou l'eau, mais subit des effets de réfraction et de diffusion lorsqu'elle évolue au sein d'un milieu composé de plusieurs entités.

3.1.6.1 Propagation de la lumière dans un milieu homogène

L'indice de réfraction complexe \underline{n} d'un milieu permet d'appréhender le comportement de la lumière en son sein. Il est décrit selon la formule :

$$\underline{n} = n + i\kappa \quad (3.1)$$

La partie réelle n quantifie la vitesse de l'onde v dans ce milieu par rapport à la vitesse de la lumière dans le vide c tel que $n = \frac{c}{v}$, tandis que la partie imaginaire κ décrit le phénomène d'extinction de l'énergie de l'onde au fur et à mesure de son déplacement dans le milieu. La loi de Beer-Lambert montre que l'intensité I , qui est l'énergie présent dans l'onde, décroît exponentiellement en fonction de la profondeur z et du coefficient d'extinction α tel que

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (3.2)$$

où

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda} \kappa \quad (3.3)$$

La quantité d'énergie absorbée par un substrat augmente ainsi avec son épaisseur. Plus le composé est épais, moins l'énergie est transmise. Certains milieux sont très peu absorbants pour certaines longueurs d'ondes. C'est le cas de l'air ou du verre dans le visible. Ils sont donc transparents et ont un coefficient d'extinction très proche de 0 dans cette gamme de longueurs d'onde. D'autres absorbent davantage certaines parties du spectre solaire, leur donnant une certaine opacité ainsi qu'une couleur, comme l'ensemble des peintures, encres ou émaux. Celles utilisées dans l'impression céramique sur verre sont donc étudiées pour déterminer de quel type de milieu elles font partie.

3.1.6.2 Phénomènes optiques aux interfaces entre deux milieux

Lorsque la lumière change de milieu, une partie de l'énergie est transmise avec un angle θ_2 différent de l'angle d'incidence θ_1 . Ce phénomène s'appelle la réfraction et est décrite par la loi de Descartes :

$$\underline{n}_1 \cdot \sin(\theta_1) = \underline{n}_2 \cdot \sin(\theta_2) \quad (3.4)$$

Le reste de l'énergie est réfléchi à la surface suivant le même angle que l'angle d'incidence (seconde loi de Descartes). Cette quantité dépend de la polarisation de la lumière, de l'angle d'incidence et des indices de réfraction des deux milieux. Dans le cas d'une lumière non polarisée, on considère une moyenne des deux types de polarisation (transverse électrique et transverse magnétique) et la réflectance de l'interface vaut :

$$\rho_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{n}_1 \cdot \cos(\theta_1) - \underline{n}_2 \cdot \cos(\theta_2)}{\underline{n}_1 \cdot \cos(\theta_1) + \underline{n}_2 \cdot \cos(\theta_2)} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{n}_2 \cdot \cos(\theta_1) - \underline{n}_1 \cdot \cos(\theta_2)}{\underline{n}_2 \cdot \cos(\theta_1) + \underline{n}_1 \cdot \cos(\theta_2)} \right)^2 \quad (3.5)$$

En particulier, à incidence normale, on a $\theta_1 = 0 = \theta_2$ et la réflectance vaut :

$$\rho_{1,2}(0^\circ) = \left(\frac{\underline{n}_1 - \underline{n}_2}{\underline{n}_1 + \underline{n}_2} \right)^2 \quad (3.6)$$

Plus la différence d'indice entre les deux milieux est grande, et plus l'énergie réfléchi est importante. Dans un milieu homogène, comme l'air ou l'eau, la lumière se déplace en ligne droite et la distance parcourue est minimisée. Dans un milieu hétérogène, ou différentes phases et composés cohabitent, comme des gouttes d'eau en suspension dans l'air, les nombreuses variations d'indice de réfraction entraînent de multiples réflexions et l'onde est diffusée.

3.1.6.3 Propagation de la lumière dans les milieux diffusants et la théorie de Mie

Lorsque les milieux diffusent la lumière, la distance parcourue par les rayons devient plus importante en leur sein, augmentant ainsi la probabilité de se faire absorber. On dit que la diffusion augmente le chemin optique augmente et contribue donc davantage au phénomène d'extinction. Il existe une adaptation de la loi de Beer-Lambert qui considère une part de diffusion s dans le coefficient d'extinction tel que $\kappa = a + s$ où a est le coefficient d'absorption du milieu. Dans ce modèle, la transmittance globale du milieu d'épaisseur z vaut :

$$T(z) = \exp[-\alpha \cdot z] = \exp\left[-\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \kappa \cdot z\right] = \exp\left[-\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (a + s) \cdot z\right] \quad (3.7)$$

A chaque rencontre avec une hétérogénéité, une partie de l'énergie est réfléchi derrière le plan d'incidence. Cet effet dépend du rapport entre la taille de l'hétérogénéité et la longueur d'onde considérée.

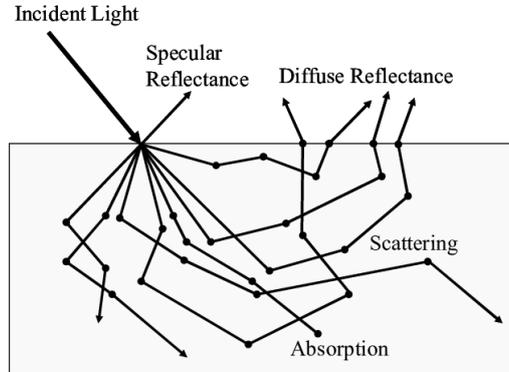


FIGURE 3.11 – Illustration de l'action diffusante d'un milieu hétérogène [61]

La diffusion des ondes électromagnétiques lorsque les particules sont supposées sphériques est décrite par la théorie de Mie [62]. Celle-ci permet d'évaluer la quantité d'énergie qui est diffusée en fonction d'un paramètre x appelé rapport de taille :

$$x = \frac{2\pi \cdot r \cdot n_1}{\lambda} \quad (3.8)$$

où r est le rayon de la particule, n l'indice de réfraction du milieu et λ la longueur d'onde.

On définit la puissance diffusée $P_{diff}(W)$ comme le produit de l'éclairement incident $E(W/m^2)$ et de la section efficace de diffusion $\sigma_{diff}(m^2)$:

$$P_{diff} = \sigma_{diff} \cdot E \quad (3.9)$$

Cette section définit la quantité de puissance diffusée selon un éclairement donné. Elle permet donc de quantifier la qualité de la diffusion. On peut ainsi définir une efficacité de diffusion Q_{diff} en comparant sa valeur à la section occupée par la particule, c'est-à-dire la projection orthogonale de son volume sur le plan d'incidence (son ombre). Dans le cas d'une particule sphérique, cette section vaut $\pi \cdot a^2$. Ainsi, l'efficacité de diffusion vaut :

$$Q_{diff} = \frac{\sigma_{diff}}{\pi \cdot r^2} = \frac{1}{\pi \cdot r^2} \cdot \frac{P_{diff}}{E} \quad (3.10)$$

L'efficacité de diffusion en fonction du paramètre de taille x est tracée figure 3.12 pour un rapport d'indice $m = 1.33$, ce qui correspond à des particules d'indices de réfraction $n_2 = 2$ dans un milieu de type verre d'indice $n_2 = 1.5$. Le profil est également présenté selon une échelle logarithmique, permettant d'observer que pour $x < 1$, la diffusion peut être approximée par un monôme d'ordre 4 selon la formule :

$$Q_{diff} = \frac{8}{3} \cdot \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \cdot x^4 \quad (3.11)$$

où $m = \frac{n_1}{n_2}$ est le rapport d'indice entre les deux milieux. On appelle ce mode la diffusion de Rayleigh et constitue un cas particulier de la diffusion de Mie [62]. Après une importante

croissance atteignant la valeur de 4 pour $x \approx 2$, l'efficacité de diffusion montre des figures d'interférences convergentes au voisinage de 2, tel un oscillateur amorti. On peut ainsi séparer le domaine spectral en trois parties :

- $x \ll 1$: domaine de la Diffusion Rayleigh
- $x \approx 1$: domaine de Mie pour les petites particules (modes de résonances)
- $x \gg 1$: domaine de Mie pour les grosses particules (convergence amortie)

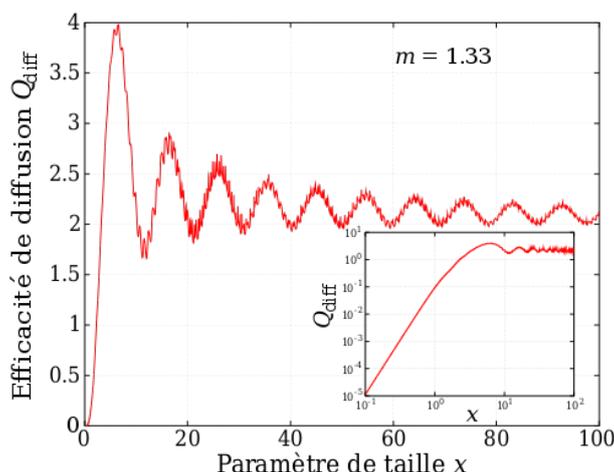


FIGURE 3.12 – Efficacité de diffusion en fonction du paramètre de taille x pour un rapport d'indice valant 1.33 [62]. En bas à droite, le profil est tracé suivant un profil logarithmique pour mettre en évidence l'évolution de la diffusion suivant une puissance 4 dans le domaine de Rayleigh

Si l'un des indices optiques des milieux devient complexe, alors il apparaît un phénomène d'absorption et l'efficacité de diffusion converge cette fois-ci vers 1. Ainsi, plus la partie imaginaire (le coefficient d'absorption) est importante, plus faible est la valeur maximum atteinte par l'efficacité de diffusion et plus rapide est la convergence vers la valeur finale de 1.

La répartition angulaire de l'énergie diffusée par une particule sphérique peut également être déterminée par le calcul et donner des fonctions de phase ou " patrons de réémission " (figure 3.13). en fonction du paramètre de taille. Ils sont représentés avec des flèches de taille proportionnelle à l'énergie diffusée et dans les directions de diffusion correspondantes. Les courbes formées par les extrémités de ces flèches s'appellent des "lobes de diffusion", et permettent de se rendre compte de la répartition de l'énergie vers l'avant ou l'arrière de la direction de propagation. La tendance montre que plus le paramètre x est petit, plus la répartition angulaire est équilibrée (diffusion isotrope) et plus les quantités d'énergie diffusées vers l'avant et l'arrière sont équilibrées. Au contraire, plus le paramètre de taille est élevé, plus la quantité d'énergie diffusée vers l'avant est importante comparée à celle diffusée vers l'arrière. Également, l'angle de diffusion vers l'avant se resserre davantage autour de la direction de propagation tandis que l'angle de diffusion vers l'arrière s'agrandit.

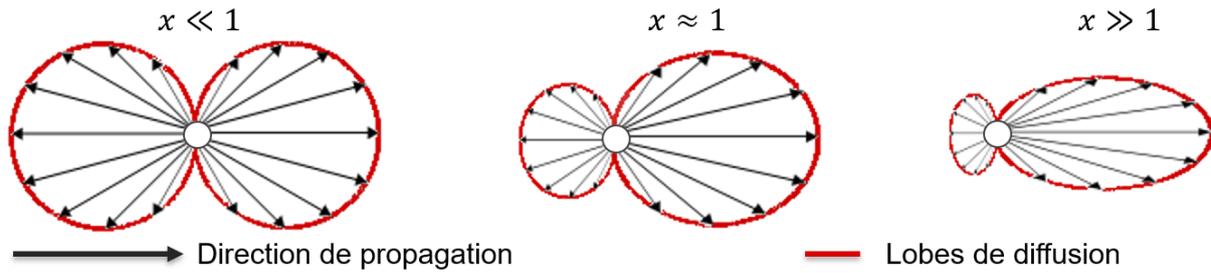


FIGURE 3.13 – Théorie de Mie ; De gauche à droite : la diffusion Rayleigh, la diffusion de Mie pour les petites particules, la diffusion pour les grosses particules (inspiré de [62])

Cette rétrodiffusion (diffusion vers l'arrière) joue donc un rôle important dans la quantité d'énergie mesurée en réflexion. La détermination de la taille des particules et de leurs indices de réfraction aide à évaluer quel type de diffusion a lieu au sein des encres céramiques.

3.1.7 Modes de diffusion mis en jeu au sein des encres

Selon les observations faites au MEB dans les épaisseurs des encres, la taille des hétérogénéités (particules et pores) varie entre 0.1 et 1,5 μm , correspondant à des paramètres de taille allant de 0,12 pour les longueurs d'onde les moins énergétiques (proche infrarouge) à 15 pour les plus énergétiques (ultraviolets). La littérature qui traite de la distribution de la taille des particules dans les émaux pour jet d'encre donne des valeurs comprises entre 0.2 et 0.5 μm . ([63]). Celle-ci doit impérativement être inférieure à la taille de la buse à jet, pour qu'elle ne reste pas bloquée et ne fasse obstruction. Les encres céramiques sont donc spécialement conçues pour l'imprimante avec laquelle elles sont vendues. La taille de ces particules et leur distribution est contrôlée suivant le temps pendant lequel elles sont broyées. Les brevets déposés par Dip-Tech indiquent que leurs encres possèdent des pigments de tailles comprises entre 0.3 et 0.8 μm en moyenne, où dans le meilleur des cas les particules sont de tailles inférieures à 0.55 μm . Selon ces données, le paramètre de taille varie entre 0.5 et 10, laissant cohabiter plusieurs modes de diffusion. De plus, certaines hétérogénéités sont des pigments, quand d'autres sont seulement des cavités. Il y a donc une diversité d'indices de réfraction dans ces milieux. Ainsi, les variations locales d'indices peuvent être importantes.

La complexité des équations qui régissent ces phénomènes (développement multipolaire) limite fortement les possibilités de résolution et de détermination des grandeurs d'absorption et de diffusion de ces milieux. Certains modèles, développés pour des cas limites, permettent de simplifier le problème.

3.1.8 L'approximation de Kubelka-Munk et les coefficients K/S des encres

Le modèle à deux flux développé par Kubelka et Munk permet de réaliser un bilan qui considère la part d'énergie diffusée K et la part d'énergie absorbée S [64]. Le modèle permet de déterminer la réflectance d'une couche d'épaisseur X sur un support de réflectance donnée R_g :

$$R = \frac{1 - R_g \cdot (a - b \cdot \coth(bSX))}{a - R_g + b \cdot \coth(bSX)} \quad (3.12)$$

où $a = 1 + \frac{K}{S}$ et $b = \sqrt{a^2 - 1}$

La surface représentant la réflectance d'un échantillon en fonction du produit de l'épaisseur X et du rapport K/S est présenté figure 3.14.

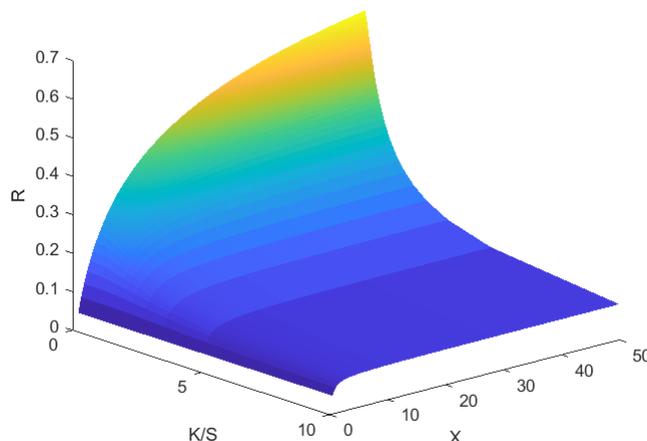


FIGURE 3.14 – Réflectance d'un échantillon en fonction de son épaisseur X et du rapport K/S pour $R_g = 0.05$

Plus K est grand devant S , plus la lumière est absorbée et la réflectance diminue. À l'inverse, si S est grand devant K , alors davantage de lumière est diffusée vers l'arrière et la réflectance augmente. Enfin, quand l'épaisseur X augmente, la réflectance de l'échantillon augmente en convergeant asymptotiquement vers R_∞ . Ce modèle montre que plus l'épaisseur d'un milieu diffusant augmente, plus les parts d'énergie diffusées et absorbées augmentent, jusqu'à une valeur limite d'épaisseur au-delà de laquelle la quantité d'énergie réfléchie ne varie plus [64]. Dans ce cas limite, la formule du bilan est grandement simplifiée :

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2.R_\infty} \quad (3.13)$$

où K est la constante d'absorption par unité de longueur, S la constante de diffusion vers l'arrière par unité de longueur, et R_∞ la quantité de lumière réfléchie par un film d'épaisseur X qui tend vers l'infini. K et S sont ainsi liées par une relation linéaire qui ne dépend que de la valeur de R_∞ .

Ces relations sont à appliquer pour chaque longueur d'onde. Dans le cas de l'application des encres sur un module PV, le but est de maximiser l'énergie transmise. Les épaisseurs étudiées ne sont donc pas proches de la valeur limite à partir de laquelle plus aucune énergie ne traverse la couche. Toutefois, une mesure de la valeur maximum du rapport K/S sur le spectre visible peut être obtenue grâce au colorimètre.

3.1.9 Résultats de mesures des coefficients K/S réalisées avec le colorimètre : comparaison de deux épaisseurs d'encres différentes

Des mesures de la valeur maximum du rapport K/S sont présentées figure 3.15 pour deux épaisseurs différentes : $7 \mu\text{m}$ et $3.5 \mu\text{m}$. Les résultats dépendent du fond présent derrière les échantillons, choisi noir dans le cas de l'étude.

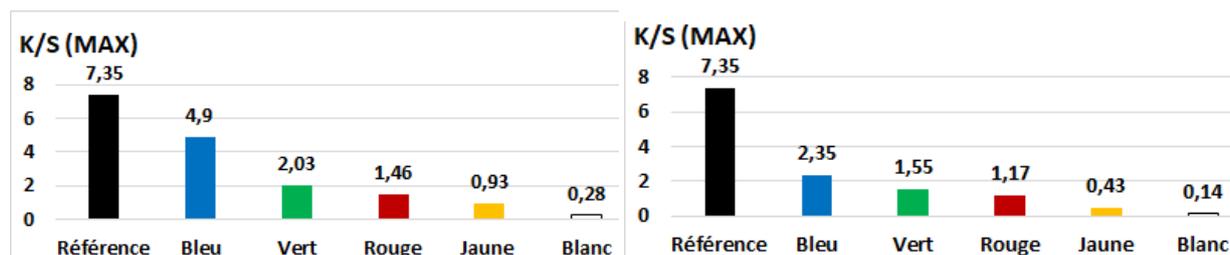


FIGURE 3.15 – Mesures de K/S maximum obtenues avec le colorimètre pour les encres d'épaisseur 3.5 µm (à gauche) et 7 µm (à droite)

Le module de référence, noir, absorbe la quasi-totalité du rayonnement et a donc un rapport K/S maximum très élevé. Au contraire, la très faible valeur de 0.28 concernant le module blanc montre que celui-ci absorbe beaucoup moins la lumière qu'il ne la diffuse. Le module jaune, qui a un rapport proche de 1, absorbe autant qu'il diffuse la lumière. Si on s'intéresse à l'impact de l'épaisseur, on observe des diminutions du rapport K/S dans tous les cas, mais de différentes importances suivant les couleurs. Par exemple, la valeur K/S de l'encre blanche est simplement divisée par 2, indiquant que la diffusion est deux fois plus importante par rapport à l'absorption qu'avec l'épaisseur de 3.5 µm. La même variation est observée concernant l'encre jaune. Pour les encres vertes et rouges, les chutes du coefficient K/S sont moins importantes et valent respectivement 25% et 20%. Enfin, l'encre bleue montre également une chute de 50% de ce facteur. Les mesures étant réalisées sur un fond noir, une augmentation de l'épaisseur de la couche masque celui-ci davantage, entraînant une rétrodiffusion plus importante et donc absorption globale plus faible, en particulier pour les encres peu absorbantes comme la blanche et la bleue.

Le rapport K/S (max) mesuré ici n'étant valable que sur une longueur d'onde donnée, l'analyse des mesures spectrales sur une plus large bande de longueur d'onde aide à déterminer la quantité totale d'énergie qui est réfléchiée par les modules. Leur caractère rétrodiffusif y joue un rôle important.

3.2 Résultats de mesures spectrales des encres

Dans cette partie, les résultats de mesures spectrales en réflexion sont analysés. Les valeurs sont obtenues avec 2 épaisseurs différentes, environ 7 µm et 3.5 µm, qui correspondent à respectivement 100% et 50% de l'épaisseur maximale réalisable. Dans le cas de l'encre blanche, une troisième valeur est également étudiée, correspondant à 1.75 µm (25%). Pour une application PV, la partie du spectre au-delà de 1200 nm est inutile, car la réponse spectrale de la cellule devient nulle. Cette partie peut toutefois être intéressante pour une étude thermique et la réflexion de l'énergie rayonnée par l'environnement. Enfin, en termes d'efficacité esthétique, seule la partie du spectre visible compte, c'est-à-dire entre 380 et 780 nm.

3.2.1 Mesures en réflexion avec le spectrophotomètre à sphère intégrante

La réflectance spectrale de l'absorbeur noir étant proche de celle d'une cellule PV, cette mesure permet d'estimer la quantité d'énergie réfléchiée d'un module PV laminé dans la même

configuration. Expérimentalement, les modules PV ont été fabriqués avec la face imprimée à l'extérieur. Les résultats de mesure spectrale en réflexion avec l'absorbeur noir dans cette configuration se trouvent figure 3.16.

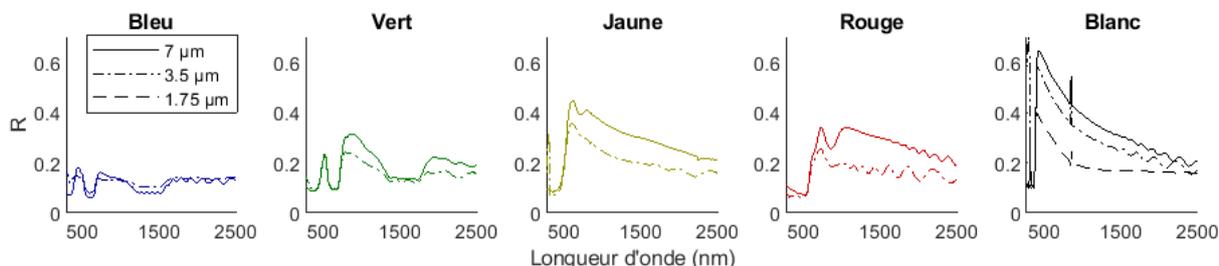


FIGURE 3.16 – Résultats de mesures en réflexion avec l'absorbeur noir pour 3 épaisseurs différentes : 7 μm (100%), 3.5 μm (50%) et 1.75 μm (25%) en configuration impression à l'extérieur

Dans le cas des encres jaune, rouge et blanche, une augmentation de leur épaisseur entraîne une augmentation significative de la réflectance. Ce comportement est synonyme d'un phénomène de rétro diffusion au travers de la couche imprimée. Dans le cas des encres bleue et verte, ce phénomène est peu marqué, si bien que seulement une légère augmentation des amplitudes des creux et des pics est observée lorsque l'épaisseur augmente. Il y a donc un phénomène de rétrodiffusion davantage marqué avec les encres jaune, rouge, et blanche qu'avec les encres bleue et verte. Cette tendance est en accord avec les valeurs du rapport K/S maximum présentées figure 3.15.

Les résultats de mesure en configuration impression à l'intérieur sont présentés figure 3.17.

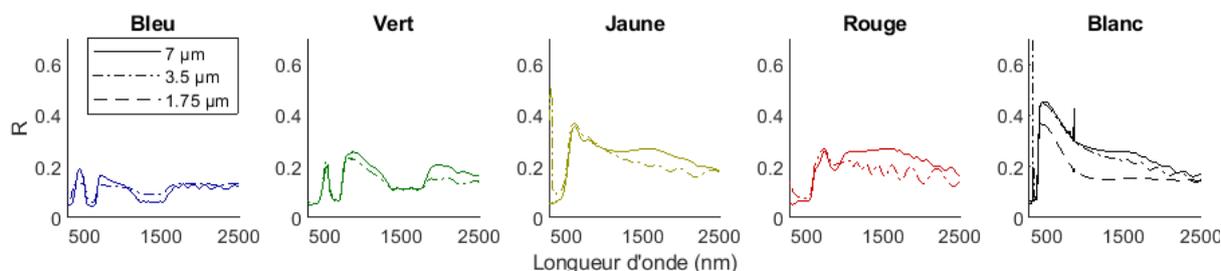


FIGURE 3.17 – Résultats de mesures en réflexion avec l'absorbeur noir pour 3 épaisseurs différentes : 7 μm (100%), 3.5 μm (50%) et 1.75 μm (25%) en configuration impression à l'intérieur

Pour une épaisseur de 7 μm , dans tous les cas de couleur, la configuration avec l'encre à l'extérieur donne des réflexions plus importantes que la configuration avec l'encre à l'intérieur figure 3.18. La succession des interfaces air-encre, encre-verre et verre-air réfléchit davantage la lumière que la succession des interfaces air-verre, verre-encre et encre-air. L'absorbance d'un milieu ne dépendant pas du sens de propagation, ce résultat laisse penser que la configuration avec l'encre à l'intérieur transmet davantage d'énergie que la configuration avec l'encre à l'extérieur, au détriment de la réflexion, qui a un impact sur la couleur et sa luminance.

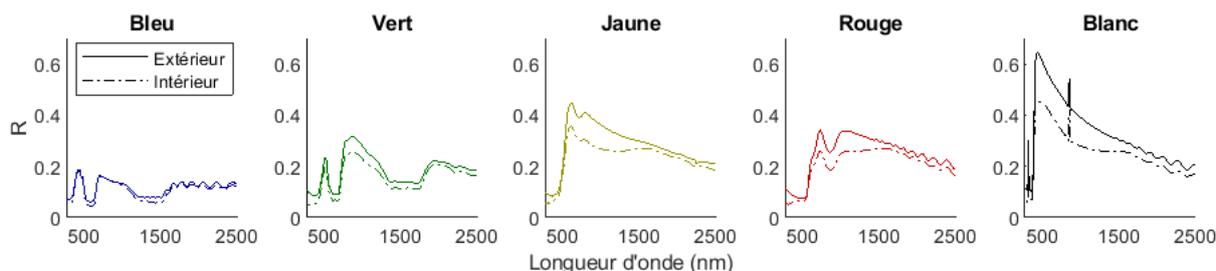


FIGURE 3.18 – Comparaison des résultats de mesures en réflexion avec l’absorbeur noir suivant les configurations pour une épaisseur de 7 μm

Avec une épaisseur de 3.5 μm , le changement de configuration a un plus faible impact sur la variation de réflectance, si bien que dans le cas des encres rouge et jaune, la réflectance devient plus importante en configuration avec l’encre à l’intérieur du module (figure 3.19).

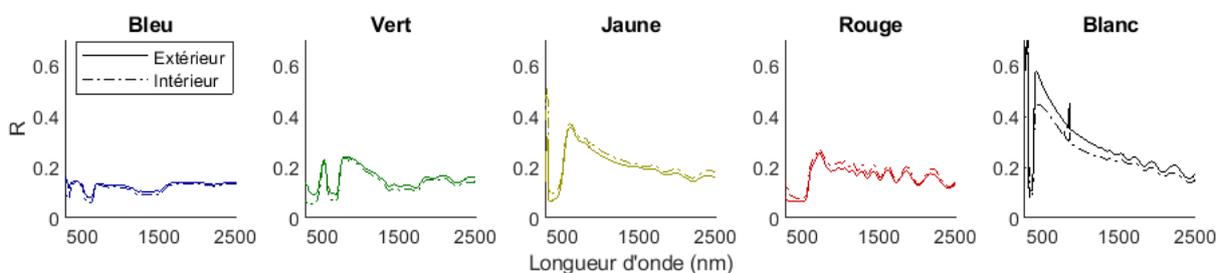


FIGURE 3.19 – Comparaison des résultats de mesures en réflexion avec l’absorbeur noir suivant les configurations pour une épaisseur de 3.5 μm

Les réflectances spectrales de chaque verre imprimé ayant été déterminées, il est maintenant possible de calculer la quantité d’énergie solaire qui est réfléchi par le verre, appelée ici la réflectance solaire.

3.2.2 Comparaison des réflectances solaires selon les épaisseurs d’encre et les configurations

Les réflectances solaires calculées dans les configurations où l’encre est à l’intérieur du module sont comparées avec les valeurs obtenues dans les configurations où l’encre est à l’extérieur du module, et ce, pour les deux épaisseurs d’encre étudiées. Les résultats sont présentés figure 3.20. Pour une épaisseur de 7 μm , la tendance est la même pour toutes les couleurs : la configuration extérieure provoque davantage de réflexion que la configuration intérieure. Cependant, les écarts diffèrent. Ainsi, le changement de la configuration extérieure à intérieure représente une diminution de réflectance d’environ 5% dans le cas du bleu, 19% pour le vert, 20% pour le rouge, 21% pour le jaune et 26% pour le blanc.

Pour une épaisseur de 3.5 μm , la tendance n’est plus la même pour toutes les couleurs. En effet, pour les couleurs rouge et jaune, c’est cette fois-ci la configuration intérieure qui réfléchit davantage d’énergie solaire que la configuration extérieure (respectivement 11% et 8%). Pour les autres couleurs, la configuration intérieure représente une chute de réflectance solaire de 9% pour le bleu, 11% pour le vert et 15% pour le blanc.

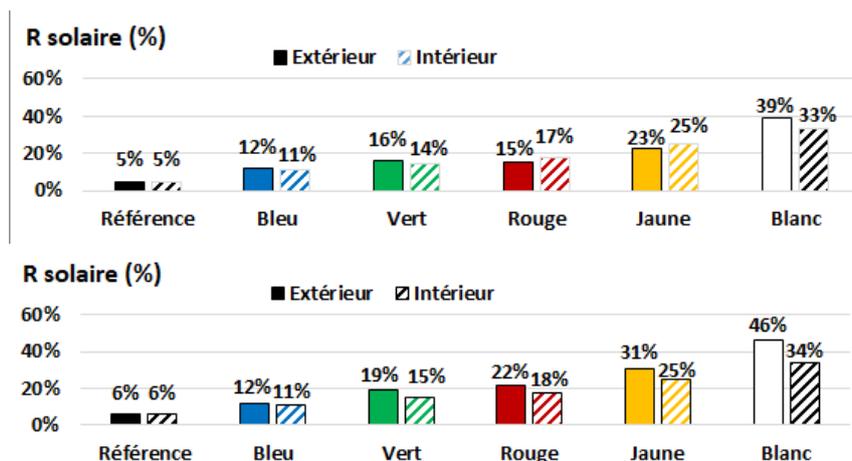


FIGURE 3.20 – Réflectance solaire calculée dans les deux configurations pour une épaisseur de 3.5 µm (en haut) et 7 µm (en bas)

Lorsque l'on cherche à comparer les impacts des épaisseurs, on observe que pour une même configuration, une augmentation de l'épaisseur entraîne une augmentation de la réflectance solaire. Cependant, en configuration intérieure, les résultats concernant l'encre bleue et l'encre jaune montrent très peu de variations. Pour les autres couleurs, une variation d'épaisseur de 3.5 µm à 7 µm entraîne une augmentation de réflectance solaire de 2.7% pour le vert, 1.4% pour le rouge et 2.6% pour le blanc. Dans la configuration extérieure, cette augmentation est de 14% pour le vert, 41% pour le rouge, 33% pour le jaune et 18% pour le blanc.

On remarque ici des écarts bien plus importants dans le cas de la configuration extérieure que dans le cas de la configuration intérieure. La diffusion de la lumière par les encres augmentant avec leur épaisseur, la part d'énergie diffusée vers l'arrière est donc bien plus importante dans le cas de la configuration intérieure, où la présence de la couche de verre représente un obstacle supplémentaire qui absorbe et réfléchit la lumière. Une réflectance solaire plus petite dans le cas de la configuration intérieure ne signifie donc pas que davantage d'énergie a traversé le verre et atteint la cellule PV. Pour estimer la part d'énergie qui a réellement été captée par celle-ci, les mesures en transmission de ces encres sont étudiées.

3.2.3 Mesures en transmission avec le spectrophotomètre à sphère intégrante et calcul de la transmittance interne des encres

Grâce à la mise en œuvre d'un procédé consistant à découper du verre imprimé (précédemment laminé avec de l'encapsulant (EVA) afin qu'il ne se brise pas en de multiples morceaux), des échantillons de taille suffisante pour être utilisés dans le spectrophotomètre en mode transmission ont pu être réalisés et analysés figure 3.21. Il faut prendre en compte qu'une partie de la lumière a été réfléchi, et que la partie restante a traversé la couche imprimée, la couche de verre de 4 mm ainsi que la couche d'EVA de 0.8 mm avant d'être captée par la sphère intégrante. La mesure a été réalisée dans les deux sens possibles, avec la face imprimée du côté incident du rayon ("extérieur") et avec la face imprimée du côté sortant ("intérieur"), le rayon incident rencontrant d'abord l'encapsulant. Celui-ci est bien visible sur les spectres de transmissions obtenus, avec la présence d'importantes chutes de transmission autour de 1700 nm puis de 2400 nm.

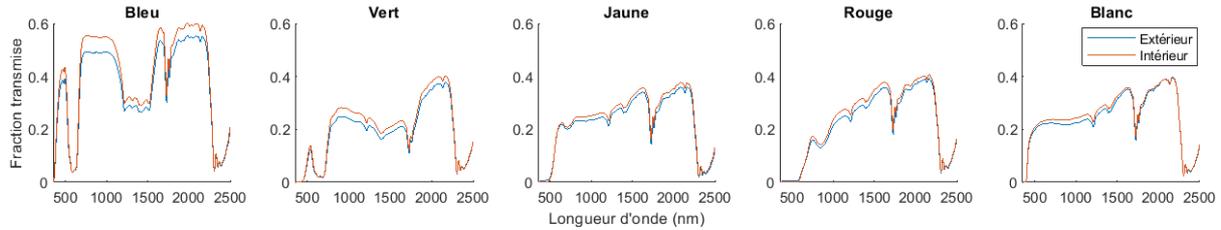


FIGURE 3.21 – Fraction de l'énergie transmise par les échantillons de verres imprimés avec une épaisseur de 7 µm dans les configurations extérieure et intérieure

La mesure obtenue m_T peut donc être approximée par l'égalité suivante :

$$m_T(\lambda) = (1 - R(\lambda)) \cdot T_c(\lambda) \cdot T_v(\lambda) \cdot T_{EVA}(\lambda) \quad (3.14)$$

R est la réflectance de l'échantillon préalablement mesurée, T_c , T_v et T_{EVA} les transmittances internes de la couche d'encre, du verre et de l'EVA. Il est alors possible d'estimer la transmittance interne des couches d'encre :

$$T_c(\lambda) = \frac{m_T(\lambda)}{(1 - R(\lambda)) \cdot T_v(\lambda) \cdot T_{EVA}(\lambda)} \quad (3.15)$$

Les résultats sont présentés figure 3.22

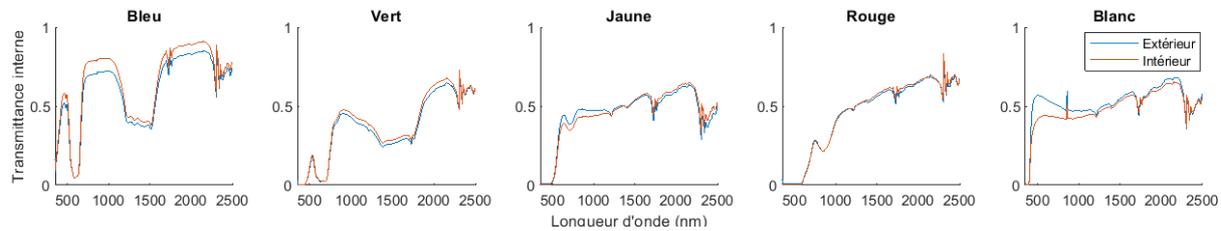


FIGURE 3.22 – Transmittance interne obtenue pour chaque encre d'une épaisseur de 7 µm à partir des mesures réalisées dans les deux configurations

D'après la loi de Beer-Lambert, la transmittance interne d'un milieu décroît exponentiellement selon son épaisseur z et son coefficient d'extinction k :

$$T(\lambda) = e^{-k(\lambda) \cdot z} \quad (3.16)$$

Les coefficients d'extinction résultants sont présentés figure 3.23. Globalement, ces coefficients d'extinctions montrent des pics dans le domaine visible correspondant à la couleur associée pouvant aller de $0.5 \mu m^{-1}$ à $1 \mu m^{-1}$, puis une valeur quasi constante située entre $0.1 \mu m^{-1}$ et $0.2 \mu m^{-1}$ dans le proche infrarouge. Concernant les différences selon la configuration, d'importants écarts sont observés au niveau des pics situés dans le domaine visible et dans le proche ultra-violet. Malgré des valeurs très proches dans les deux configurations sur le reste du spectre, les pics obtenus en configuration intérieure sont plus importants d'environ 20% à 30 % dans le cas des encres verte, jaune et rouge. Aucune différence n'est observée dans le cas de l'encre bleue. Les pics de résonance observés dans le cas de l'encre blanche, de l'encre verte et de l'encre jaune sont des artefacts qui résultent des transmittances quasi nulles du verre et de l'encapsulant dans les ultraviolets (longueur d'onde de coupure). Le phénomène d'extinction et la

notion de transmittance interne étant indépendant du sens de propagation et donc de la configuration choisie, il n'existe qu'un seul spectre. Cependant, les mesures en réflexion ont été effectuées sans la présence de l'encapsulant en face arrière, et celui-ci a potentiellement un impact notable dans la mesure de transmittance en configuration intérieure, où le rayon incident rencontre l'encapsulant en premier. Au contraire, en configuration extérieure, lors des mesures en réflexion et en transmission, le rayon incident rencontre dans les deux cas la couche imprimée en premier. Les résultats obtenus dans cette configuration semblent donc plus fiables.

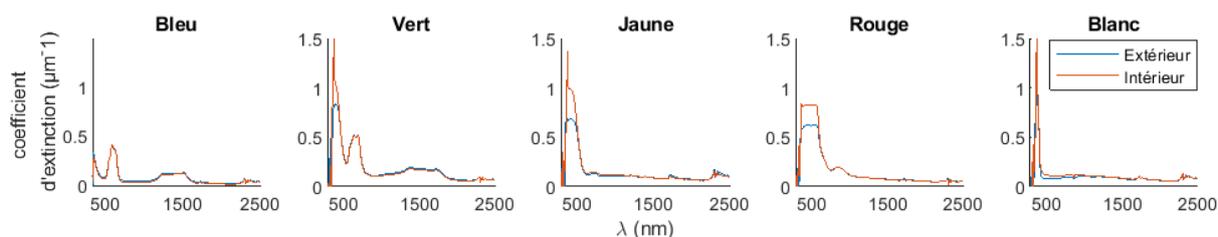


FIGURE 3.23 – Coefficients d'extinction obtenus pour chaque encre à partir de mesures réalisées dans les deux configurations

De cette manière, on peut tenter d'estimer la transmittance interne des couches d'autres épaisseurs, notamment celles de $3.5 \mu\text{m}$ utilisés pour les modules PV fabriqués. Avec une épaisseur qui vaut la moitié de la précédente, on a :

$$T\left(\frac{z}{2}\right) = e^{-\alpha \cdot \frac{z}{2}} = \sqrt{e^{-\alpha \cdot z}} = \sqrt{T(z)} \quad (3.17)$$

Donc $T(3.5 \mu\text{m}) = \sqrt{T(7 \mu\text{m})}$

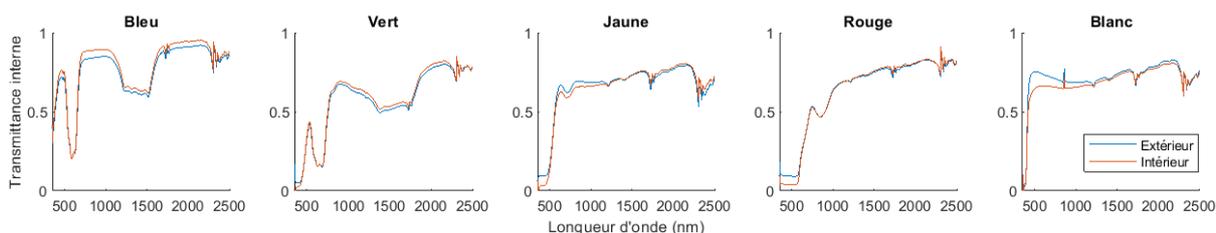


FIGURE 3.24 – Comparaison des résultats de mesures en réflexion avec l'absorbeur noir suivant les configurations pour une épaisseur de $3.5 \mu\text{m}$

3.2.4 Bilan sur les mesures spectrales

La caractérisation au spectrophotomètre à sphère intégrante a permis d'observer les différences spectrales entre les encres, mais aussi leur variation en fonction de l'épaisseur et de la configuration. L'étude a permis de déterminer des tendances de diffusion et d'absorption entre les encres, notamment grâce aux mesures des rapports K/S réalisées au colorimètre. Les mesures spectrales ont permis de réaliser des calculs pour estimer les coefficients d'extinction des encres. Ces données peuvent aider à prédire les pertes énergétiques des modules PV colorés en fonction des encres et de leur épaisseur. La validité des prédictions peut être évaluée en caractérisant énergétiquement les modules PV fabriqués.

3.3 Caractérisation énergétique des modules fabriqués via les mesures I-V

La caractérisation au flash-test permet d'obtenir la courbe I-V de chaque module.

3.3.1 Courbe courant-tension d'une cellule PV

Sans illumination, une cellule PV se comporte idéalement comme une diode et ne laisse passer le courant qu'au-delà d'une certaine valeur de tension. Le profil est décrit suivant l'équation de Shockley :

$$I = I_0[\exp(\frac{qV}{nk_B T}) - 1] \quad (3.18)$$

q est la charge élémentaire d'un électron, K_B est la constante de Boltzmann, T la température absolue et n le facteur de qualité de la diode. Une fois illuminée, elle devient génératrice d'un courant inverse. La courbe I-V d'une cellule est donc la courbe I-V d'une diode dans le noir à laquelle on retranche le courant généré grâce à l'effet de la lumière I_L :

$$I = I_0[\exp(\frac{qV}{nk_B T}) - 1] - I_L \quad (3.19)$$

Par convention, la courbe I-V est retournée, donnant ainsi le profil suivant figure 3.25 :

$$I = I_L - I_0[\exp(\frac{qV}{nk_B T}) - 1] \quad (3.20)$$

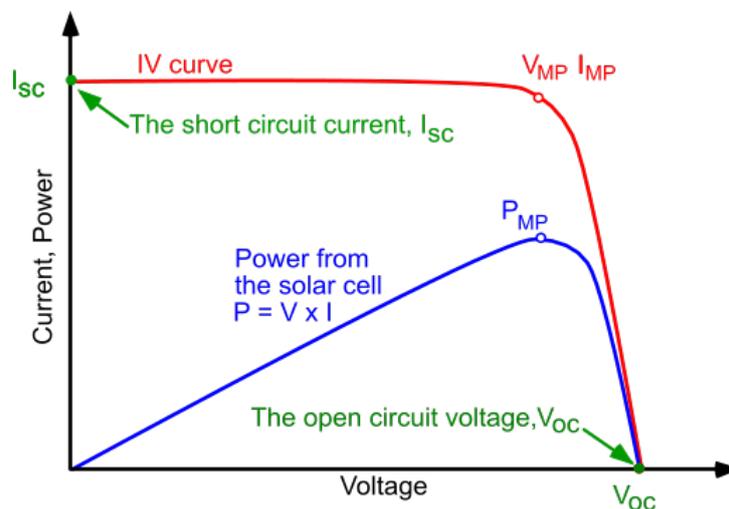


FIGURE 3.25 – Courbe I-V type d'une cellule PV [65]

Pour caractériser une cellule PV, on s'intéresse principalement à trois grandeurs figure 3.25 :

- le courant de court-circuit I_{sc} , représentant le courant délivré par une cellule éclairée qui serait raccordée à elle-même (en court-circuit)
- la tension de circuit ouvert V_{oc} , représentant la tension générée par une cellule éclairée non raccordée

— le facteur de forme (Fill Factor) $FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$ qui définit la qualité de la cellule PV par rapport à une cellule idéale sans pertes

La puissance maximale que peut délivrer la cellule PV s'obtient en réalisant le produit de ces trois grandeurs $P_{MPP} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}$

La tension de circuit ouvert dépend uniquement du circuit électrique et de l'échauffement du module, tandis que le courant de court-circuit dépend de l'énergie qui atteint la cellule. Comme le squelette et les matériaux de chaque module sont identiques, on compare d'abord les I_{sc} mesurés à l'aide du flash-test pour évaluer l'impact de chaque encre sur la production énergétique. Dans ces conditions, la mesure est suffisamment rapide pour que l'échauffement du module soit négligeable. Cependant, en fonctionnement, les modules sous forme de chaleur à cause de l'absorption du verre imprimé et de la cellule PV. On étudiera donc également les variations de températures en condition réelle et son impact sur le V_{oc} .

3.3.2 Efficacité solaire des modules colorés par rapport au module de référence

L'efficacité solaire d'une couche imprimée peut être définie comme le rapport de la puissance délivrée par un module coloré sur la puissance délivrée par un module de référence non coloré. D'un module à un autre, les tensions de circuits ouverts et les facteurs de formes varient très peu, si bien que la comparaison des courants de court-circuit est suffisante pour évaluer les effets des couches imprimées en face avant.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{max,ref}} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{I_{sc,ref} \cdot V_{oc} \cdot FF} \approx \frac{I_{sc}}{I_{sc,ref}} \quad (3.21)$$

Cinq modules PV ont été fabriqués avec chacune des encres de base de l'imprimante, pour une épaisseur d'environ 7 μm . Un module de référence, possédant le même verre que les autres, mais non imprimé, a également été fabriqué pour évaluer l'impact de chaque encre sur la transmission solaire. Après caractérisation au flash-test, un classement des encres les plus efficaces peut ainsi être observé figure 3.26 : l'encre bleue arrive en tête (78 % d'efficacité par rapport au module de référence), suivie par les encres blanche (65%), jaune (61%), verte (48%), et rouge (44%).

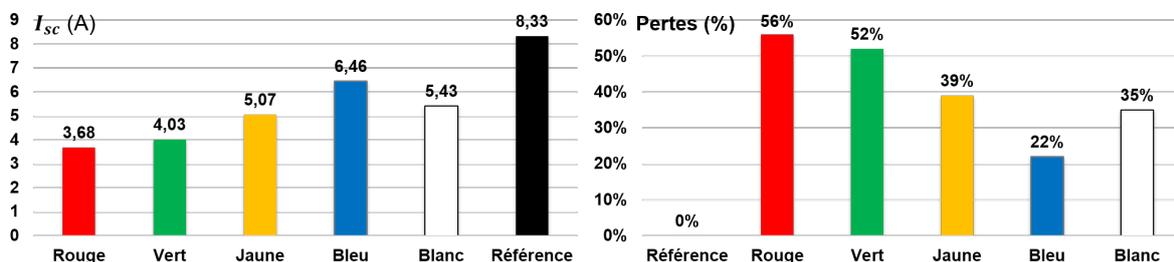


FIGURE 3.26 – Comparaison des courants de court-circuit mesurés en fonction de l'encre imprimée en surface de la face avant et le module de référence

Grâce aux résultats de mesure I-V des modules fabriqués, on peut estimer la validité des calculs théoriques en comparant les courants de court-circuit obtenus avec les courants de court-circuit mesurés.

3.3.3 Calcul de courants de court-circuit théoriques et comparaison avec les mesures I-V

Les courants de court-circuit théoriques calculés grâce aux résultats de mesures optiques sont comparés aux courants de court-circuit réellement mesurés lors des flash-tests figure 3.27. Malgré un écart inférieur à 1% dans le cas du module de référence, d'importantes différences sont constatées concernant les modules colorés. Ainsi, le courant de court-circuit théorique obtenu pour le module blanc est 30% inférieur à celui mesuré, tandis que celui obtenu avec le module bleu est 15% inférieur à celui mesuré. Enfin, ceux calculés pour les modules rouge et vert sont environ 25% inférieurs, tandis que l'écart concernant le module jaune est légèrement supérieur. Cette tendance est corrélée avec les valeurs du rapport K/S mesuré grâce au colorimètre section 3.1.9. Plus ce rapport est petit, et plus l'écart est grand. En d'autres termes, plus l'encre est diffusante plutôt qu'absorbante, et plus le courant de court-circuit calculé est petit par rapport à celui mesuré.

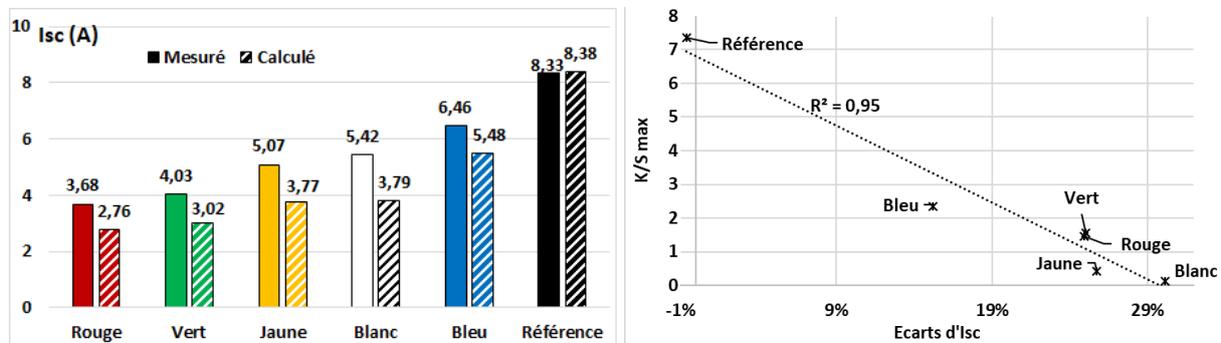


FIGURE 3.27 – Comparaison des courants de court-circuit mesurés et calculés

Les phénomènes de diffusion semblent donc avoir un impact significatif sur la validité des calculs réalisés, ceux-ci dépendant directement des résultats de mesures optiques. Les coefficients qui interviennent et qui diffèrent selon les modules sont la réflectance et la transmittance interne. Cette dernière a été calculée grâce aux résultats combinés des mesures en réflexion et en transmission d'une épaisseur d'environ 7 μm . Ces mesures ayant été réalisées dans l'air, les réflexions aux interfaces ont été plus nombreuses qu'à l'intérieur d'un module PV encapsulé, les matériaux de chaque couche étant conçus pour minimiser les différences d'indice sur le chemin optique jusqu'à la cellule. Les valeurs de réflexion mesurées sont donc possiblement supérieures aux quantités d'énergie réellement réfléchies par le module. Ce cas implique de fait des valeurs de transmission mesurées plus faibles que les quantités d'énergie réellement transmises.

3.3.4 Différences de réflectance entre verres imprimés seuls et modules laminés

Les mesures réalisées avec le spectrophotomètre à sphère intégrante, sur du verre non laminé et devant un absorbeur noir, sont comparées figure 3.28 aux mesures obtenues en utilisant le colorimètre directement sur les modules laminés avec les verres colorés. La configuration étudiée ici est donc lorsque la couche imprimée est à l'extérieur du module. La gamme de longueur d'onde concernée est strictement comprise en 400 et 700 nm. Pour chaque couleur, c'est

toujours le spectre obtenu avec le spectrophotomètre qui est au-dessus de celui obtenu avec le colorimètre. Les écarts sont les plus importants autour de la longueur d'onde correspondante à la couleur.

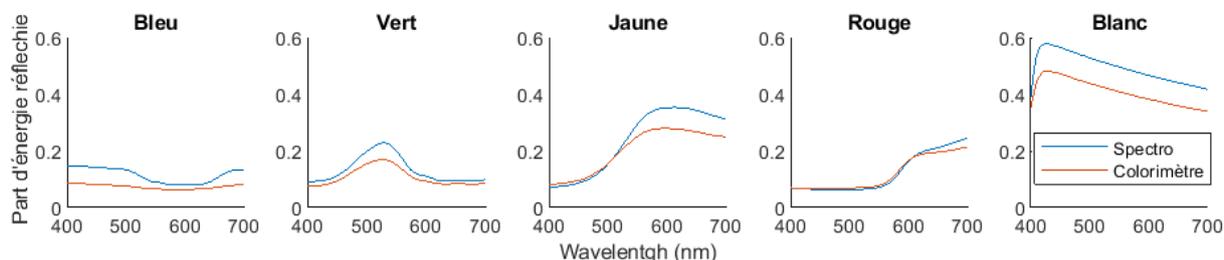


FIGURE 3.28 – Comparaison des réflectances entre spectrophotomètre et colorimètre

Les encres sont donc mesurées moins saturées en couleur sur un module laminé que sur le verre seul. Cette différence est sûrement majoritairement due au protocole de mesure en réflexion du verre seul, qui a été réalisé dans l'air. L'interface verre-air située derrière le verre génère une part d'énergie qui est réfléchie, à cause de la différence d'indice de réfraction. Dans le cas des modules laminés, il y a en théorie très peu de réflexion de ce genre, car l'encapsulant est conçu pour avoir un indice de réfraction proche de celui du verre, tandis que la cellule PV possède une couche anti-reflet en surface adaptée à l'indice de l'encapsulant, minimisant la réflexion autour de 4%.

3.3.5 Impact de l'emplacement de la couche imprimée sur les courants de court-circuit délivrés en conditions standards

La majorité des modules ont été testés avec une configuration qui dispose la face imprimée à l'extérieur, et certaines couleurs ont également pu être testées avec une configuration à l'intérieur. L'influence de la position de la couche imprimée a ainsi pu être évaluée dans les cas de couleurs présentées figure 3.29. Des modules possédant 4 cellules PERC ont été laminés avec dans chaque cas, la couleur de base rouge, la couleur de base jaune, une superposition des couleurs de base bleue et blanche, un mélange des couleurs de base donnant un résultat Terracotta (ton marron), et enfin ce même mélange, mais avec un motif tramé pointillé (des disques de 1 mm espacés de 1 mm). De plus petits échantillons fournis par Saint-Gobain, correspondant à des modules monocellulaires, ont également été testés dans les deux configurations : un mélange de couleur donnant un ton de gris appelé Squirrel Grey, et un mélange de couleur donnant un type de blanc appelé Papyrus White, avec un motif tramé pointillé. On compare ici les différences relatives du courant de court-circuit en configuration extérieure par rapport à la configuration intérieure. Dans le cas des encres de base rouge et jaune, on note des écarts de respectivement 13% et 10%. La superposition des encres bleue et blanche montre également un écart de 10%. Dans le cas de couleurs mélangées, la tendance est plus nuancée. En effet, alors que l'écart mesuré est de 8% pour le Squirrel Grey, un écart négatif de -6% est observée pour la couleur Terracotta. Enfin, pour cette même couleur, les motifs tramés avec des points montrent un écart de 2%, tandis qu'un écart de -3% est observé dans le cas des motifs tramés de la couleur Papyrus White. Les valeurs plus petites d'écarts dans le cas des motifs tramés sont logiquement attendues car la surface occupée par l'encre est moins importante, diminuant l'effet.

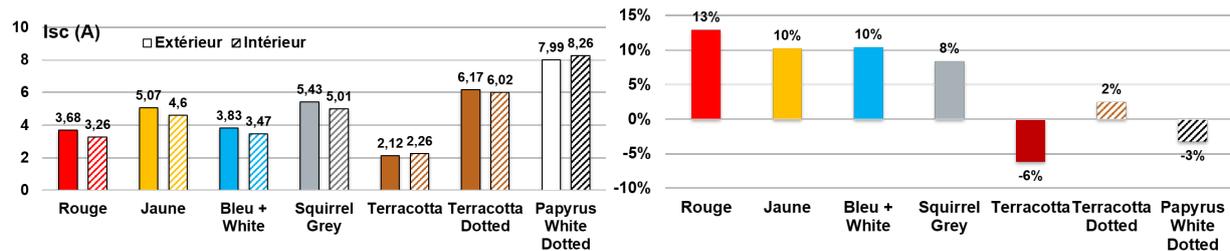


FIGURE 3.29 – À gauche : comparaison des courants de court-circuit mesurés et calculés ; À droite : Différences relatives du courant de court-circuit en configuration extérieure par rapport à la configuration intérieure

Dans la majorité des cas étudiés, la configuration avec l'encre à l'extérieur a montré des performances plus importantes, avec des écarts non négligeables autour de 10%. Pourtant, d'autres tendances concernant les couleurs mélangées et leurs motifs tramés sont observées, ne permettant pas de conclure sur un effet universel dû uniquement à l'emplacement de l'encre dans l'empilement. Des phénomènes résultant de la topologie des dépôts combinés à des effets de diffusions sont susceptibles de jouer un rôle. La nature de chaque encre, leur disposition au sein d'un mélange et l'état de surface du dépôt d'encre, notamment dans le cas des motifs tramés, sont les facteurs régissant ce genre de phénomène.

3.3.6 Comparaisons des cellules PERC et des cellules HET sur l'efficacité des couleurs

Suivant la réponse spectrale des cellules PV utilisées, l'efficacité solaire d'une encre peut être plus adaptée. Des modules PV possédant des cellules à hétérojonction (HET) ont été fabriqués pour être comparés aux modules PV avec cellules monocristallines PERC. Les courants de court-circuit mesurés en flash-test ainsi que les pertes énergétiques associées par rapport à un module de référence sans encre sont présentés figure 3.30.

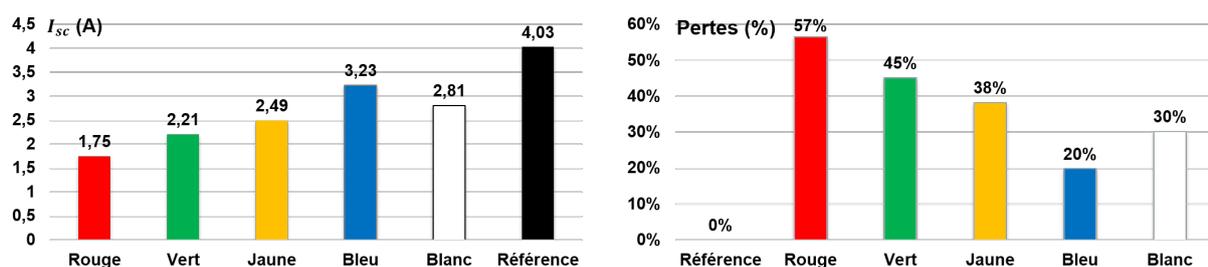


FIGURE 3.30 – Pertes de courant de court-circuit en fonction des couleurs pour les modules avec cellules HET

Les pertes restent globalement du même ordre de grandeurs pour toutes les couleurs, mais sont légèrement inférieures pour les encres vertes, bleue et blanche, respectivement de 52% de pertes à 46% (chute de 11%), de 22% à 20% (chute de 9%) et de 35% à 30% (chute de 9%). Concernant les encres rouge et jaune, c'est une légère augmentation des pertes qui est observée, respectivement de 56% à 57% (augmentation de 1.5%) et de 38% à 39% (augmentation de 2.5%). Ces résultats montrent que suivant la couleur désirée, il existe des technologies de

cellules PV plus adaptées que d'autres pour minimiser les pertes énergétiques. Toutefois, les comparaisons doivent également être effectuées sur la puissance délivrée par rapport à la surface occupée. Dans ce cas-ci, pour une même surface de 0.13 m^2 le module de référence avec cellules HET délivre une puissance maximum de 18.04 W, alors que le module de référence avec cellules PERC délivre une puissance maximum de 17.25 (4% de moins). Ainsi, on montre que les cellules HET sont plus productrices d'électricité de manière générale, mais qu'elles sont également plus intéressantes lorsqu'il s'agit de minimiser les pertes énergétiques de modules colorés vert, bleu ou blanc.

3.4 Échauffement des modules en conditions réelles

L'influence de la température sur le rendement des cellules PV est un phénomène connu. Lorsque la température augmente, la tension de circuit ouvert diminue. Malgré une augmentation du courant de court-circuit, c'est bien une baisse de rendement global de la cellule PV qui est observé. Concernant les cellules PERC, c'est une baisse de 0.39% par °C qui impacte la puissance maximum de sortie [51]. Même si une lame d'air permet de dissiper la chaleur des modules BIPV, un échauffement trop important peut être nuisible au rafraîchissement des bâtiments en été. Il est donc important de quantifier l'élévation en température due à la présence des encres céramiques.

3.4.1 Résultats de mesures de températures en conditions extérieures

Les mesures de températures et de puissance délivrées par les modules disposées à l'extérieur sont observables figure 2.19 pour deux journées différentes. Elles sont accompagnées des relevées de l'irradiance normale globale (GNI) à 30° et de la vitesse du vent. Malheureusement, les données concernant le module blanc ne sont pas disponibles en raison d'un capteur défectueux. L'analyse des résultats et l'utilisation d'un modèle thermique peut servir à estimer ces valeurs.

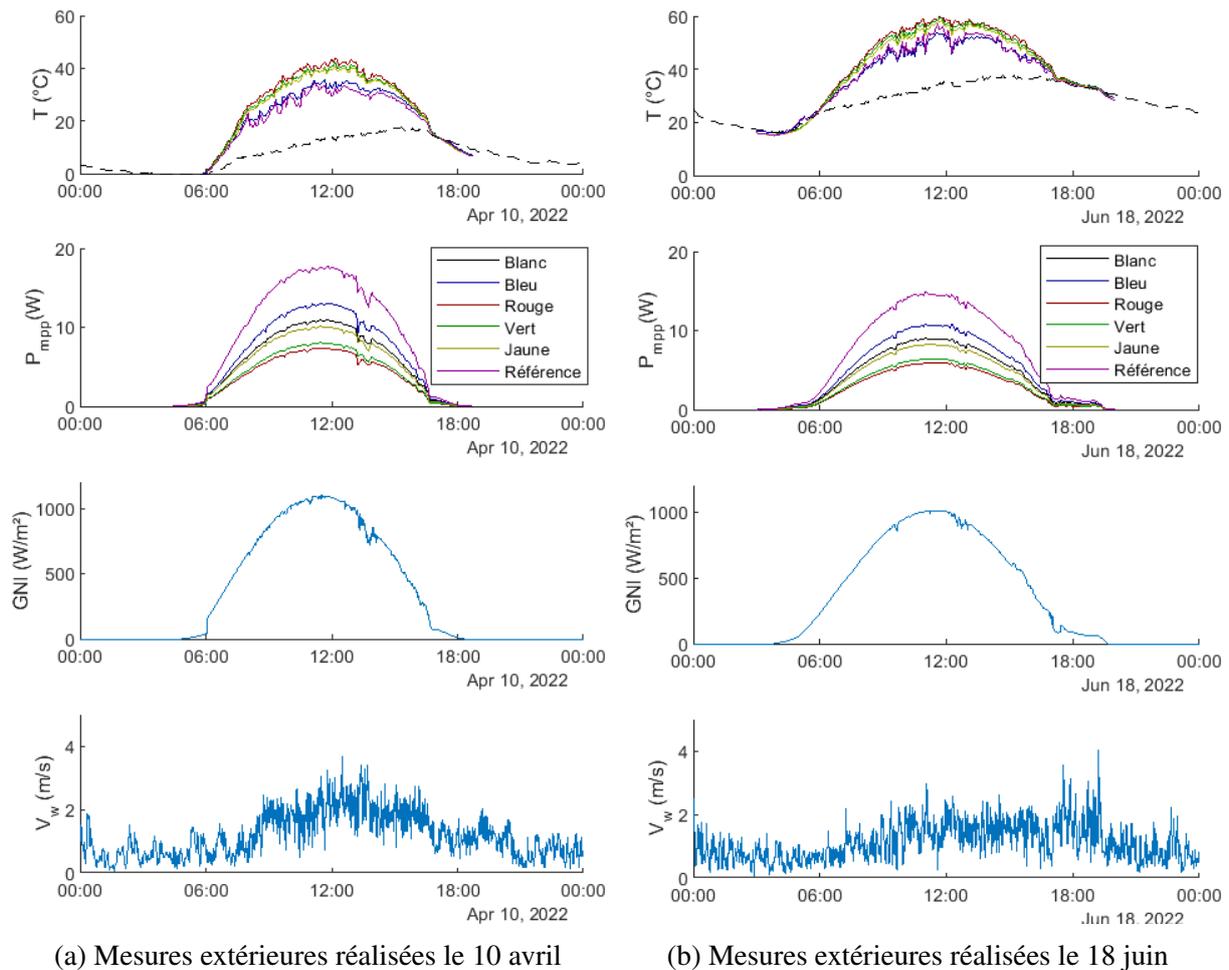


FIGURE 3.31 – Mesures extérieures de températures, de puissance délivrée, d'irradiance normale globale à 30°C et de vitesse de vent. La courbe pointillée correspond à la température de l'air.

D'importantes différences concernant la montée en température des modules colorés sont observées. Au cours d'une journée ensoleillée lors de laquelle l'éclairement atteint environ 1100 W/m^2 , proche de l'équinoxe de printemps (10 avril), avec une température de l'air ambiant allant de 0°C à 20°C et un vent d'environ 2 m/s , les modules utilisant les encres rouge, verte et jaune montent à des températures de 40°C , alors que le module de référence est lui à 30°C . Concernant le module bleu, celui-ci est légèrement plus chaud que le module de référence, environ 33°C . Dans le cas d'une journée ensoleillée qui atteint environ 1000 W/m^2 , proche du solstice d'été (18 juin), une température de l'air allant de 18 à 35°C et une vitesse de vent d'environ 1 m/s , les tendances restent les mêmes, mais l'ensemble des courbes a été translaté vers le haut d'environ 15°C , ce qui correspond aux écarts de température de l'air entre les deux dates.

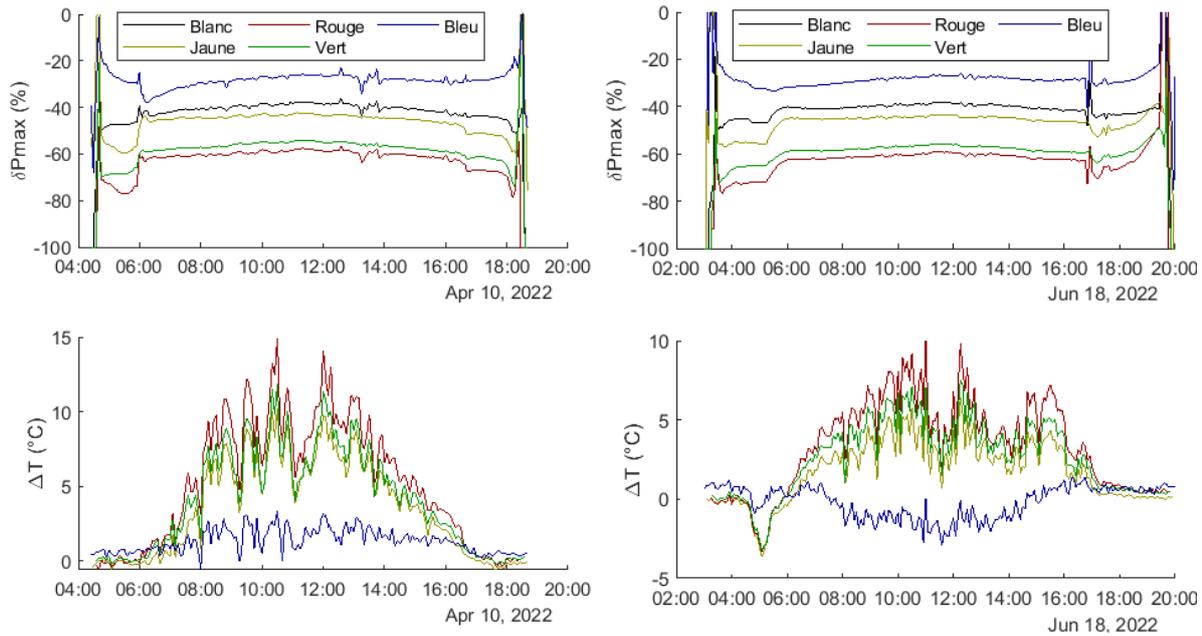


FIGURE 3.32 – En haut : Écarts relatifs des puissances délivrées par les modules colorés par rapport au module de référence ; en bas : écarts de température, pour les journées du 10 avril et du 18 juin.

Lorsque le rayonnement rencontre un module coloré, une première partie de l'énergie est réfléchiée par la surface imprimée, puis une seconde partie est absorbée par la couche imprimée. La partie restante est transmise à travers le verre jusqu'à la cellule PV, qui ne convertit que 18% de cette énergie en électricité. Le reste est absorbé et converti en chaleur par les autres composants du module. L'élévation en température est due à la partie de l'énergie qui est absorbée par les couches et transformée en chaleur. Les différences de montée en température sont donc corrélées avec les différences d'absorbance entre les encres.

3.4.2 Comparaison des résultats théoriques donnés par le modèle thermique avec les mesures en conditions extérieures

Un modèle thermique dynamique tentant de simuler l'échauffement des modules PV en conditions extérieures a été développé et comparé aux mesures expérimentales. Pour estimer les pertes radiatives, il utilise des données d'émissivité mesurées expérimentalement.

Comparer les résultats de mesure avec un modèle thermique permet d'observer des différences de comportement selon la couleur du module et de déterminer des propriétés spécifiques. Tout d'abord, il convient de déterminer les valeurs des paramètres environnementaux : l'émissivité et la température du ciel, l'émissivité et la température du sol, l'impact du vent. Plus précisément, connaître les valeurs absolues des grandeurs n'est pas nécessaire. En effet, connaître les rapports entre les émissivités et les températures est suffisant pour obtenir des conditions telles que les résultats de calcul coïncident avec les données mesurées. Celles obtenues avec le module de référence, dont les propriétés optiques sont connues, servent de base pour déterminer ces paramètres. Ainsi, les phases de temps sans ensoleillement (avant et après la journée), du fait de leur proximité avec l'état d'équilibre, permettent de déterminer que l'émissivité de la

face arrière (identique pour chaque module) doit être de 0.6 pour que les mesures et les calculs du module de référence coïncident. Enfin, l'impact du vent peut être évalué et corrigé en observant l'intensité des fluctuations de température mesurées, à condition de réaliser l'étude pour une journée sans nébulosité. Une fois que les mesures et le modèle thermique du module de référence coïncident, les conditions de simulation de l'environnement extérieur sont considérées satisfaisantes et des comparaisons entre les modules colorés peuvent être réalisées. Les résultats de calculs sont comparés aux mesures pour la journée du 1er mai 2022 figure 3.35 et la journée du 3 mai 2023 figure 3.34 (cas du blanc). Les émissivités du ciel et du sol sont fixées à 0.95, tandis que les émissivités des faces avant de chaque module sont toutes supposées égales à celle du verre, soit 0.9.

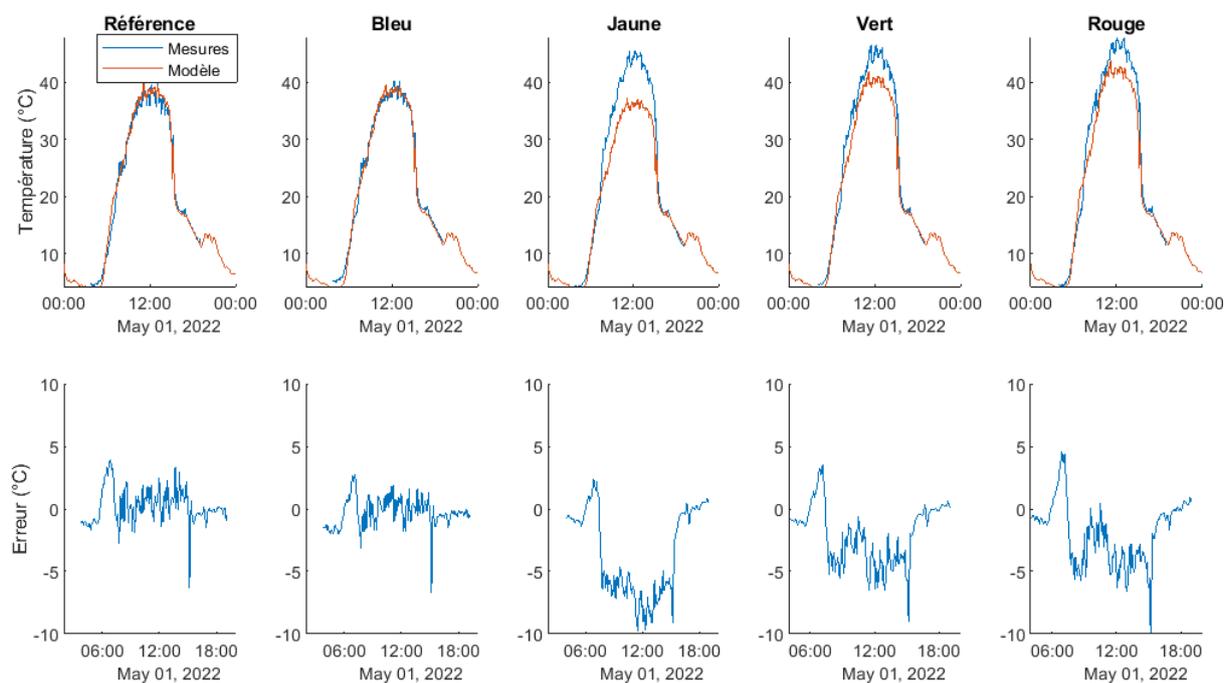


FIGURE 3.33 – Comparaison entre mesures et modèle pour la journée du 1er mai 2022

Dans les conditions où les émissivités des faces avant sont toutes proches de 0.9, d'importantes différences sont observées entre mesures et calculs pour les modules jaune, rouge, vert et blanc. Quand des écarts allant de 3 à 5 °C sont obtenus pour les modules rouge, vert et blanc, ce sont des écarts allant de 5 à 10 °C qui sont observés dans le cas du module jaune.

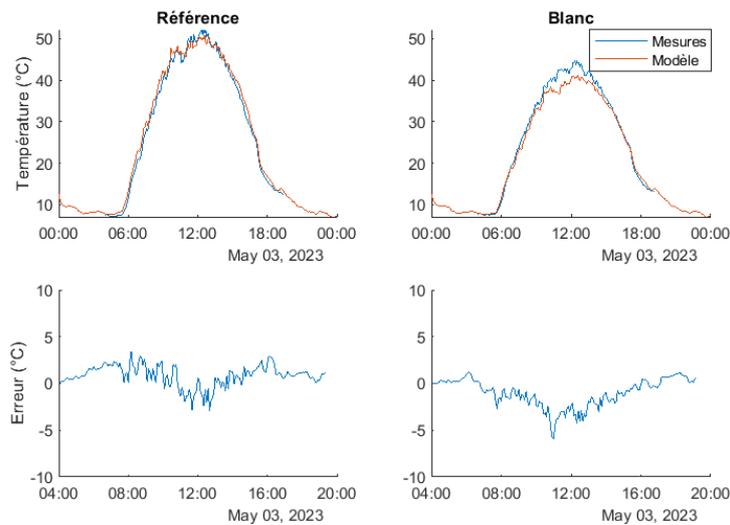


FIGURE 3.34 – Comparaison entre mesures et modèle pour la journée du 10 avril

Les modules ne diffèrent qu’au niveau de la couche d’encre imprimée sur la surface de leur face avant. Les mesures de réflectances obtenues et les valeurs supposées des émissivités ne permettent pas de faire coïncider le modèle thermique lorsque le module est jaune, rouge, vert ou blanc. De plus, la tendance à l’échauffement des modules en fonction de la couleur n’est pas la même entre le modèle et les mesures. Pour les mesures, le classement des modules les plus chauds respecte l’ordre des modules les moins performants, excepté pour le module blanc où les pertes sont uniquement dues à la réflexion (il est plus froid que le module de référence). Dans le modèle étudié, l’émissivité est quasi la même pour toutes les couleurs et la réflectance apparaît comme le paramètre prépondérant donnant des échauffements différents suivant les couleurs. Ainsi, l’importante réflectance de l’encre jaune cause un échauffement d’environ 10°C de moins que ce qui est mesuré dans l’expérience. Des phénomènes similaires sont observés dans le cas des modules rouge et vert, laissant penser que l’émissivité thermique peut différer suivant l’encre utilisée et être inférieure à celle du verre, entraînant un échauffement plus important.

3.4.3 Évolution des paramètres pour correspondre avec les mesures

Pour que les profils coïncident lors des phases de temps sans ensoleillement, les valeurs d’émissivité des modules rouge, vert et jaune ont été diminuées jusqu’à respectivement 0.35, 0.35 et 0.25, tandis que les émissivités des modules blanc et bleu sont restées élevées (respectivement 0.8 et 0.9). (figure 3.35)

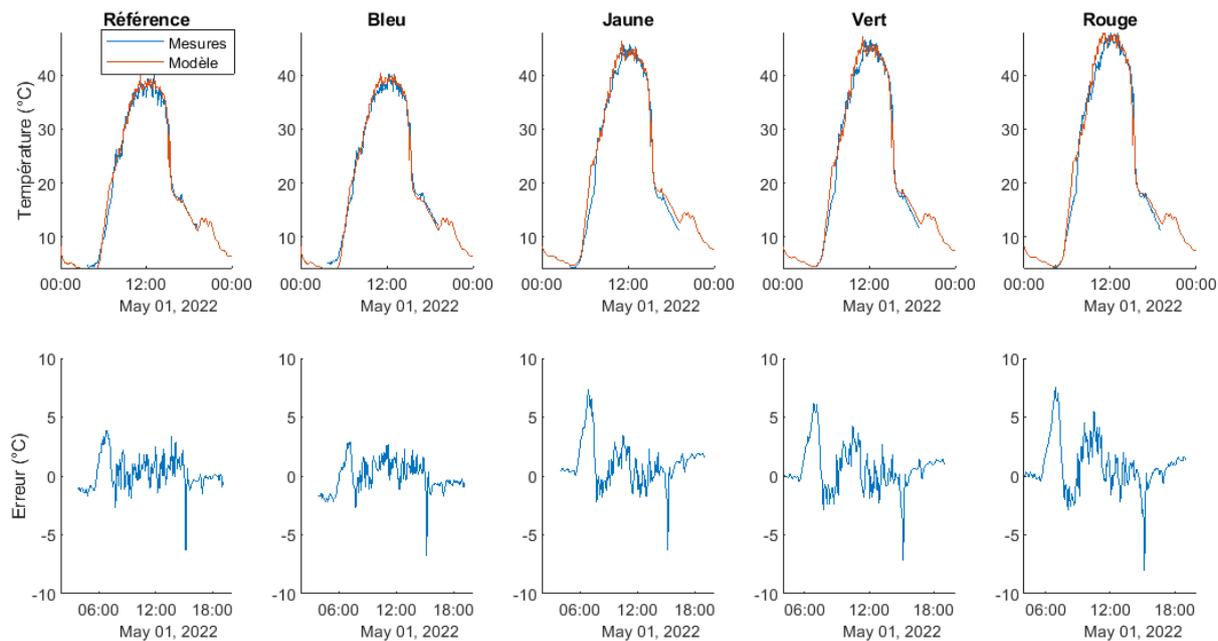


FIGURE 3.35 – Le modèle coïncide avec les mesures (journée du 1er mai 2022)

Ensuite, faire évoluer la réflectance permet d’atteindre l’amplitude désirée. Certaines ont dû être diminuées, comme le jaune (de 0.2 à 0.1), le vert (de 0.16 à 0.1) et le blanc (de 0.38 à 0.35), tandis que celles concernant le rouge et le bleu ont pu être conservées.

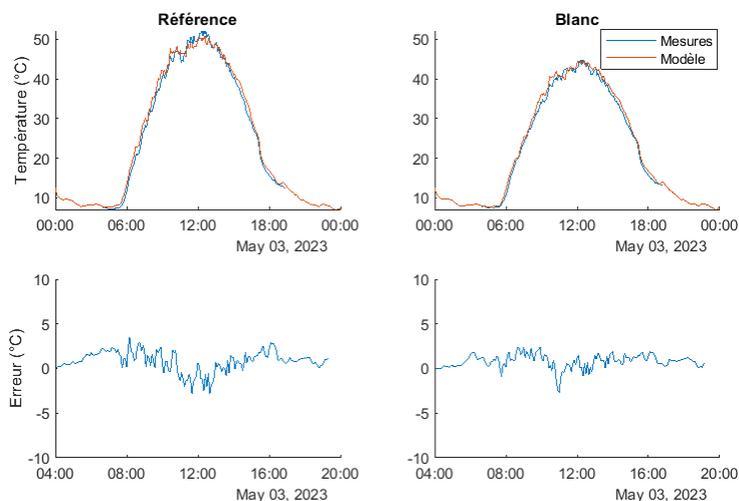


FIGURE 3.36 – Le modèle coïncident avec les mesures (journée du 3 mai 2023)

On remarquera que les couleurs dont la réflectance a dû être modifiée sont celles qui sont les plus diffusantes.

3.4.4 Répartition de l’énergie au sein des modules colorés

Une fois ces paramètres appliqués et des profils qui coïncident, on peut estimer quelles parts d’énergie représentent la conversion en électricité, la réflexion, la convection et le rayonnement pour chaque module. (figure 3.37, figure 3.38).

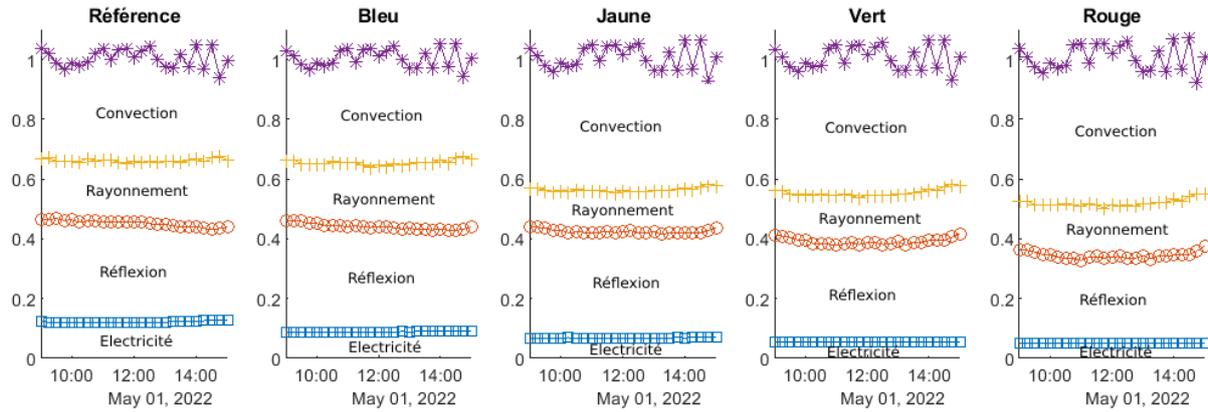


FIGURE 3.37 – Répartition de l'énergie au sein des modules colorés pour la journée du 1er mai 2022. Les courbes délimitent les proportions occupées par chaque type d'échange au cours du temps

La part de l'énergie qui n'est ni réfléchiée par le module, ni convertie en électricité, est absorbée par le module et est donc responsable de son échauffement. La chaleur est ensuite dissipée par convection et rayonnement. La somme de ces deux parts d'énergie représentent donc directement la part d'énergie absorbée par le module.

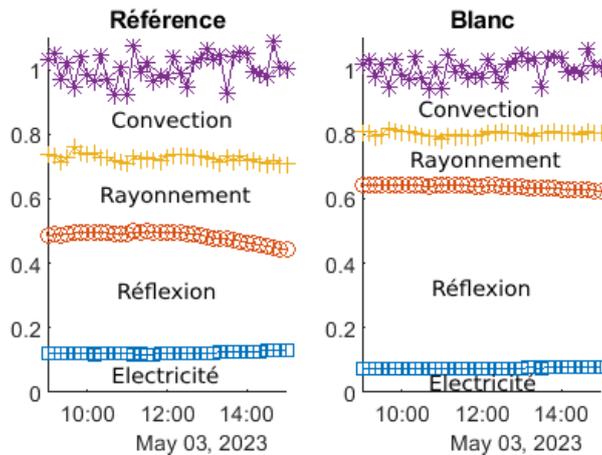


FIGURE 3.38 – Répartition de l'énergie au sein des modules pour la journée du 3 mai 2023 (cas du blanc)

On observe bien que le classement par ordre croissant des modules les plus chauds respecte le classement par ordre croissant de ceux qui ont les parts d'énergie dissipées en chaleur les plus importantes. Ainsi, moins de 40% de l'énergie reçue par le module blanc est transformée en chaleur, tandis que cette part est supérieure à 60% dans le cas du module rouge. Selon les valeurs d'émissivité appliquées, les parts d'énergie rayonnées sont différentes entre les modules. Dans les cas des modules jaune, vert et rouge, cette part représente environ un quart des échanges thermiques, tandis que cette part est plutôt d'environ un tiers pour le module de référence et le module bleu. Enfin, le cas spécifique du module blanc (figure 3.38), plus réfléchissant et plus émetteur, fait que cette part représente environ la moitié des échanges thermiques.

Les pertes de production électrique sont mesurées et connues à chaque instant. Celles-ci indiquent également la quantité d'énergie qui a atteint la cellule PV et permet donc d'estimer

la part d'énergie qui a été réfléchi et/ou absorbée en amont. Le paramètre responsable de ces différences est donc la part d'énergie réfléchi, qui repose sur des mesures expérimentales. Les encres ayant des propriétés diffusantes et le protocole expérimental réalisé ne permettant pas de déterminer la quantité d'énergie qui est diffusée, il se peut que la quantité d'énergie totale qui est réfléchi soit bien différente dans la réalité que pour les mesures en conditions contrôlées. De plus, les mesures ont été effectuées sur des verres non encapsulés, avec un absorbeur noir, tandis que les modules étudiés en conditions réelles sont des verres encapsulés avec une cellule PV.

3.4.5 Bilan de l'analyse des échauffements des modules colorés en conditions extérieures

D'importantes différences d'échauffement ont été observées entre les modules colorés lors des mesures en conditions réelles. L'utilisation d'un modèle thermique et la détermination de paramètres pour faire coïncider les profils avec les mesures a permis de montrer des différences dans la répartition de l'énergie au sein des modules, notamment au niveau de l'énergie rayonnée. Un abaissement de la valeur des émissivités a été nécessaire pour les encres jaune, rouge et verte. Le caractère émetteur des encres dépendant de leur état de surface et de leur texturation. Cependant, elles constituent des milieux semi-transparentes dans le domaine visible et le sont peut-être également dans le domaine infrarouge. Dans ce genre de milieu, ce sont la porosité, la nature des pigments, la taille des particules et l'épaisseur optique qui influent sur l'émissivité globale de l'objet sur lesquels elles sont imprimées. Les précédentes mesures optiques et les coefficients K/S déterminés dans le domaine visible entre les encres montrent déjà que celles-ci ne sont pas identiques en composition et en géométries, rendant également probable l'impact de ces propriétés dans le domaine infrarouge et sur leur émissivité. La littérature montre que l'émissivité décroît en fonction de la rugosité de surface du verre, elle-même responsable du caractère diffusif d'une surface. Le cas particulier de l'encre blanche, où l'émissivité a été maintenue à la valeur de 0.8, donne un indice sur son caractère diffusant, qui semble moins important que les encres rouge, verte et jaune dans le domaine infrarouge. Toutefois, il faut remarquer que le coefficient K/S quantifie l'importance du phénomène de diffusion sur l'absorption, et non la diffusion seule. Le blanc absorbant très peu dans le domaine visible, son coefficient K/S est très faible. Ce n'est pas pour autant que son caractère diffusif est plus important que les encres qui ont un coefficient K/S plus important.

Enfin, les phénomènes de diffusion dans les encres augmentent le risque d'incertitude quant aux mesures de réflectances réalisées avec le spectrophotomètre, si bien que certaines valeurs ont dû être diminuées pour que les profils entre mesures et modèle coïncident (en particulier pour l'encre jaune). De plus, l'intensité de la diffusion varie suivant l'angle d'incidence et l'encre considérée. Malheureusement, ces phénomènes n'ont pas fait l'objet de notre étude et sont donc probablement responsables des différences entre les valeurs de réflectances implémentées dans le modèle et les quantités d'énergie réellement réfléchi lors de la campagne expérimentale.

En plus d'estimer leur impact sur l'échauffement des modules, les encres sont également étudiées d'un point de vue qui concerne le vieillissement U-V

3.5 Analyse du vieillissement des modules imprimés aux rayons UV

Après 900 heures à 80°C et 130 kWh d'éclairement UV, 7 points de mesures au flash test ont pu être réalisés pour chaque mini-module coloré et le module de référence. Les résultats concernant les principales grandeurs sont montrés figure 3.39. On peut y observer, la puissance maximum délivrée P_{mpp} , le courant de court-circuit I_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{oc} et le facteur de forme FF pour 7 mini-modules avec face avant imprimée et un module de référence sans impression.

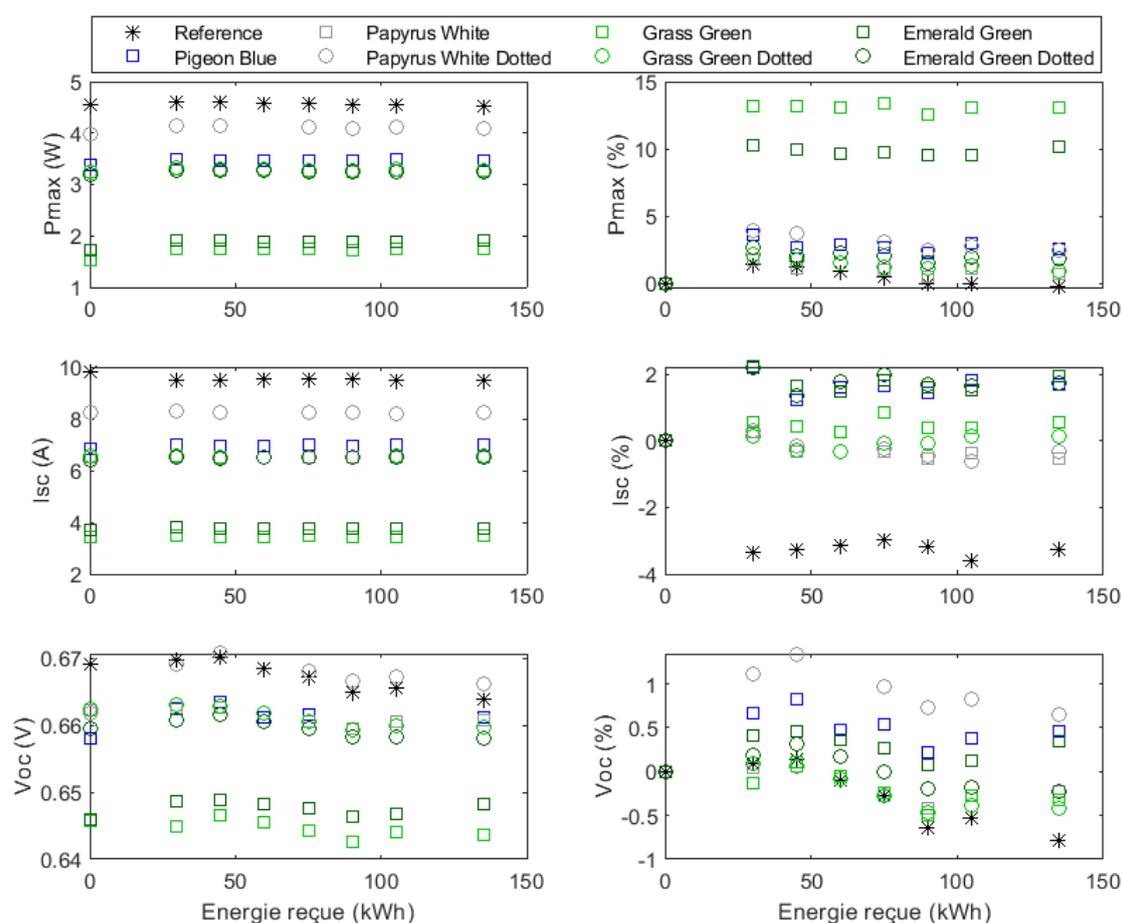


FIGURE 3.39 – Profils de vieillissements UV de 8 mini-modules. À gauche, l'évolution des valeurs absolues des grandeurs en fonction de la quantité d'énergie reçue. A droite, l'évolution de l'écart par rapport à la valeur initiale avant vieillissement

Concernant la puissance maximum délivrée par les modules, plusieurs remarques peuvent être faites. D'abord, le premier point de mesure réalisé après 30 kWh d'éclairement UV montre une augmentation systématique de la puissance délivrée, si bien que l'ensemble des points de mesures réalisés restent supérieurs au point initial réalisé avant vieillissement, et ce, pour l'ensemble des modules étudiés. Concernant le module de référence, la puissance délivrée par celui-ci augmente d'environ 2% après 30 kWh d'éclairement, puis décroît au fur et à mesure du vieillissement jusqu'à retrouver la valeur initiale obtenue avant vieillissement. La littérature montre que ce phénomène de bonification des cellules monocristallines lors des 30 premiers

kWh d'éclairage est bien connue des spécialistes. Cependant, dans le cas de cette campagne expérimentale, cette augmentation n'est pas la même suivant la couleur d'impression. Les modules nommés Grass Green et Emerald Green, ayant des caractéristiques très proches (car tous deux comportent une impression de couleur verte sur toute leur surface), montrent des augmentations respectivement de 14% et 10%. Ces modules étant les moins efficaces du lot avec des pertes de puissance d'environ 70% dues à leur couleur, une légère augmentation de puissance représente ainsi une importante variation relative. Au final, malgré quelques variations des mesures, ces modules sont toujours plus efficaces après 130 kWh d'éclairages qu'avant, de 14% et 10%. Ces tendances sont les mêmes pour les autres modules, seule diffère la valeur de l'augmentation suivant la couleur étudiée. Ces modules n'ont donc globalement pas vieilli, et ont tous de meilleurs résultats relatifs que le module de référence. Une hypothèse concernant ces résultats serait que les couches imprimées céramiques subissent des dégradations à cause du rayonnement UV, modifiant leurs propriétés optiques au profit de la transmission solaire. Pour estimer au mieux l'impact de la couleur sur le processus de vieillissement, il convient d'étudier les courants de court-circuit, directement liés au rayonnement incident et à la face avant.

Les variations de courant de court-circuit nous renseignent sur les variations de propriétés optiques de la face avant. Le module de référence est l'unique module montrant une importante chute de courant (environ 3,5%), et ce dès les 30 premiers kWh. Après quelques variations, la chute de courant reste autour de 3%. Alors que les variations des modules Papyrus White et Grass Green oscillent entre +1% et -0.5%, les modules Emerald Green et Pigeon Blue montrent une amélioration de courant de 2% dès les 30 premiers kWh. On peut remarquer que les modules tramés "Dotted" montrent des variations de courant de court-circuit très proches de celles des modules comportant une impression pleine couche de la même couleur. La couleur semble donc être un paramètre régissant la variation des courants délivrés au cours du vieillissement. La couche imprimée fait donc office de protection contre les UV, empêchant le courant de court-circuit de chuter au cours du temps. Le fait que celui-ci puisse être plus élevé après vieillissement plutôt qu'avant renforce l'idée que le rayonnement UV dégrade les propriétés optiques des encres, améliorant la transmission solaire.

Les variations de tension de circuits ouverts respectent la même tendance pour chaque module, si bien que les profils ne se croisent quasiment jamais : une augmentation lors des premiers 45 kWh, puis une diminution progressive jusqu'à 110 kWh, où une légère augmentation est mesurée. Finalement, les modules Papyrus White Dotted, Pigeon Blue et Emerald Green donnent des V_{oc} plus élevés de moins de 1%, tandis que les modules Emerald Green Dotted, Grass Green, Grass Green Dotted montrent des chutes de moins de 0.5%. C'est le module de référence qui subit le plus de chute de tension avec moins de 1%.

Des mesures colorimétriques réalisées entre chaque phase de vieillissement ne donnent aucun changement dans la gamme de longueur d'onde visible.

3.6 Conclusion du chapitre 3

Les encres céramiques ont été observées au microscope, révélant le caractère hétérogène et diffusif de ces milieux, tout en montrant également leurs différences de porosité et de tailles de particules. Les notions théoriques d'optique ont permis d'appréhender le comportement de la lumière en leur sein et de mettre en évidence le rôle important du paramètre de taille sur l'intensité de la rétrodiffusion. L'analyse des mesures spectrales a par la suite permis de déterminer les quantités d'énergie mises en jeu lors des phénomènes de réflexion, transmission et absorption

de chaque encre. L'étude a également montré qu'une épaisseur d'encre plus importante entraîne à la fois des pertes en réflexion et en transmission, plus ou moins importante selon les encres et leur concentration en pigments. La caractérisation I-V des modules fabriqués a ensuite montré d'importantes disparités entre les mesures expérimentales et les calculs théoriques de performance PV basés sur les mesures spectrales. En effet, les performances observées en flash-test sont environ 25% plus importantes que les résultats de calculs. De plus, les écarts sont corrélés avec les coefficients K/S des encres et montrent donc les difficultés qu'impliquent les milieux diffusifs pour quantifier les phénomènes optiques et estimer la répartition globale de l'énergie.

Les mesures de température en conditions réelles ont montré des échauffements différents selon la couleur du module. Certains atteignent 10°C de plus que la référence (rouge, vert, jaune), tandis que le module blanc peut atteindre 10°C de moins. La confrontation de ces résultats avec un modèle thermique a montré que la réflectance n'était pas le seul paramètre responsable de ces différences d'échauffements. En effet, un faible refroidissement radiatif des modules rouge, vert et jaune est une hypothèse qui permet de faire coïncider les mesures avec le modèle. Selon la littérature, l'émissivité des milieux hétérogènes dépend de leur porosité et de leur rugosité de surface.

Le travail a été complété d'une campagne de vieillissement sous éclairage UV de mini-modules imprimés, qui a montré des variations de courant de court-circuit (et donc de puissance) différentes selon les couleurs. Ainsi, malgré des pertes en puissance importantes déjà présentes avant vieillissement, il semble que les impressions de couleurs vertes protègent davantage la cellule PV des rayons UV que les impressions grise, blanche et bleue étudiées.

Les encres ayant été étudiées énergétiquement, un point de vue esthétique doit maintenant être considéré pour déterminer des paramètres à optimiser.

4 Optimisation esthétique des modules PV

4.1 L'intégration visuelle par imitation de l'environnement

L'évaluation de la qualité esthétique dépend souvent de l'avis subjectif de l'observateur. C'est pourquoi il est important de déterminer des critères objectifs adaptés au sujet permettant de quantifier cet aspect. Par exemple, un critère qui peut être considéré comme universel pour n'importe quel type d'objet est la visibilité. Il peut paraître évident qu'un objet que l'on ne voit pas est forcément esthétique. En effet, le simple fait que l'objet soit camouflé limite le questionnement au sujet de sa qualité esthétique. Un deuxième critère important est l'intégration dans son environnement. Un objet est souvent considéré esthétique lorsque son aspect se marie bien avec le reste de l'environnement dans lequel il est placé. Par exemple, une maison neuve peut être évaluée esthétique au milieu d'un quartier résidentiel nouveau, tandis qu'elle peut être jugée inesthétique au milieu d'un quartier historique classé, car ne sera pas en harmonie avec le reste de son environnement.

Le degré d'intégration visuelle, c'est-à-dire la capacité à rendre invisible ou indiscernable un module BIPV, peut donc être un critère esthétique objectif, qui plairaient au plus grand nombre. La conception dans ce travail orientera donc les démarches vers des aspects unis, non contrastés, proches de celui du paysage urbain, de manière à ce que ces modules soient fondus dans leur environnement.

Une intégration camouflée vérifie en premier abord un faible contraste visuel entre les objets et leur environnement [66].

4.1.1 Réduction de contraste au sein du module PV à l'aide d'interconnexions et encapsulant noirs

Le contraste visuel est la différence d'aspect entre les objets. Il peut être observé des contrastes en termes de luminosité, de couleurs ou encore de texture. Dans le cas des matériaux du paysage urbain comme le béton, la pierre, le bois ou la brique, les teintes les plus représentées sont des nuances de blanc, de gris, de jaune, de rouge et de marron, avec des textures de surface diffusantes donnant des aspects mates. La face avant des modules PV en verre permet à ceux-ci de s'intégrer naturellement au sein de grandes façades vitrées, à condition que la transmission de ce verre soit diffuse, empêchant de distinguer la présence de cellules PV. Cependant, leur couleur noire sera toujours distinguée. Une réflexion importante de type miroir comme observé sur certains gratte-ciels permet de ne plus distinguer ce qu'il y a derrière, camouflant les modules BIPV en leur sein. Néanmoins, une réflexion trop importante a un impact significatif sur la production d'énergie.

Les modules PV conventionnels sont facilement repérables, car la couleur sombre des cellules PV contraste fortement avec le fond blanc en Tedlar®. Le placement d'un fond noir derrière les cellules réduit fortement la capacité à distinguer leur contour et donc leur présence.

Enfin, les interconnexions du squelette du module PV sont en général brillantes, car constituée d'argent en surface. Elles trahissent facilement la présence des cellules PV. La figure 4.1 montre différents aspects que peut avoir un module avec encapsulant noir suivant la couleur des interconnexions, le type de verre en face avant ou encore le type de cellule PV. Sur les deux premiers modules, les interconnexions sont brillantes et bien visibles sur le fond noir que forment les cellules et l'encapsulant, tandis que sur le troisième les interconnexions noires diminuent grandement le contraste avec les cellules. Cependant, celles-ci étant seulement des interconnexions en argent colorées en noir en surface, elles restent légèrement réfléchissantes et discernables de prêt. De même, le contraste entre les couleurs des cellules et de l'encapsulant est observable de prêt, mais cela n'est plus le cas lorsque l'observateur se trouve à une dizaine de mètres. Enfin, l'utilisation d'un verre sans traitement de surface entraîne une réflexion spéculaire et la vision d'autres objets, tandis qu'un verre texturé supprime les reflets (on ne discerne donc pas le photographe sur la photo qui est prise de face).



FIGURE 4.1 – De gauche à droite : Module avec cellules HET, encapsulant noir, verre sodo-calciq, interconnexions brillantes ; Module avec cellule PERC, encapsulant noir, verre sodo-calciq, interconnexions brillantes ; Module avec cellule PERC, encapsulant noir, verre texturé interfloat, interconnexions noires

Utiliser un encapsulant et des interconnexions de la même couleur que les cellules, ici noire, diminue de manière significative les contrastes à l'intérieur du module et augmente ses capacités à être camouflé. En ajoutant une face avant avec une couleur et une texture proche de son environnement, il n'est plus possible de discerner ni les cellules, ni les interconnexions (figure 4.2) et le degré d'intégration visuel du module PV est augmenté davantage.

4.2 Aspects obtenus selon les impressions réalisées sur la face avant : tramages et pixelisations

La face avant d'un module BIPV étant dans la grande majorité des cas en verre pour des questions de solidité et de protection, l'utilisation de la technologie d'impression numérique sur verre se présente comme une option esthétique que l'on peut choisir, en ajoutant seulement l'étape d'impression à la chaîne de conception déjà existante. Une vitre possédant deux faces,

l'une peut être imprimée tandis que l'autre reste disponible pour une éventuelle texturation de surface. Le choix d'inclure ces deux options implique de positionner la face imprimée à l'intérieur de l'empilement, pour que l'effet de texturation soit visible à l'extérieur. Positionnée à l'extérieur, la face imprimée présente une réflexion située entre le mode spéculaire et le diffus (satinée) (voir figure). Pour faciliter l'étude et les comparaisons des couleurs, c'est dans cette configuration que la majorité d'entre eux ont été conçus.

Pour évaluer ce que peuvent apporter les impressions céramiques en face avant sur le rendu visuel, un premier test a été réalisé avec cinq impressions différentes (figure 4.2).

1. Couverture intégrale d'une couleur terracotta
2. Tramage ordonné en quinconces de la même couleur terracotta, comportant des disques de 1 mm de diamètre et espacés de 1 mm (taux de remplissage d'environ 23 %)
3. Tramage aléatoire (stochastique) de disques de 1 mm. Certains disques se chevauchent et donnent un taux de remplissage d'environ 33 %.

Pour tenter de réaliser une synthèse colorimétrique par pixelisation (dot-off-dot ou halftoning), deux dessins sont réalisés :

4. Trois trames rouge, verte et bleue sont juxtaposées et espacées de 1 mm. Chacune des couleurs est saturée au maximum, c'est-à-dire que le canal correspondant en coordonnées RGB est à la valeur 255 et que les autres canaux sont à 0. Pour respecter les pondérations dans la création de la couleur visée, les disques de chaque trame sont d'un diamètre différent. Ainsi, les taux de couverture de chacune respectent les coordonnées de la couleur visée.
5. Trame stochastique avec les mêmes paramètres.



FIGURE 4.2 – Photographie extérieure de la première série de modules conçus. De gauche à droite : 1. Trame stochastique terracotta 2. Trame stochastique pixelisée 3. Trame hexagonale terracotta 4. Trame hexagonale pixelisée 5. Pleine couverture terracotta 6. Module de référence non imprimé

4.2.1 Impact visuel de différents types de tramage et effet de moiré

La trame hexagonale donne une couleur peu saturée du fait de son faible taux de couverture. La forte présence du noir sur les 75% de la surface provoque une importante désaturation. La saturation de la couleur perçue est proportionnelle au taux de couverture en encre. Ainsi, on peut voir par les différences de couleurs que la trame hexagonale présente un taux de couverture plus faible que la trame stochastique, lui-même plus faible que la couverture intégrale (100%). La trame stochastique donne un effet de répartition des pigments d'une surface plus naturel (effet crépi), aspects souvent recherchés dans des volontés de camouflage ou d'imitation d'autres matériaux.

Finalement, les cellules et interconnexions des modules ne sont pas du tout discernables dans le cas des motifs stochastiques. Cependant, avec l'utilisation de trames ordonnées, les contours

des cellules peuvent apparaître à cause de l'effet de moiré. Il s'agit d'interférences provoquées par la superposition de plusieurs motifs périodiques et qui laissent apparaître un battement des fréquences spatiales. Dans le cas d'un module PV, les interconnexions en argent présentes sur les cellules, les "fingers", constituent une trame qui peut interférer avec une autre trame présente sur la couche imprimée, et provoquer l'effet de moiré. Ce phénomène est observable sur le module à trame hexagonale de la figure 4.3.

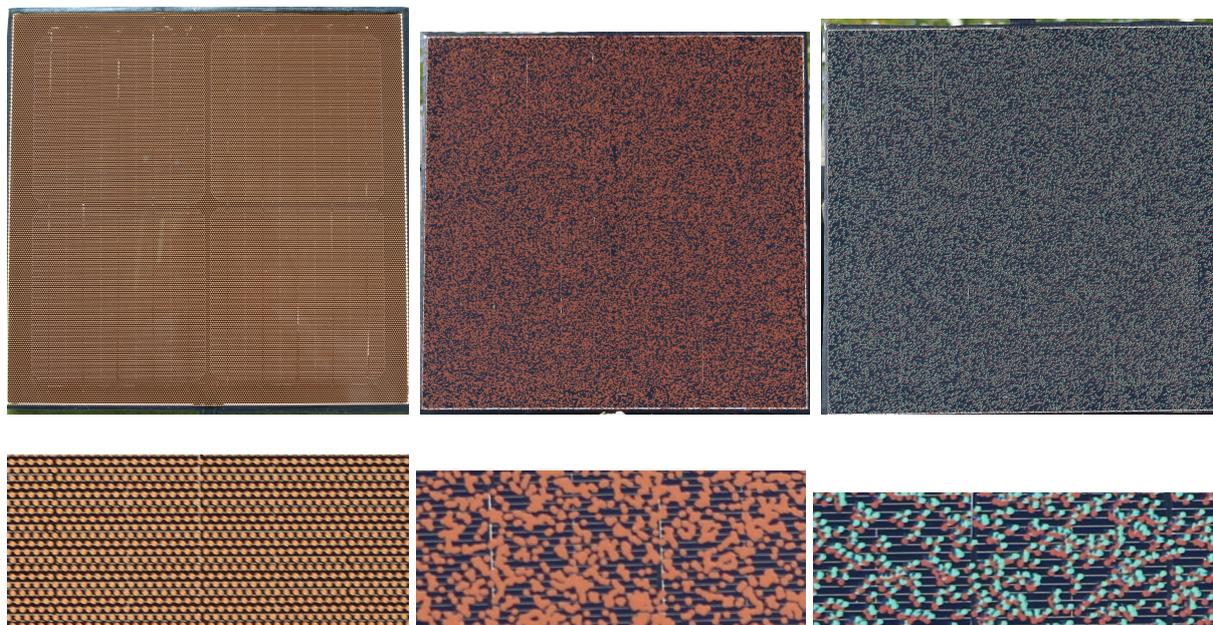


FIGURE 4.3 – À gauche : le contour des cellules est discernable à cause de l'effet de moiré produit par la trame hexagonale ; Au centre et à droite, les trames stochastiques (aléatoires) terracotta et pixelisée permet d'éviter le phénomène et le contour des cellules n'est pas discernable

Les battements ont lieu sur tout le long de la surface occupée par les cellules, laissant apparaître leur contour lorsque le phénomène ne se produit plus. Il peut être voulu et provoqué dans une démarche artistique, mais dans une recherche de camouflage des cellules, il trahit leur présence. Pour éviter le phénomène, on peut donc tenter d'utiliser une trame stochastique ou pseudo-stochastique (qui n'a pas de fréquence spatiale propre), ou bien changer la taille caractéristique des points de la trame afin qu'elle ne soit pas de la taille de l'espace entre les "fingers". Ici, la taille des points est de 1 mm alors que l'espace entre les fingers est de 1.35 mm. L'observation d'un motif tramé sur un écran provoque un effet de moiré selon l'échelle à laquelle on regarde ce motif (zoom). La présentation de photographies de motifs tramés étant importante dans ces travaux, il est possible que des effets de moirés dus à l'échantillonnage de l'image soient visibles.

4.2.2 Évaluation de l'efficacité de différentes techniques de pixelisation

Pour évaluer le potentiel esthétique et énergétique des techniques de colorisation par pixelisation, des essais de motifs tramés composés de points rouge, vert et bleu ont été réalisés. Le but des essais fut de créer une couleur terracotta par synthèse colorimétrique des pixels avec

4.2 Aspects obtenus selon les impressions réalisées sur la face avant : tramages et pixelisations

différents paramètres. A gauche de la figure 4.4, la trame est composée de disques rouges, verts, et bleus saturés au maximum et de tailles variables. Plus la taille des disques est importante, plus leur couleur est présente dans le mélange colorimétrique. Malheureusement, la surface occupée par les encres est trop faible par rapport à la surface non imprimée, laissant présente la noirceur du fond et son pouvoir désaturant. Il en résulte donc une légère teinte grise. En effet, la proportion de pixels colorés est si faible qu'il en résulte une couleur très peu saturée, un niveau de gris. Comme observé avec les modules terracotta de la figure 4.3, le taux de couverture plus important de la trame stochastique par rapport à la trame hexagonale donne une couleur globale plus saturée. Elle paraît également davantage verdâtre, mais cette légère teinte est due au chevauchement des points à certains endroits et à l'impression des points de couleur verts en dernier, par-dessus les précédents.

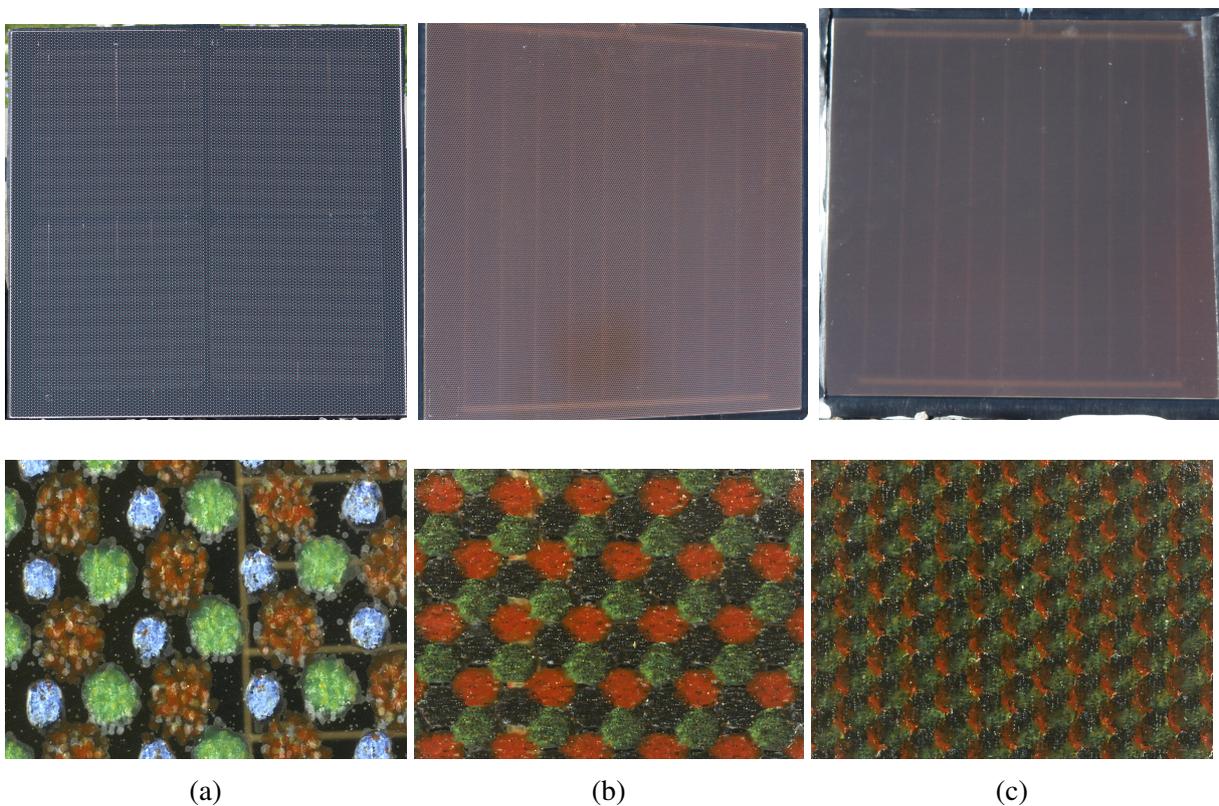


FIGURE 4.4 – Modules avec trames pixelisées : a) Disques de tailles différentes et de couleurs saturées (Disques rouges : 1 mm de diamètre); b) Disque de tailles identiques (1mm) et de couleurs sombres; c) Même trame avec des disques de 0.5 mm

Au centre et à droite de la figure 4.4 sont présentées des trames comportant des disques rouge, vert, bleu de couleurs correspondantes à chaque coordonnée du triplet colorimétrique de la couleur désirée. L'une est dessinée avec des disques de 1 mm de diamètre et l'autre avec des disques de 0.5 mm. On peut observer sur la figure 4.4 que la couleur obtenue est bien un marron, mais que celui-ci est très sombre. Ce résultat est directement lié à l'utilisation d'une encre noire, visible à l'œil nu à l'intérieur des points imprimés. Sur la figure 3.8 présentant les mélanges de couleurs de base en fonction de la couleur désirée, on observe bien que l'encre noire est utilisée pour produire des couleurs sombres. La présence de l'encre noire dans le

mélange ajoute davantage de désaturation alors qu'un fond noir est déjà utilisé.

L'impression céramique en surface du verre combinée à l'utilisation d'un encapsulant et d'interconnexions noirs empêchent de distinguer les cellules PV, augmentant le degré d'intégration visuel de ceux-ci. La couleur finale observée dépend du taux de couverture en encre du verre. Plus le taux de couverture est élevé, plus la couleur est saturée. L'avantage de la trame stochastique comparée à la trame hexagonale, en plus de donner un effet d'apparence plus naturel, est qu'elle permet d'éviter l'effet de moiré. Pour réaliser une synthèse colorimétrique à l'aide de pixels, une plus importante densité de points doit être imprimée. Pour réaliser des trames efficaces en couleur, il convient de déterminer les caractéristiques colorimétriques des encres de base et d'éviter l'utilisation de l'encre noire, contreproductive aussi bien pour l'apparition d'une couleur que pour l'efficacité énergétique.

4.3 Caractérisation colorimétrique des couleurs de base

La troisième série de modules consiste à caractériser énergétiquement les encres primaires de l'imprimante une par une, pour une même épaisseur (environ 3.5 μm , 50% de l'épaisseur maximum). Des modules fabriqués avec chacune des encres de base (exceptée la noire) imprimée sur la face extérieure sont montrés figure 4.5.

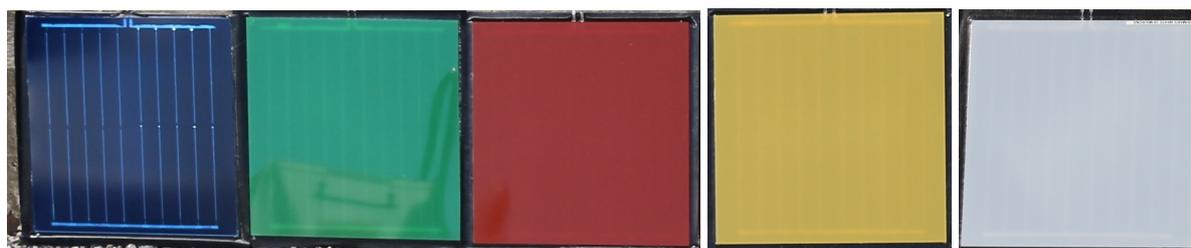


FIGURE 4.5 – Photographie extérieure des modules avec les couleurs de base située sur le côté extérieur de la face avant

Deux autres épaisseurs ont été testées dans le cas de l'encre blanche, 7 μm et 1.75 μm (respectivement 100% et 25% de l'épaisseur maximum). La différence d'aspect liée à la localisation de l'encre, à l'intérieur ou à l'extérieur du module, est également étudiée.

4.3.1 Comparaisons des aspects visuels entre configuration intérieure et extérieure

Les comparaisons d'aspect suivant la configuration pour la couleur rouge, jaune, et terracotta sont montrées figure 4.6.



FIGURE 4.6 – Photographie extérieure des modules rouges, jaunes et terracotta dans les deux types de configurations

La différence notable est le type de réflexion qui a lieu. Lorsque l'encre est à l'extérieur, celle-ci provoque une diffusion de la lumière dans les reflets, donnant un léger côté mate. Au contraire, lorsque l'encre est à l'intérieur, il se produit une réflexion spéculaire (non diffuse). Dans ce cas de figure, il est possible de modifier l'aspect du verre avec des traitements de surface comme une texturation ou l'application d'un filtre anti-reflet. Sur les modules à configuration extérieure, le type de réflexion dépend de l'encre qui est déposée à la surface. Ainsi, les encres verte et rouge montre des réflexions majoritairement spéculaire et légèrement diffuse, tandis que les encres jaune et blanche sont plus diffusantes. Cette tendance respecte celle des rapports K/S mesurés (figure 3.15). L'encre bleue est ainsi si peu diffusante qu'elle réfléchit de manière totalement spéculaire, comme un verre classique non texturé. Sur les modules à configuration intérieure, la réflexion observée est complètement spéculaire, puisque la surface rencontrée est du verre non texturé. Dans cette configuration, il y a donc davantage d'options et de libertés quant au choix du type de réflexion voulue et de la texturation correspondante. Le détail des mesures colorimétriques sera présenté par la suite dans la section qui traite du compromis entre couleur et performance (figure 4.18), et montrera dans les trois cas une chute de chromaticité et de luminance lorsque la configuration passe d'extérieur à intérieur.

4.3.2 Impact visuel de l'épaisseur d'encre : cas du blanc

Seule l'encre blanche a pu être testée selon plusieurs épaisseurs sur des modules PV figure 4.7.



FIGURE 4.7 – Modules blancs avec différentes épaisseurs d'encre. De gauche à droite : 3.5 µm (50%), 7 µm (100%) et 1.75 µm (25%)

Comme attendu, plus l'épaisseur d'encre est importante et plus la vitre est opaque. Ainsi, lorsque l'épaisseur vaut environ 1.75 µm (25%), il est encore possible de discerner les inter-

connexions (non noires). Lorsqu'elle vaut $3.5 \mu\text{m}$ (50%), il est encore possible de les deviner lorsque l'observateur est proche. Enfin, lorsque l'épaisseur vaut environ $7 \mu\text{m}$ (100%), une couche blanche opaque empêche de discerner au travers du verre. Nous confirmerons par la suite (figure 4.18) qu'une augmentation d'épaisseur d'une encre permet bien d'augmenter la Luminance L^* .

4.3.3 Résultats de mesures obtenues grâce au colorimètre

Lorsque des mesures colorimétriques sont réalisées, celles-ci dépendent du spectre émis par la source, mais aussi de quelles bornes "noire" et "blanche" sont considérées lors de l'étalonnage de l'appareil. Les valeurs montrées ici sont obtenues selon la calibration du colorimètre à effectuer avant chaque utilisation, en utilisant un étalon blanc et un étalon noir fournis avec l'instrument. L'illuminant utilisé ici est le D65, le plus standardisé. Les valeurs absolues de ces mesures peuvent donc être comparées avec la plupart des données colorimétriques qui utilisent ce même standard.

4.3.3.1 Impact de l'épaisseur sur les coordonnées colorimétriques

La figure 4.8 montre la répartition spatiale des couleurs selon leur teinte h^* et leur Chrominance C^* , ainsi que les valeurs de leurs luminances.

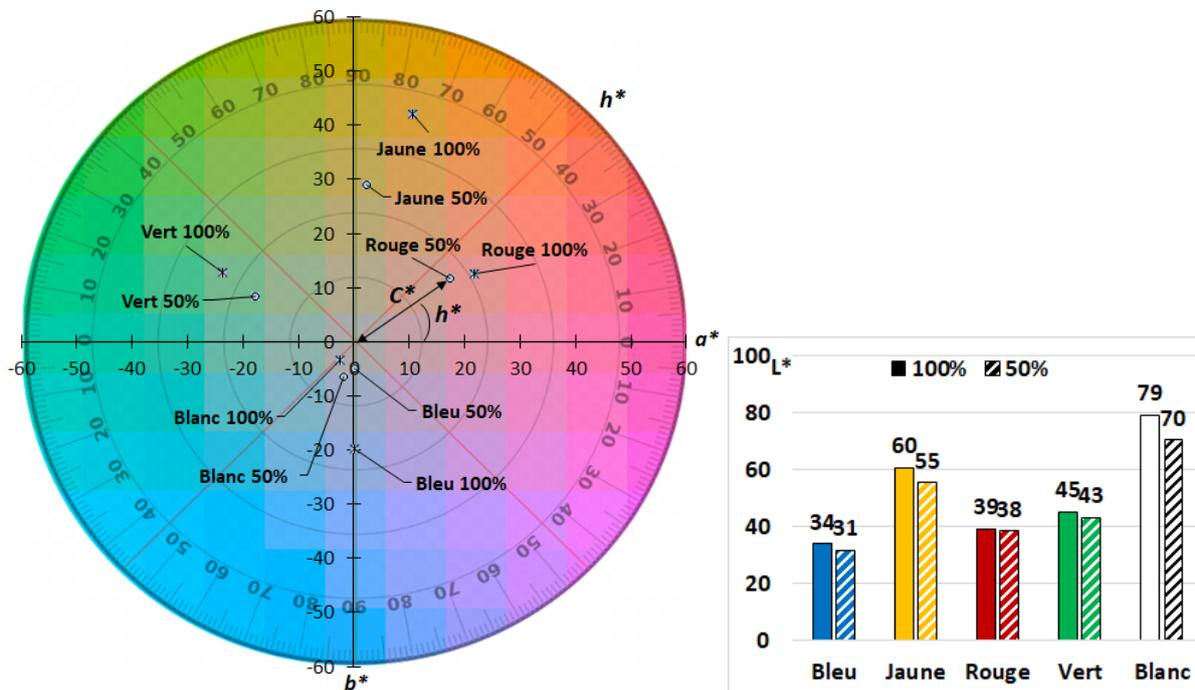


FIGURE 4.8 – Évolution des coordonnées colorimétriques en fonction de l'épaisseur. À gauche, la répartition spatiale des couleurs selon les coordonnées a^* , b^* , C^* , h^* ; À droite, les coordonnées de luminance L^*

Pour chaque couleur primaire, une augmentation d'épaisseur de 50% à 100% (d'environ $3.5 \mu\text{m}$ à $7 \mu\text{m}$) est responsable d'une augmentation de luminance, qui diffère selon la couleur.

Ainsi, ce sont des augmentations d'environ 13 %, 9% et 10% qui sont observées pour les encres blanche, jaune et bleue, tandis que les valeurs sont d'environ 5% et 3% pour les encres verte et rouge. Contrairement aux autres couleurs où une augmentation d'épaisseur entraîne une augmentation de Chrominance C^* (figure 4.9), l'effet contraire est observé avec l'encre blanche. En effet, la nature même de la couleur blanche, définie comme un équilibre des couleurs de l'arc-en-ciel et où la saturation est nulle, provoque une chute de chrominance lorsqu'on augmente sa quantité. Le blanc permet ainsi de désaturer une couleur tout en augmentant sa luminance. La teinte est représentée par la valeur d'un angle sur une roue. Pour toutes les encres primaires, une augmentation d'épaisseur entraîne une diminution de cette valeur, c'est-à-dire un décalage vers le sens horaire de la roue, allant de 2° à 19° pour le blanc. Ce dernier n'ayant par nature pas de teinte, car en théorie situé au centre de la roue, parler d'une variation de teinte n'a pas vraiment de sens. Ces décalages de teinte sont traduits physiquement par un décalage du pic de longueur d'onde au sein de la réflectance spectrale. La valeur ΔE détermine la distance euclidienne dans cet espace entre les couleurs de deux épaisseurs d'une même encre telle que : $\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$. Celle-ci est directement corrélée avec les écarts de chrominance et de luminance.

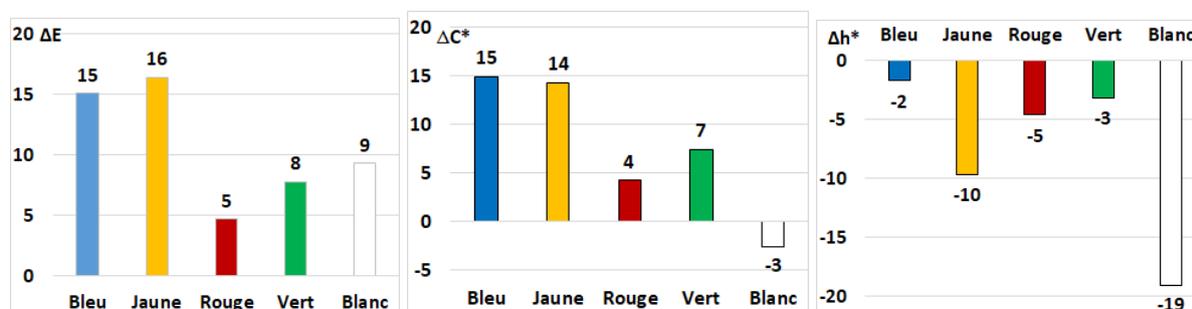


FIGURE 4.9 – De gauche à droite : la distance euclidienne ΔE , les différences de chrominance ΔC^* et de teinte Δh^* entre les deux épaisseurs étudiées

La luminance et la chrominance des couleurs sont directement liées à l'épaisseur de la couche imprimée. Comme expliqué dans le chapitre précédent (section 3.1.6), l'approximation de Kubelka-Munk montre qu'il existe une épaisseur limite à partir de laquelle la réflectance devient constante (appelée R_∞) et ces valeurs ne sont plus modifiées. Cette tendance est le résultat d'un comportement exponentiel de ces grandeurs en fonction de l'épaisseur. Cette non-linéarité ne permet pas de déterminer un comportement général décrit par des valeurs précises. Cependant, les mesures donnent une bonne vision sur le sens et le taux de variations des paramètres pour une épaisseur donnée. Ainsi, on peut affirmer que plus l'écart de coordonnées colorimétriques est faible entre 2 épaisseurs, plus on approche de l'épaisseur limite et de R_∞ .

Pour des applications spécifiques et l'observation de variations à des échelles plus adaptées, les bornes noires et blanches considérées peuvent être changées. Cependant, changer de calibration ne permet plus de comparer avec d'autres objets, imprimante, scanner ou afficheurs du marché dont les couleurs ont été caractérisées avec les paramètres standards. La calibration standard choisie pour ces mesures permet donc de comparer le gamut des encres céramiques avec d'autres gamuts.

La détermination des coordonnées colorimétriques des encres en fonction de l'épaisseur donne la possibilité de déterminer l'ensemble des couleurs qui peuvent être réalisées grâce à un mélange d'entre elles.

4.3.4 Détermination de l'espace des couleurs réalisables (gamut) avec les encres céramiques

Les coordonnées RGB des verres imprimés avec l'épaisseur maximum des encres primaires ont été mesurés à l'aide du colorimètre. Ils sont présentés figure 4.10 à la manière des canaux RGB d'une couleur sur ordinateur.

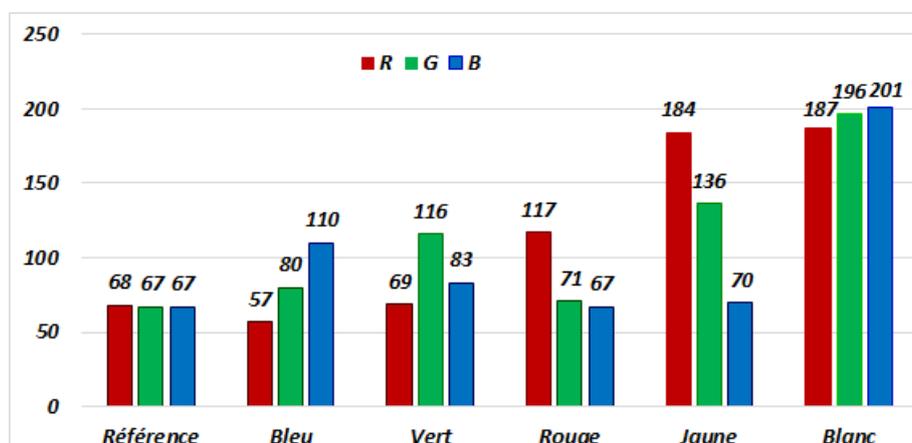


FIGURE 4.10 – Coordonnées RGB des modules colorés avec l'épaisseur maximum

La différence de valeurs entre les canaux informe sur le caractère saturé de la couleur (les modules de référence et blanc sont ainsi très peu saturés), tandis que leur somme informe sur la luminance (les modules jaune et blanc sont donc les plus lumineux). Grâce aux résultats de mesures colorimétriques de chaque encre primaire, un gamut, c'est-à-dire l'espace des couleurs réalisables, a été déterminé au sein d'un diagramme de chromaticité (figure 4.11). Ce diagramme est une projection 2D de l'ensemble XYZ sur un des plans où les couleurs ont des luminances égales. Les couleurs illustratives de cette figure ont toutes la luminance au maximum (le centre est donc blanc et non gris). Ce gamut a été réalisé en utilisant les mesures obtenues pour la valeur d'épaisseur la plus importante réalisable par l'imprimante, autour de 7 μm . Ce gamut est donc propre à l'utilisation de ces encres céramiques précises, au sein de cette imprimante donnée.

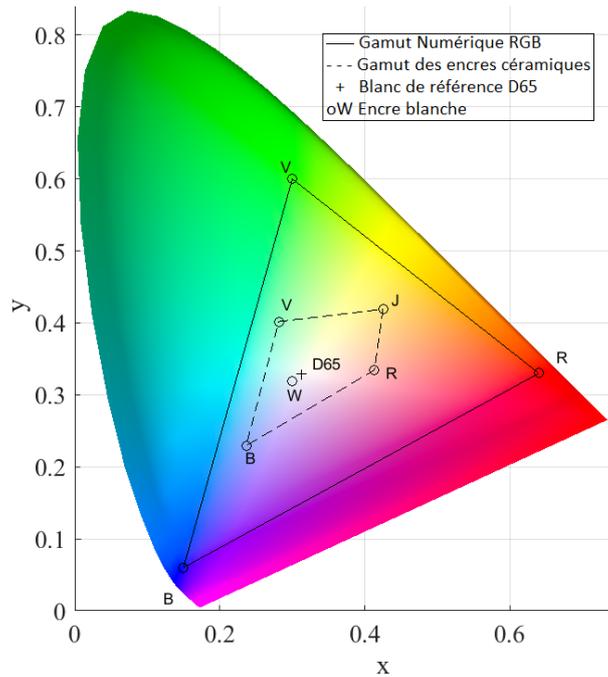


FIGURE 4.11 – Espace colorimétrique réalisable avec les encres céramiques (gamut) sur un diagramme de chromaticité

Ce gamut est comparé à celui décrit par les coordonnées numériques sRGB, qui est le système de coordonnées pouvant décrire le plus de nuances, et qui est utilisé pour les écrans des ordinateurs. Ce système de coordonnées permet de représenter 35% de l'ensemble des couleurs pouvant être perçue par les humains. La surface occupée par le gamut des encres est bien plus petit que celui-ci. En effet, les chromaticités des encres sont beaucoup plus concentrées autour du point blanc, si bien que seulement 17% des nuances du système RGB et 6% de l'ensemble des nuances visibles peuvent être reproduites. L'ajout d'une quatrième encre de base, jaune, permet d'agrandir l'espace et d'atteindre davantage de nuances. Les vecteurs générant l'espace des couleurs réalisables au sein du cube RGB sont également présentés figure 4.11.

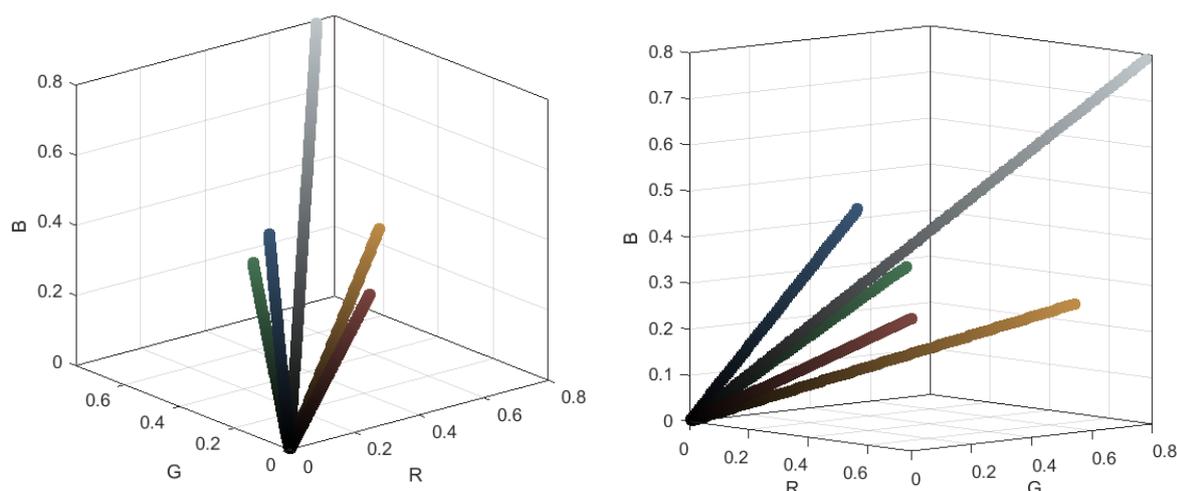


FIGURE 4.12 – Les cinq vecteurs engendrant le volume des couleurs réalisables dans l'espace RGB. Deux vues différentes permettent de se représenter le volume octaédrique dans l'espace

En rejoignant les extrémités des vecteurs, le volume délimité est un octaèdre irrégulier. En effet, les vecteurs n'ont pas tous la même norme. Plus la norme est grande, et plus l'encre a la capacité d'imposer sa couleur aux autres lors d'un mélange (à quantité égale). On appelle cette capacité le pouvoir colorant. Son intensité est proportionnelle à la quantité de pigment qui la compose. Ainsi, l'encre blanche est nettement plus puissante que les autres pour imposer sa couleur. Plus précisément, le blanc présentant un spectre plat, l'encre permet d'augmenter grandement la luminance du résultat malgré une baisse de saturation (déplacement vers le centre du gamut). Grâce à la détermination des coordonnées RGB des modules avec chaque encre primaire, une méthode d'optimisation par pixelisation a été testée.

4.4 Élaboration et test d'une méthode pour optimiser l'esthétique et la performance des modules colorés : hypothèse de la linéarité

Sachant que seulement 3 couleurs permettent de réaliser des synthèses colorimétriques additives, il est possible d'élaborer une méthode d'optimisation énergétique d'une couleur voulue. En effet, en considérant l'impact énergétique et colorimétrique de l'épaisseur de chaque encre, un problème d'optimisation peut être posé et résolu par un algorithme numérique. La réflectance et l'intensité de la lumière varient de manière non linéaire avec l'épaisseur des encres, tout comme leur transmittance et l'énergie produit par les modules PV. Cependant, résoudre un problème d'optimisation non linéaire est complexe et demande d'importants moyens mathématiques et informatiques, si bien que de nombreuses techniques consistent à linéariser les expressions mathématiques avant d'appliquer un algorithme d'optimisation linéaire connu, comme la méthode du simplexe.

Le but de l'algorithme est de déterminer les combinaisons de couleur les plus efficaces pour obtenir une couleur voulue par mélange colorimétrique, tout en minimisant les pertes énergétiques. C'est-à-dire, les meilleurs couples $(\epsilon, p)_k$ de fractions d'épaisseur et de pertes de

4.4 Élaboration et test d'une méthode pour optimiser l'esthétique et la performance des modules colorés : hypothèse de la linéarité

chaque encre k telles que :

La fonction de pertes P , représentée par la somme des produits des épaisseurs et des pertes liées à chaque encre soit minimisée :

$$P((\epsilon_k)_{1 \leq k \leq 5}) = \sum_{k=1}^5 |\epsilon_k \cdot p_k| \quad (4.1)$$

La synthèse colorimétrique linéaire est validée, c'est-à-dire :

$$(R, G, B)_y = \sum_{k=1}^5 \epsilon_k \cdot (R, G, B)_k \quad (4.2)$$

avec ϵ_k la quantité de chaque couleur k , représentée par la fraction d'épaisseur telle que $\epsilon_k = \frac{z_k}{z_{k,max}}$

4.4.1 Utilisation de l'algorithme du simplexe pour résoudre le problème d'optimisation linéaire

L'algorithme d'optimisation qui utilise la méthode simplexe est l'un des plus populaires pour la résolution des problèmes d'optimisation linéaire. Il est en effet très facile de l'utiliser via des outils disponibles en ligne. Il suffit seulement de donner une fonction objectif à minimiser, la matrice des coefficients pondérateurs ainsi que le membre de droite tel que :

$$\begin{bmatrix} 190 & 189 & 57 & 69 & 121 \\ 198 & 139 & 86 & 115 & 68 \\ 202 & 71 & 116 & 83 & 62 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_w \\ \epsilon_y \\ \epsilon_b \\ \epsilon_g \\ \epsilon_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_y \\ G_y \\ B_y \end{bmatrix}$$

L'algorithme cherche donc à minimiser la fonction objectif :

$$\min P = 0.35\epsilon_w + \epsilon_y \cdot 0.39 + \epsilon_b \cdot 0.22 + \epsilon_g \cdot 0.52 + \epsilon_r \cdot 0.56$$

et à vérifier le système d'équation suivant :

$$190.\epsilon_w + 189.\epsilon_y + 57.\epsilon_b + 69.\epsilon_g + 121.\epsilon_r = R_y$$

$$198.\epsilon_w + 139.\epsilon_y + 86.\epsilon_b + 115.\epsilon_g + 68.\epsilon_r = G_y$$

$$202.\epsilon_w + 71.\epsilon_y + 116.\epsilon_b + 83.\epsilon_g + 62.\epsilon_r = B_y$$

Il est nécessaire d'indiquer également le domaine de définition des solutions :

$$0 \leq \epsilon_w, \epsilon_y, \epsilon_b, \epsilon_g, \epsilon_r \leq 1$$

Une fois terminé, il retourne trois valeurs de fractions d'épaisseurs non nulles et deux autres nulles.

4.4.2 Résultats issus de l'algorithme du simplexe

Les trois essais de reproduction de couleurs avec l'algorithme du simplexe utilise dans les trois cas les encres rouge, jaune et blanche, tandis que les couleurs bleue et verte ne sont pas utilisées. En effet, les couleurs ciblées ont pour but d'approcher les couleurs des matériaux terracotta, bois et pierre, qui comprennent naturellement des mélanges de rouge, jaune et blanc.

Couleur cible	ϵ_{rouge}	ϵ_{jaune}	ϵ_{blanc}	$min[P]$
Terracotta	0.55	0.08	0.18	0.13
Bois	0.53	0.55	0.23	0.20
Pierre	0.10	0.235	0.91	0.15

TABLE 4.1 – Résultats donnés par l'algorithme du simplexe

Ces fractions d'épaisseurs correspondent aux taux d'ouvertures des buses correspondantes. Pour connaître les épaisseurs de chaque encre, il suffit de faire le produit de ces fractions par l'épaisseur maximale réalisable, soit environ 7 μm .

On réalise ensuite un dessin tramé avec les couleurs sélectionnées (ϵ non nulle) en indiquant au fournisseur verrier les fractions d'épaisseurs à imposer à l'imprimante.

4.4.3 Aspect des modules optimisés

Contrairement aux précédents essais de pixelisation donnant des aspects très sombres et peu saturés, la méthode d'optimisation consistant à ne pas mélanger les encres et à contrôler leur saturation via l'épaisseur d'encre montre des couleurs bien présentes visuellement (figure 4.13). Les trames à l'origine de ces couleurs synthétisées sont montrées en dessous des couleurs correspondantes. On peut observer les saturations de chaque couleur en fonction des fractions d'épaisseurs déterminées par la méthode du simplexe table 4.1. On peut remarquer également que lorsqu'une encre est appliquée sur une épaisseur importante, celle-ci s'étale davantage, à tel point qu'elle peut se superposer avec les autres encres. C'est particulièrement le cas pour l'encre rouge sur le module terracotta, les encres rouge et jaune sur le module bois et l'encre blanche sur le module pierre. La propriété physique qui quantifie la capacité d'un fluide à s'étaler s'appelle la mouillabilité et peut ne pas être la même pour toutes les encres. En effet, l'encre rouge semble autant étalée sur le module terracotta que l'encre blanche l'est sur le module pierre, alors que sa fraction d'épaisseur y est bien inférieure. Aussi, le cas du module bois montre qu'appliquer plusieurs encres avec une épaisseur importante favorise davantage l'étalement de celles-ci comparée à l'étalement qu'auraient montré les mêmes encres si elles avaient été appliquées seules. En l'occurrence, l'encre rouge semble bien plus étalée sur le module bois que sur le module terracotta alors que sa fraction d'épaisseur est légèrement inférieure. Visuellement, on devine que l'encre rouge a été appliquée après l'encre jaune (elle-même appliquée après l'encre blanche), et que l'importante épaisseur déjà présente en dessous ne fait qu'augmenter la capacité d'étalement de l'ensemble. Finalement, c'est bien la quantité globale de toutes les encres qui amplifie l'étalement de l'ensemble.

4.4 Élaboration et test d'une méthode pour optimiser l'esthétique et la performance des modules colorés : hypothèse de la linéarité



FIGURE 4.13 – Photographie extérieure des trois modules optimisés fabriqués. De gauche à droite : le module "terracotta", le module "bois" et le module "pierre". Les photographies inférieures présentent les motifs tramés vus de près

Ces comportements sont sources de pertes optiques pour l'énergie solaire, car ils comblent les espaces qui devaient être initialement non imprimés et augmente les épaisseurs d'encres que la lumière doit traverser. Cependant, cela peut améliorer la synthèse colorimétrique et la luminance de la couleur qui en résulte, car l'aire laissant apparaître le fond noir est moins importante. Cette dérive doit donc être prise en compte dans l'élaboration des dessins tramés. Elle peut être évitée en espaçant davantage les disques des encres les plus épaisses ou en diminuant légèrement leur taille par rapport aux autres (ces deux possibilités sont strictement équivalentes, car réduire la taille des disques revient à augmenter sa distance qui les sépare des autres). Les trames élaborées parviennent donc à produire des couleurs perceptibles. Il convient maintenant de déterminer si les couleurs atteintes sont proches des couleurs visées.

4.4.4 Écarts entre les couleurs obtenues et les couleurs cibles

De nouvelles mesures effectuées au colorimètre permettent d'estimer la distance entre couleurs obtenues et couleur ciblées. Seules des mesures réalisées dans les mêmes conditions et avec les mêmes paramètres peuvent être comparées. Les résultats en coordonnées RGB ainsi que les couleurs correspondantes sont affichées figure 4.14.

Module	RGB cible	RGB mesuré
Pierre	220,229,207	134,131,130
Bois	212,158,118	133,112,97
Terracotta	116,84,76	107,94,95

FIGURE 4.14 – Comparaison en coordonnées RGB entre les couleurs mesurées sur les modules optimisées et les couleurs cibles. Les couleurs présentes en fond sont celles qui correspondent à ces coordonnées

Malgré des photographies montrant des couleurs relativement saturées, ce sont des couleurs bien plus grises qui sont mesurées. La figure 4.16 permet d'évaluer les différences au niveau luminance, teinte et chrominance.

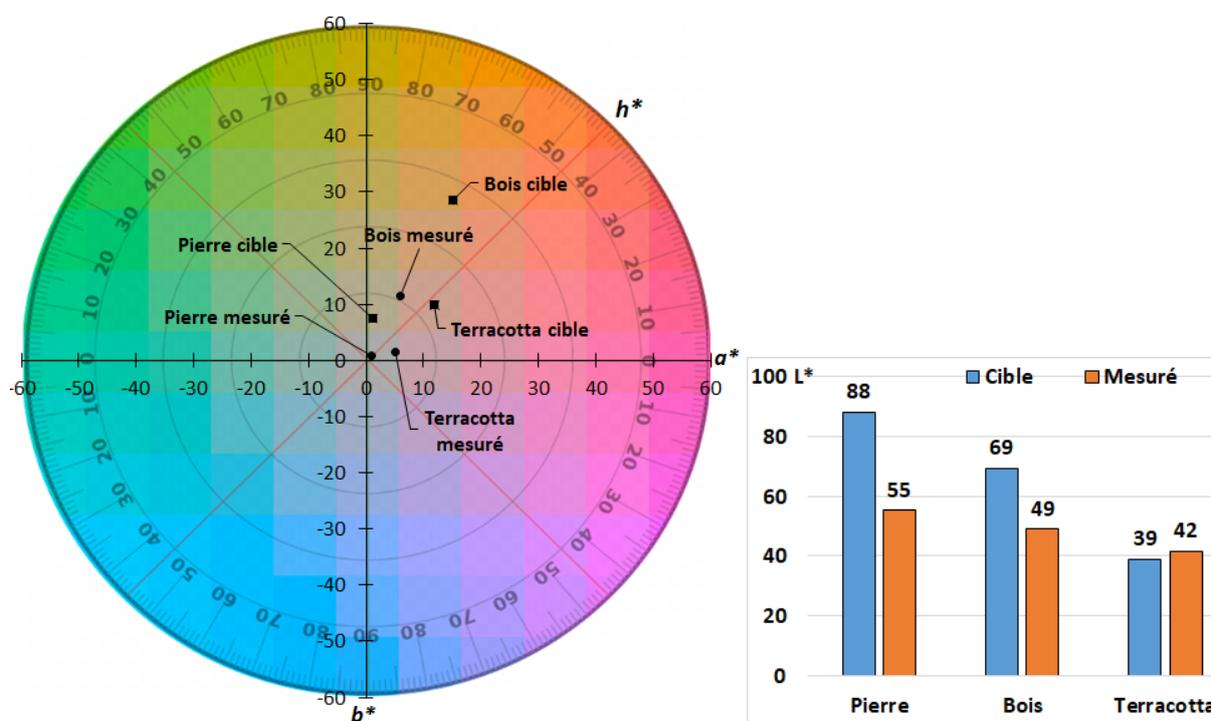


FIGURE 4.15 – Comparaison des coordonnées colorimétriques des modules optimisés et des couleurs cibles. À gauche, les coordonnées a^* , b^* , c^* et h^* . À droite, la luminance L^*

Le module terracotta est celui qui est le plus proche de sa couleur cible, avec un ΔE de 11, tandis que les modules pierre et bois sont bien plus éloignées, avec respectivement des distances de 33 et 28. Cependant, ces écarts ne sont pas tous de la même origine. Par exemple, la teinte mesurée pour le module bois est la même que celle qui était visée, tandis que la chrominance obtenue est bien plus faible que prévu, avec un écart ΔC^* de -19. Les modules pierre et terracotta montrent quant à eux des chrominances plus proches de celles qui étaient visées, où les écarts valent respectivement -10 et -6, mais les écarts de teinte sont importants (-38 et -22). Toutefois, lorsque les valeurs de chrominance sont si faibles, les différences visuelles entre les couleurs

4.4 Élaboration et test d'une méthode pour optimiser l'esthétique et la performance des modules colorés : hypothèse de la linéarité

sont moins perceptibles et la notion de teinte devient davantage floue. En effet, la chrominance mesurée pour le module pierre est très proche du point central, correspondant au blanc (niveaux de gris), qui par définition n'a aucune teinte. Enfin, tandis que les luminances mesurées pour les modules pierre et bois sont inférieures aux luminances visées de respectivement 33 et 20, c'est une luminance supérieure à la luminance visée qui est obtenue pour le module terracotta, d'un écart de +3.

Les différences colorimétriques entre les couleurs cibles et les couleurs obtenues varient donc selon le type de couleur ayant été évaluées, il est maintenant possible de les comparer avec les pertes énergétiques.

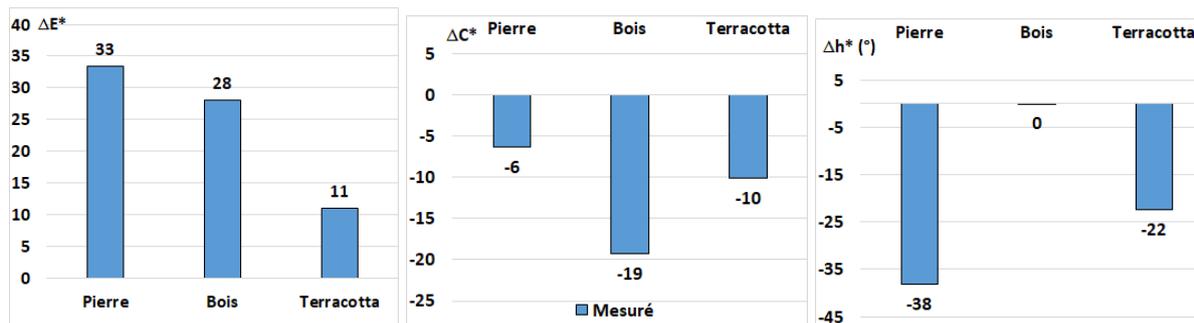


FIGURE 4.16 – De gauche à droite : la distance euclidienne ΔE , les différences de chrominance ΔC^* et de teinte Δh^* entre les couleurs cibles et mesurées

4.4.5 Évaluation de la qualité de l'optimisation

L'efficacité de la méthode pour optimiser couleur et pertes énergétiques est évaluée en comparant les modules optimisés aux modules mono-teintes (et le module bleu + blanc) sur des diagrammes présentant les pertes énergétiques en fonction de la chrominance C^* et de la luminance L^* .

4.4.5.1 Variation de la performance en fonction de la chrominance

De manière globale, plus la chrominance est importante, et plus les pertes augmentent (figure 4.17).

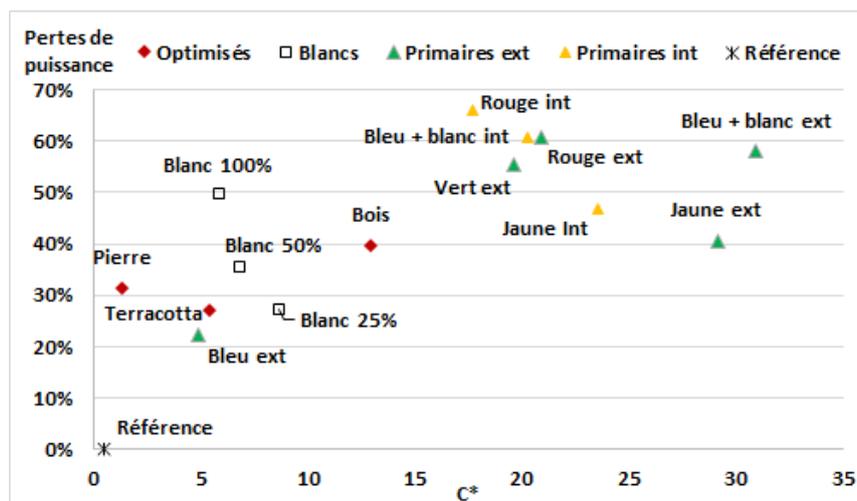


FIGURE 4.17 – Pertes de production en fonction de la chrominance C^* ; Les suffixes ext(érieur) et int(érieur) précisent où se trouve la face imprimée

Le profil qui est observé ressemble à un profil logarithmique. Pour le vérifier, il faudrait obtenir davantage de points pour une même teinte. Malheureusement, seule l'encre blanche a été testée sur plusieurs épaisseurs, et celle-ci n'a par définition pas de teinte à proprement parler, ni de chrominance. Toutefois, sur le diagramme, on peut observer que la valeur de chrominance des modules blancs est supérieure à celle du module bleu, du module terracotta et du module pierre. Lorsque l'épaisseur augmente, cette valeur diminue légèrement et les pertes énergétiques augmentent. Ajouter davantage de blanc désature la couleur (et augmente la réflectance).

Les modules optimisés s'intègrent bien dans cette tendance, et leurs pertes énergétiques sont plus faibles que la majorité des modules mono-teintes. Cependant, leur chrominance est bien plus faible. En effet, un mélange de couleurs sera toujours moins saturé que chaque encre seule. En effet, le module "Bois" montre autant de pertes énergétiques que le module "Jaune ext", alors que ce dernier a une chrominance bien plus importante (28 par rapport à 13).

4.4.5.2 Variation de la performance en fonction de la luminance

La (figure 4.18) montre une relation linéaire entre pertes de puissances et luminance dans le cas des modules blancs et des trois valeurs d'épaisseurs testées. En effet, une courbe de tendance considérant les 3 points et passant par le point correspondant au module de référence (épaisseur d'encre nulle) peut être tracée, montrant un coefficient de régression de 0.97.

4.4 Élaboration et test d'une méthode pour optimiser l'esthétique et la performance des modules colorés : hypothèse de la linéarité

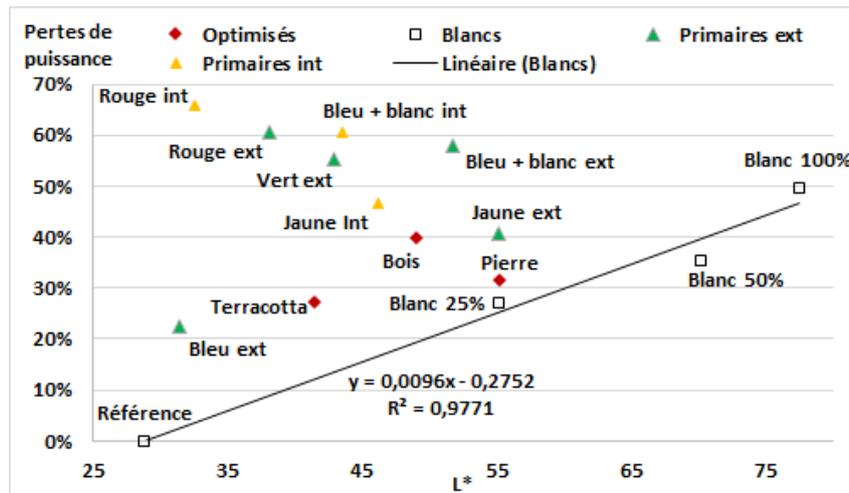


FIGURE 4.18 – Pertes de production en fonction de la Luminance L* ; Les suffixes ext(érieur) et int(érieur) précisent où se trouve la face imprimée

Ce résultat laisse penser qu'une relation linéaire existe également dans les cas des autres encres, mais avec des coefficients directeurs plus importants, l'encre blanche ayant le meilleur rapport entre perte énergétique et luminance (dans la zone inférieure droite du graphique). Les modules optimisés montrent également de bons résultats, puisqu'ils se trouvent plus proches de cette zone que la majorité des autres modules.

4.4.6 Discussion sur la configuration optimale

L'effet du choix de la configuration intérieure ou extérieure sur le compromis entre performance et couleur a été testé pour les encres jaune et rouge, et pour une superposition des encres bleue et de blanche. Les résultats sont placés sur les diagrammes des figure 4.17 et figure 4.18. On peut observer que dans chaque cas, le changement de la configuration extérieure vers intérieure provoque une baisse de chromaticité et une augmentation des pertes énergétiques. Sur le diagramme de luminance, c'est un effet similaire qui est observée. En effet, les modules possédant la face imprimée à l'intérieur sont également mesurés avec moins de luminance et davantage de pertes énergétiques que les autres. Il semble donc que d'un point de vue global, la configuration extérieure est plus optimisée esthétiquement, car elle permet d'accéder à davantage de luminance et de chrominance tout en entraînant moins de pertes énergétiques. Le fait que ce comportement soit également observé pour le cas particulier du module "bleu + blanc" laisse penser que ce comportement est général pour toutes les encres. Toutefois, l'expérience n'a pas été réalisée avec l'encre verte, ni avec les encres blanche et bleue seules. Enfin, l'effet d'un changement de configuration n'est pas de la même intensité suivant les encres. L'encre rouge montre une variation avec davantage de pertes énergétiques que l'encre jaune, mais moins de pertes de chrominance. Les encres bleue + blanc montrent quant à elles une chute de chrominance ou de luminance et une faible augmentation des pertes énergétiques, encore plus horizontale que l'encre jaune, notamment concernant la chrominance.

4.4.7 Bilan concernant la méthode d'optimisation testée

Concernant l'optimisation de la luminance, la méthode est efficace, car seules les modules blancs ont un meilleur résultat. Pour ce qui est de la chrominance, les modules optimisés restent dans la tendance des autres modules sans s'en séparer significativement. Cependant, les pertes énergétiques associées sont bien inférieures à la majorité de celles des autres modules (à l'exception du blanc et du bleu). La méthode garantie donc une meilleure performance que les modules mono-teintes étudiés, au détriment de sa chrominance. D'un point de vue global, les modules optimisés sont meilleurs que les autres dans le compromis entre pertes énergétiques et luminance et aussi bons dans le compromis entre chrominance et pertes. La méthode prouve donc une certaine efficacité d'optimisation. Celle-ci peut être améliorée davantage en considérant une relation linéaire entre luminance et pertes.

4.5 Proposition d'amélioration de la méthode d'optimisation

La réflectance et l'intensité de la lumière varient de manière non linéaire avec l'épaisseur des encres, tout comme leur transmittance et l'énergie produit par les modules PV. Cependant, résoudre un problème d'optimisation non linéaire est bien plus complexe et demande d'importants moyens mathématiques et informatiques, si bien que de nombreuses techniques consistent à linéariser les expressions mathématiques avant d'appliquer un algorithme d'optimisation linéaire connu, comme la méthode du simplexe.

4.5.1 Linéarité entre pertes énergétiques et luminance

Le but de l'algorithme est de déterminer les combinaisons de couleur les plus efficaces pour obtenir une couleur voulue par mélange colorimétrique, tout en minimisant les pertes énergétiques. C'est-à-dire, les meilleurs couples de fractions d'épaisseur et de pertes $(\epsilon, p)_k$ de chaque encre k telles que :

Pour chaque couleur k , on peut donc déterminer expérimentalement l'expression des p_k :

$$p_k = a_k \cdot L_k^* - b_k \quad (4.3)$$

Pour plus de facilité, on peut réaliser un changement de variable tel que la perte de puissance soit liée de manière linéaire avec la fraction d'épaisseur ϵ_k comprise entre 0 et 1 :

$$p_k = a_k \cdot L_k^* - b_k = c_k \cdot \epsilon_k \quad (4.4)$$

$$p_k(\epsilon_k = 0) = 0 \quad (4.5)$$

$$p_k(\epsilon_k = 1) = p(L_k^* = L_{k,max}^*)_k = a_k \cdot L_{k,max}^* - b_k = c_k \quad (4.6)$$

Finalemment :

$$p(\epsilon_k) = \epsilon_k \cdot (a_k \cdot L_{k,max}^* - b_k) \quad (4.7)$$

Dans le cas du blanc, $a_{blanc} = 0.0096$, $L_{max,blanc}^* = 79$ et $b_k = -0,2752$.

$$p_{blanc}(\epsilon_{blanc}) = \epsilon_{blanc} \cdot 0.48 \quad (4.8)$$

En ayant choisi au préalable la luminance L_k^* désirée, on peut estimer la fraction d'épaisseur correspondante à implémenter :

$$\epsilon_k = \frac{p_k}{a_k \cdot L_{k,max}^* - b_k} = \frac{a_k \cdot L_k^* - b_k}{c_k} \quad (4.9)$$

4.5.2 Changement de système de coordonnées pour la synthèse colorimétrique

Les pertes dépendant linéairement de la luminance, l'utilisation du système XYZ est plus adapté car sa valeur Y représente directement sa luminance et à un rôle de coefficient scalaire devant les vecteurs tels que :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x}{y} \cdot Y \\ Y \\ \frac{1-x-y}{y} \cdot Y \end{bmatrix} = Y \cdot \begin{bmatrix} \frac{x}{y} \\ 1 \\ \frac{1-x-y}{y} \end{bmatrix}$$

De plus, le gamut élaboré à partir des coordonnées XYZ des encres primaires permet de connaître directement les couples (x,y) qui peuvent être réalisés par synthèse colorimétrique linéaire telle que :

$$(X, Y, Z) = \sum_{k=1}^5 \epsilon_k \cdot (X, Y, Z)_k \quad (4.10)$$

Finalement, le problème d'optimisation peut se définir de la façon suivante :

— La fonction pertes à minimiser :

$$\min \left[P = \sum_{k=1}^5 |p_k| = \sum_{k=1}^5 \epsilon_k \cdot (a_k \cdot L_{k,max}^* - b_k) \right]$$

— Le système d'équations à résoudre :

$$X_w \cdot \epsilon_w + X_y \cdot \epsilon_y + X_b \cdot \epsilon_b + X_g \cdot \epsilon_g + X_r \cdot \epsilon_r = X$$

$$Y_w \cdot \epsilon_w + Y_y \cdot \epsilon_y + Y_b \cdot \epsilon_b + Y_g \cdot \epsilon_g + Y_r \cdot \epsilon_r = Y$$

$$Z_w \cdot \epsilon_w + Z_y \cdot \epsilon_y + Z_b \cdot \epsilon_b + Z_g \cdot \epsilon_g + Z_r \cdot \epsilon_r = Z$$

— Les conditions sur les solutions :

$$0 \leq \epsilon_w, \epsilon_y, \epsilon_b, \epsilon_g, \epsilon_r \leq 1$$

Le passage des coordonnées RGB vers les coordonnées XYZ est linéaire et se réalise facilement à l'aide de la matrice de passage correspondante :

$$(X, Y, Z)_k = M_{RGB,XYZ} \cdot (R, G, B)_k \quad (4.11)$$

Celle-ci dépend de l'illuminant qui est considéré.

4.5.3 Limites de la méthode d'optimisation

Dans le chapitre précédent, il a été montré que la réflectance des modules selon l'épaisseur variait selon une équation complexe, mettant en jeu des fractions fonctions cotangentes hyperboliques et les coefficients K/S des encres. L'énergie absorbée par les encres croît de manière exponentielle avec l'épaisseur et les coefficients K et S . Il est donc peu probable que les pertes, somme de l'énergie réfléchie et absorbée, montrent une variation linéaire avec l'épaisseur des encres. Ce modèle ne permet donc pas de prédire précisément les pertes énergétiques en fonction de l'épaisseur. La comparaison des résultats de synthèse colorimétrique avec la couleur désirée a montré des disparités qui invalident l'hypothèse de la linéarité des synthèses colorimétriques RGB avec les fractions d'épaisseurs. Cependant, cette hypothèse a permis de résoudre facilement un problème d'optimisation, dont les résultats ont montré une certaine linéarité de l'évolution des pertes en fonction de la luminance, dans le cas spécifique de l'encre blanche. Pour parvenir à prédire les pertes énergétiques d'un module PV coloré, Une détermination précise des propriétés d'absorption et de diffusion des encres est nécessaire.

4.6 Conclusion du Chapitre 4

Dans ce chapitre, des tests utilisant des interconnexions et un encapsulant noirs ont d'abord été réalisés, permettant de montrer leur efficacité à supprimer les forts contrastes au sein du module, améliorant la dissimulation des cellules.

L'étude s'est ensuite concentré sur l'impression en face avant, où les encres de base de l'imprimante ont été caractérisées d'un point de vue colorimétrique, puis d'un point de vue énergétique. En particulier, c'est l'évolution de ces caractéristiques en fonction de l'épaisseur qui a été analysée. Ainsi, des tendances propres à chaque encre ont pu être déterminées afin d'aboutir à une méthode d'optimisation par tramage.

Les tests de différents types de tramages ont prouvé que la technique consistant à placer des disques de même taille très rapprochés, à la manière des pixels d'un écran, était la plus efficace pour produire une couleur dans l'œil. L'épaisseur de ces disques contrôle la quantité de lumière qui parvient aux yeux de l'observateur. Cependant, contrairement aux pixels d'un ordinateur qui sont illuminés par rétro-éclairage en transmission, les disques des trames sont illuminés par réflexion. Ce principe limite fortement les chrominances et luminances atteignables, aboutissant à un espace des couleurs réalisables bien plus petit que le gamut RGB d'un écran.

L'évolution des pertes énergétiques en fonction de la saturation de la teinte choisie suit un comportement plutôt logarithmique, tandis que celle des pertes énergétiques en fonction de la luminance suit une tendance plutôt linéaire. Une méthode d'optimisation supposant une évolution linéaire de ces caractéristiques colorimétriques avec l'épaisseur a été testée. La distance importante mesurée entre les couleurs obtenues et les couleurs cibles confirment que ce comportement n'est pas linéaire. Ainsi, une méthode d'optimisation consistant à prédire de manière précise la couleur du résultat relève de systèmes non linéaires qui deviennent beaucoup plus complexes à résoudre. Cependant, la méthode a permis de fabriquer des modules colorés plus efficaces que la plupart des modules étudiés. Une amélioration de la méthode a également été proposée, considérant l'évolution linéaire des pertes énergétiques en fonction de la luminance et facilitant son intégration dans le calcul de la synthèse colorimétrique par utilisation du système de coordonnées XYZ. Cette méthode suppose que l'évolution de la luminance est bien linéaire pour chaque encre et que son expression est déterminée.

Enfin, l'évolution des coordonnées colorimétriques et des performances en fonction du placement de l'encre à l'intérieur ou à l'extérieur des modules a également été évaluée, montrant dans tous les cas étudiés (trois) une chute de chrominance ou de luminance accompagnée d'une augmentation des pertes énergétiques dans le cas intérieur. Ce résultat renforce l'idée que la configuration extérieure est plus optimisée que la configuration intérieure. Cependant, dans le cas de l'étude, la face non imprimée ne possède ni texturation, ni couche anti-reflet, alors que ces traitements peuvent être réalisés et peuvent améliorer les caractéristiques colorimétriques et énergétiques de l'ensemble.

Conclusion générale

Le contexte climatique et économique actuel encourage le déploiement à grande échelle des modules BIPV, faisant apparaître de nouvelles contraintes dans la conception des bâtiments, notamment esthétiques. Proposer davantage de choix de couleurs et de personnalisation aiderait donc les concepteurs de bâtiment ainsi que la population à accepter la présence croissante de ces dispositifs producteurs d'énergie. Malheureusement, la modification de la couleur d'un module PV impacte directement sa production électrique. Il est donc nécessaire d'élaborer des méthodes permettant d'optimiser le compromis entre esthétique et performance. Malgré la diversité des technologies existantes pour modifier l'aspect des modules, peu d'entre elles proposent un contrôle précis des paramètres colorimétriques et énergétiques. L'impression numérique, contrôlée par ordinateur via des dessins, offre de nombreuses possibilités de réalisation de couleurs ou de motifs. Les imprimantes à encre céramiques étant disponibles chez des fournisseurs verriers, elles représentent donc un choix privilégié pour réaliser une étude paramétrique et déterminer des méthodes optimales pour concevoir des modules PV esthétiques.

Ce travail de doctorat s'est concentré sur les encres céramiques et leur potentiel pour améliorer l'esthétique des modules BIPV tout en minimisant les pertes énergétiques. Elles ont été étudiées énergétiquement en fabriquant des modules PV colorés et en faisant varier plusieurs paramètres comme la couleur, la localisation de l'encre au sein du module, les motifs des dessins ou encore le type de cellule PV utilisé. Un classement des couleurs les plus performantes pour transmettre l'énergie solaire a ainsi pu être déterminé. Les encres ont également été étudiées optiquement, grâce à des mesures réalisées avec un spectrophotomètre à sphère intégrante ainsi que des mesures réalisées avec un colorimètre. Les résultats de ces mesures ont permis d'estimer des coefficients d'extinction et de calculer les courants de court-circuit théoriques des modules fabriqués. Ces courants de court-circuit théoriques ont montré des valeurs allant de 15% à 30% inférieure aux courants de court-circuit réellement mesurés. Ces écarts sont expliqués par la différence des chemins optiques lors du protocole expérimental et dans les modules laminés, combinée à l'impact des phénomènes de diffusion, plus ou moins intense suivant l'encre considérée. Les encres ont été observées au microscope et identifiées comme des milieux hétérogènes et poreux, augmentant les difficultés à appréhender les comportements de la lumière en leur sein. La théorie de Mie permet d'appréhender les phénomènes de diffusion suivant la taille des particules dans la couche. Les observations au microscope et les données de la littérature indiquent que plusieurs régimes de diffusion cohabitent. Le premier, le mode de Rayleigh, se produit à cause des pigments, de tailles submicrométriques, et informe sur une répartition plus équitable de la diffusion de l'énergie vers l'avant et vers l'arrière. Le deuxième, le mode de Mie, qui est provoqué par des hétérogénéités de taille plus importantes, comme les pores, et qui montre une diffusion plus importante vers l'avant que vers l'arrière. Les coefficients K/S maximum, déterminés à l'aide du colorimètre, quantifient le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie rétrodiffusée pour chaque encre. La tendance des écarts entre les courants de court-circuit théoriques et mesurés étant corrélée avec les coefficients K/S maximum des encres, l'effet de la diffusion sur la fiabilité des mesures utilisées dans le calcul est certain.

L'évolution des caractéristiques colorimétriques et de la performance des modules PV en fonction du type d'encre et de son épaisseur a été analysée. Il apparaît une variation non linéaire de celle-ci, qui peut toutefois être approximée.

Durant la phase expérimentale, plusieurs types de trames ont été testés visuellement. Les trames à motifs non aléatoires peuvent provoquer des effets de moiré perceptibles et trahir la présence des cellules PV. De plus, ce genre de motifs, par leur caractère désordonné, donne un côté plus naturel aux surfaces observées. Des synthèses colorimétriques par méthode de pixelisation ont également été testées, démontrant l'importance d'utiliser des pixels de même taille pour empêcher le fond noir de désaturer la couleur désirée. Le contrôle de l'épaisseur de l'encre est la manière optimale de désaturer une couleur tout en minimisant les pertes énergétiques, comparé à la réalisation de mélanges en surface. Le placement de la face imprimée à l'intérieur du module permet d'offrir des possibilités de texturation de la face extérieure, améliorant encore davantage l'aspect naturel des surfaces.

Les mesures colorimétriques des épaisseurs maximum pouvant être réalisées par l'imprimante a permis de déterminer un gamut des encres céramiques, offrant seulement 17% des couleurs réalisables avec le système RGB.

Une fois les tendances liées aux performances identifiées, une approche esthétique a ensuite été entreprise pour réaliser une optimisation. D'abord, la suppression des contrastes au sein du module par utilisations combinées d'interconnexions et encapsulants noirs augmente significativement la capacité des modules à se camoufler. Une fois ce fond homogène obtenu, la réalisation d'impressions céramiques sur le verre de la face avant permet de transformer son aspect selon d'importants degrés de libertés, si bien que le choix d'imiter l'environnement dans lequel se trouve le bâtiment en question sera toujours une possibilité à saisir par les concepteurs. Cependant, dans une optique d'optimisation, des préférences peuvent être faites quant au choix de certaines couleurs, qui n'ont pas tous la même efficacité sur la transmission solaire pour une même épaisseur. Ainsi, l'encre blanche montre beaucoup de potentiel esthétique, car elle n'absorbe quasi aucun rayonnement. En effet, l'essentiel des pertes est due à la réflexion, ce qui améliore son rapport entre luminance et efficacité énergétique. De plus, il s'agit d'une couleur souvent recherchée par les architectes et fait consensus quant à sa valeur esthétique. Enfin, elle permet également de limiter l'échauffement des surfaces et participe donc à diminuer les effets d'îlots de chaleur urbains. La méthode par pixelisation permet d'optimiser davantage la performance. Le mélange colorimétrique s'effectuant dans l'œil de l'observateur et non au sein des encres à la surface du verre, la lumière traverse une épaisseur d'encre minimisée. Enfin, un dernier choix doit être fait quant au compromis entre luminance et pertes énergétiques. Il peut être orienté par la quantité des besoins en électricité du bâtiment, du budget dédié aux énergies renouvelables ainsi qu'à la surface disponible.

D'autres aspects liés à l'utilisation des encres ont également été étudiés, comme leur impact sur l'échauffement des modules et leur effet sur les phénomènes de vieillissement aux rayons UV. Concernant l'échauffement, des mesures en conditions réelles ont été réalisées sur un banc d'essai situé à l'extérieur. Les montées en température plus importantes des modules colorés montrent que la réflectance n'est pas le seul paramètre régissant la quantité d'énergie qui entre dans le module. En effet, l'émissivité thermique dans les longueurs d'onde infrarouges semble également jouer un rôle important. De plus, les disparités entre les échauffements laissent penser que les émissivités diffèrent selon l'encre, et que leur porosité est responsable de ces différences.

Enfin, la campagne de vieillissement aux rayons UV de mini-modules colorés a révélé des chutes de productivité moins importantes chez les modules colorés comparés à un module non

coloré. De plus, aucun changement de couleur significatif n'a été détectée. Il semble donc que les encres protègent les cellules PV des rayonnements UV et ne subissent aucun changement de couleur visible.

Perspectives

La méthode élaborée a montré une logique théorique et une certaine validité pratique quant aux objectifs d'optimisation. Cependant, un certain nombre de travaux reste à effectuer pour la rendre fiable et davantage efficace.

Il est par exemple absolument nécessaire de parvenir à prédire la couleur finale d'un module PV ainsi que sa productivité électrique. Pour cela, il convient de poursuivre les travaux consistant à caractériser le comportement optique des encres en fonction de son épaisseur, en réalisant un plan d'expérience qui étudie un nombre plus important d'épaisseurs d'encres différentes. Comme dans ces travaux, la démarche consiste à caractériser chaque épaisseur optiquement par spectrophotométrie, et énergétiquement via des flash-tests sur les modules PV fabriqués. Le protocole de mesure avec la sphère intégrante peut être amélioré en ajoutant des mesures réalisées dans la configuration où le port situé en face du rayon incident est ouvert, permettant de déterminer la part d'énergie qui est diffusée en réflexion et en transmission. Le croisement systématique des résultats de caractérisations optique et énergétique permettrait de déterminer plus précisément les variations non linéaires de la luminance et de la transmittance en fonction de l'épaisseur d'encre. Des méthodes mathématiques plus puissantes que l'algorithme du simplexe, capable de résoudre des systèmes non-linéaires, peuvent être utilisées pour déterminer directement la solution optimale de réalisation d'une couleur pour une luminance donnée.

Pour une efficacité encore plus accrue et une production à grande échelle, il serait judicieux de créer un programme capable de déterminer directement les paramètres optimaux à indiquer à l'imprimante pour un dessin et une luminance donnés.

En parallèle, une étude propre à la fabrication des encres peut être imaginée dans le but d'améliorer leurs propriétés à transmettre l'énergie solaire, purifier en longueur d'onde les spectres de réflexion ou encore maximiser l'émissivité infrarouge. Concernant cette dernière, une nouvelle campagne de mesures extérieures devrait être réalisée pour confirmer les observations faites quant aux différences d'échauffements suivant la couleur. En particulier, une détermination précise de l'émissivité infrarouge de ces encres permettrait de valider ou non les hypothèses formulées. De plus, les mesures n'ont été réalisées que sur des modules avec lesquels la face imprimée était située à l'extérieur du module. Il convient donc également d'étudier l'influence du côté où se trouve l'encre sur l'échauffement.

Les travaux se sont concentrées sur l'élaboration d'une méthode d'optimisation de la face avant, en abordant d'autres sujets qui n'ont pas été approfondis. L'influence d'une texturation de surface à l'extérieur lorsque l'encre se trouve à l'intérieur du module n'a pas du tout été abordée. Si elle peut être un avantage esthétique, elle peut être néfaste pour la transmission solaire ou bien l'améliorer davantage. Seulement deux types de cellules PV ont été comparés pour être utilisée avec la technologie d'encre céramique, en montrant que la technologie à hétérojonction était plus adaptée pour certaines couleurs. L'utilisation d'un type de cellule PV optimale en fonction de la technologie d'impression et de la couleur souhaitée constitue donc un axe de recherche.

L'adaptabilité de la méthode n'a pas été évaluée sur d'autres systèmes liés à l'énergie solaire,

qui font également face à des contraintes esthétiques. En particulier, la technologie étudiée et l'application de la méthode élaborée devraient être testés sur des modules hybrides PV/T ou des récepteurs thermiques, qui font partie des sources renouvelables d'énergie pouvant être utilisées dans un bâtiment.

Enfin, la notion du coût a peu été abordée. Même si la technologie démontre un fort potentiel pour répondre aux problématiques esthétiques, un coût trop important reste un des freins principaux à son utilisation dans les projets. Il serait donc intéressant d'estimer le coût de l'ajout d'une couche imprimée sur le verre de la face avant dans le processus de fabrication et de le comparer aux autres technologies de modules colorés. Une démocratisation à l'échelle industrielle aidera à faire baisser les coûts.

Communications scientifiques

Article de revue :

- *Color coated glazing for next generation BIPV : performance vs aesthetics, EPJ Photovoltaics 2021* [67]

Conférences :

- IBPSA France 2020, Reims - Article et communication orale : *Chromatisme et limite de perception humaine : une approche esthétique pour le photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV)* [68]
- Journées nationales de l'énergie solaire (JNES) 2021, Odeillo - Présentation d'un poster
- EUPVSEC 2021 - Article et communication orale - *Color coated glazing for next generation BIPV : performance vs aesthetics* [67]
- WCPEC-8, 2022, Milano - Article et communication orale - *GLASS DIGITAL PRINTER CHARACTERIZATION FOR OPTIMIZATION OF BIPV AESTHETIC VS PERFORMANCE BALANCE* [69]

Bibliographie

- [1] H.-O. PÖRTNER, D. ROBERTS, M. TIGNOR et al., *IPCC, 2022 : Climate change 2022 : Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.*
- [2] « Global greenhouse gas emissions by sector. » (), adresse : <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.
- [3] I. GLOBAL INDUSTRY ANALYSTS, *BIPV-Market analysis :Trends and forecasts.* 2015.
- [4] « Guide RE2020 - ministère de la transition écologique, cerema. » (), adresse : http://www.rt-batiment.fr/IMG/pdf/guide_re2020_dhup-cerema.pdf.
- [5] C. BALLIF, L.-E. PERRET-AEBI, S. LUFKIN et E. REY, « Integrated thinking for photovoltaics in buildings, » *Nature energy*, 2018. adresse : <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0176-2>.
- [6] F. J. W. OSSEWEIJER, L. B. P. van den HURK, E. J. H. M. TEUNISSEN et W. G. J. H. M. van SARK, « A comparative review of building integrated photovoltaics ecosystems in selected european countries, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 90, p. 1027-1040, juill. 2018, ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2018.03.001. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300716> (visité le 11/02/2021).
- [7] Z. HAGHIGHI, M. ANGALI DEHNAVI, T. KONSTANTINOU, A. van den DOBBELSTEEN et T. KLEIN, « Architectural photovoltaic applications : lessons learnt and perceptions from architects, » *Buildings*, t. 11, n° 2, p. 62, fév. 2021, ISSN : 2075-5309. DOI : 10.3390/buildings11020062. adresse : <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/2/62> (visité le 02/03/2021).
- [8] C. ERBAN et L. HERIBERT, « Resultats From The Worldwide Performed Questionnaire BIPV Market, Technology and Preferences, » sept. 2020.
- [9] « Fonctionnement Panneau Solaire 2022 - Que Faut-il Savoir? » (), adresse : <https://www.monkitsolaire.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-n307> (visité le 16/05/2023).
- [10] « Composition et assemblage d'un panneau photovoltaïque. » (5 août 2021), adresse : <https://acsolue-energie.fr/2021/08/05/composition-et-assemblage-dun-panneau-photovoltaique/> (visité le 02/05/2023).
- [11] P. HEINSTEIN, C. BALLIF et L.-E. PERRET-AEBI, « Building integrated photovoltaics (BIPV) : review, potentials, barriers and myths, » *Green*, t. 3, n° 2, jan. 2013, ISSN : 1869-8778, 1869-876X. DOI : 10.1515/green-2013-0020. adresse : <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/green-2013-0020/html> (visité le 13/07/2022).

- [12] L. H. SLOOFF, F. FRUMAU, M. RIETBERGEN et al., « An architectural approach for improving aesthetics of PV, » p. 4, 2017.
- [13] « Performances – SOLAXESS. » (), adresse : <https://www.solaxess.ch/performance-4/> (visité le 14/05/2023).
- [14] « SOLAXESS – white solar technology. » (), adresse : <https://www.solaxess.ch/en/home/> (visité le 14/05/2023).
- [15] G. WOMACK, « Anti-reflection coatings and optical interference in photovoltaics, » p. 158, 2017.
- [16] *Traitement antireflet*, in *Wikipédia*, Page Version ID : 198478618, 7 nov. 2022. adresse : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Traitement_antireflet&oldid=198478618 (visité le 30/06/2023).
- [17] « Lof solar - color solar cell. » (), adresse : <http://www.lofsolar.com/> (visité le 15/05/2023).
- [18] G. PEHARZ, P. BONOMO, E. SARETTA et al., *Coloured BIPV Market, Research and Development | IEA PVPS Task 15, Subtask E*. fév. 2019.
- [19] C. LEVALLOIS, « Étude et réalisation de lasers à cavité verticale mono et multi-longueurs d'onde émettant à 1,55 m, » 12 juill. 2006.
- [20] J. DU, Y. AN, C. ZHANG, C. ZHU, X. LI et D. MA, « Photonic design and electrical evaluation of dual-functional solar cells for energy conversion and display applications, » *Nanoscale Research Letters*, t. 14, n° 1, p. 70, déc. 2019, ISSN : 1931-7573, 1556-276X. DOI : 10.1186/s11671-019-2901-6. adresse : <https://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/s11671-019-2901-6> (visité le 15/01/2020).
- [21] « Building integrated solar panels from dubai produce clean energy — and color, » *Inhabitat - Green Design, Innovation, Architecture, Green Building | Green design & innovation for a better world*. (31 oct. 2017), adresse : <https://inhabitat.com/building-integrated-solar-panels-from-dubai-produce-clean-energy-and-color/> (visité le 15/05/2023).
- [22] B. BLÄSI, « Morpho butterfly inspired coloured BIPV modules, » p. 5, 2017.
- [23] F. MEILLAUD, M. BOCCARD, G. BUGNON et al., « Recent advances and remaining challenges in thin-film silicon photovoltaic technology, » *Materials Today*, t. 33, 20 mars 2015. DOI : 10.1016/j.mattod.2015.03.002.
- [24] « Photovoltaic Glass for Buildings - Onyx Solar. » (), adresse : <https://onyxsolar.com/> (visité le 15/05/2023).
- [25] « Solstice solar - BIPV solution provider. » (), adresse : <https://solstice.id/products/cadmium-telluride-pv-glass/> (visité le 15/05/2023).
- [26] R. E. / MEDIACOM, « EPFL's campus has the world's first solar window, » 5 nov. 2013. adresse : <https://actu.epfl.ch/news/epfl-s-campus-has-the-world-s-first-solar-window/> (visité le 15/05/2023).
- [27] « Soltech energy – vi är solteknologi, » *Soltech Energy – Vi är solteknologi*. (), adresse : <https://soltechenergy.com/en/> (visité le 15/05/2023).
- [28] « Planibel coloured : the best of tinted float glass, » *AGC Yourglass*. (), adresse : <https://www.agc-yourglass.com/en/brands/planibel-coloured> (visité le 15/05/2023).

- [29] « SUNAGE | Suncol Facade. » (), adresse : <https://sunage.ch/fr/suncol-facade> (visité le 15/05/2023).
- [30] « dip-tech digital printing. » (), adresse : <https://www.ferro.com/innovation/solutions/dip-tech-digital-printing> (visité le 15/05/2023).
- [31] ROLAND SCHREGLE et STEPHEN WITTKOPF, « An image-based gamut analysis of translucent digital ceramic prints for coloured photovoltaic modules, » *Buildings*, t. 8, n° 2, p. 30, fév. 2018, ISSN : 2075-5309. DOI : 10.3390/buildings8020030. adresse : <http://www.mdpi.com/2075-5309/8/2/30> (visité le 09/10/2020).
- [32] « Kameleon Solar | Home. » (), adresse : <https://kameleonsolar.com/> (visité le 15/05/2023).
- [33] « ColorsBlast, » Glass Partners Solutions. (), adresse : <https://www.gps-glass.fr/colorblast> (visité le 15/05/2023).
- [34] SOLAR. « SOLARIS 416, » Solarchitecture. (7 sept. 2020), adresse : <https://solarchitecture.ch/fr/solaris-416/> (visité le 15/05/2023).
- [35] M. PELLE, E. LUCCHI, L. MATURI, A. ASTIGARRAGA et F. CAUSONE, « Coloured BIPV technologies : methodological and experimental assessment for architecturally sensitive areas, » p. 21, 2020.
- [36] RIADHHAJJI. « Les imprimantes jet d'encre, » apcpedagogie. (17 juin 2018), adresse : <https://apcpedagogie.com/les-imprimantes-jet-d-encre/> (visité le 01/06/2023).
- [37] J. H. SONG, M. J. EDIRISINGHE et J. R. G. EVANS, « Formulation and multilayer jet printing of ceramic inks, » *Journal of the American Ceramic Society*, t. 82, n° 12, p. 3374-3380, 1999, ISSN : 1551-2916. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb02253.x>. adresse : <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1999.tb02253.x> (visité le 02/03/2021).
- [38] « Sphère intégrante. » (), adresse : https://en.wikipedia.org/wiki/Integrating_sphere#/media/File:Integrating_sphere_principle.svg.
- [39] « Courbes de réponses spectrales des trois types de cônes de l'oeil humain. » (), adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/CIE_RGB#/media/Fichier:CIE1931_RGBCMF.png.
- [40] « Espace colorimétrique RGB. » (), adresse : https://datasmarts.net/es/wp-content/uploads/2018/09/RGB_color_solid_cube.png.
- [41] « Illuminant D65. » (), adresse : https://en.wikipedia.org/wiki/Illuminant_D65.
- [42] « Fonctions colorimétriques de l'observateur de référence CIE. » (), adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/CIE_XYZ.
- [43] A. D. BROADBENT, « Colorimetry, methods, » in *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, Elsevier, 2017, p. 321-327, ISBN : 978-0-12-803224-4. DOI : 10.1016/B978-0-12-803224-4.00014-5. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128032244000145> (visité le 15/02/2022).
- [44] « Colorimétrie CIE yxy, Wikiversité.org. » (), adresse : https://fr.wikiversity.org/wiki/Colorim%C3%A9trie/CIE_Yxy.

- [45] I. O. A. S. I. EVANSTON et I. 60201. « Review of CMYK vs RGB for print, » PrintNinja. (), adresse : <https://printninja.com/printing-resource-center/printing-academy/advanced-concepts/cmyk-printing-vs-rgb/> (visité le 24/05/2023).
- [46] N. e. AL., « Predicting wood color change, » 2018, tex.journal : BioResources 13(3), 6250-6264.
- [47] « Disque L*C*h*. » (), adresse : <http://nalisawarna.com/wp-content/uploads/2015/09/ciecolorspace.jpg>.
- [48] « Synthèse additive des pixels dans l'oeil. » (), adresse : <https://www.123couleurs.fr/exp%C3%A9riences/exp%C3%A9riences-vision/ev-m%C3%A9langeoptique/>.
- [49] « La diffraction, » MAXICOURS. (), adresse : <https://www.maxicours.com/se/cours/la-diffraction/> (visité le 26/04/2023).
- [50] M. SÉGUIN, *Physique XXI : Tome C : Ondes et physique moderne*, 1 t. Bruxelles : De Boeck, 2010, t. TOME C, XIX-572 p. Issue : 1, ISBN : 978-2-8041-6194-1.
- [51] « DMEGC Downloads English - DMEGC Downloads. » (), adresse : <https://www.dmegc.solar/> (visité le 26/04/2023).
- [52] « InterPV.net - Global PhotoVoltaic Business Magazine. » (), adresse : http://www.interpv.net/tech/tech_view.asp?idx=130&part_code=020090041&page=6 (visité le 26/04/2023).
- [53] « Spi-sun simulator™ 5100slp - solar simulator by spire solar | DirectIndustry. » (), adresse : <https://www.directindustry.com/prod/spire-solar/product-63104-1622708.html> (visité le 26/04/2023).
- [54] « XL-1000 - aging test chamber by AI SI LI (china) test equipment co., ltd | DirectIndustry. » (), adresse : <https://www.directindustry.com/prod/ai-si-li-china-test-equipment-co-ltd/product-115689-2050369.html> (visité le 28/04/2023).
- [55] T. GEWOHN, C. SCHINKE, B. LIM et R. BRENDEL, « Predicting color and short-circuit current of colored BIPV modules, » *AIP Advances*, t. 11, n° 9, p. 095 104, sept. 2021, ISSN : 2158-3226. DOI : 10.1063/5.0063140. adresse : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0063140> (visité le 05/05/2022).
- [56] S. P. ALY, S. AHZI, N. BARTH et A. ABDALLAH, « Using energy balance method to study the thermal behavior of PV panels under time-varying field conditions, » *Energy Conversion and Management*, t. 175, p. 246-262, 1^{er} nov. 2018, ISSN : 0196-8904. DOI : 10.1016/j.enconman.2018.09.007. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418310033> (visité le 28/04/2023).
- [57] B. PEROVIC, J. KLIMENTA, D. TASIC, J. PEUTEMAN, D. KLIMENTA et L. ANDJELKOVIC, « Modeling the effect of the inclination angle on natural convection from a flat plate : the case of a photovoltaic module, » *Thermal Science*, t. 21, n° 2, p. 925-938, 2017, ISSN : 0354-9836, 2334-7163. DOI : 10.2298/TSCI140821059P. adresse : <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361600059P> (visité le 27/04/2023).

- [58] P. BEVILACQUA, S. PERRELLA, R. BRUNO et N. ARCURI, « An accurate thermal model for the PV electric generation prediction : long-term validation in different climatic conditions, » *Renewable Energy*, t. 163, p. 1092-1112, jan. 2021, ISSN : 09601481. DOI : 10.1016/j.renene.2020.07.115. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148120311915> (visité le 16/03/2022).
- [59] « Digital Ceramic Printing On Glass – ALLGLASS TEMPERING, INC. - shop53002.dietime.org. » (), adresse : <https://shop53002.dietime.org/content?c=digital+ceramic+printing+on+glass&id=11> (visité le 05/07/2023).
- [60] D. DESCAMPS, « Notions sur la formulation des émaux céramiques de haute température., » adresse : http://didierdescamps.fr/émaux/notions_émaux.pdf.
- [61] « Illustration of the light interaction in a scattering and absorption media, » ResearchGate. (), adresse : https://www.researchgate.net/figure/Fig-1-Illustration-of-the-light-interaction-in-a-scattering-and-absorption-media_fig1_331542256 (visité le 26/04/2023).
- [62] *Théorie de Mie*, in *Wikipédia*, Page Version ID : 199004288, 26 nov. 2022. adresse : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Th%C3%A9orie_de_Mie&oldid=199004288 (visité le 26/04/2023).
- [63] G. L. GÜNGÖR, A. KARA, M. BLOSI et al., « Micronizing ceramic pigments for inkjet printing : part i. grindability and particle size distribution, » *Ceramics International*, t. 41, n° 5, p. 6498-6506, 1^{er} juin 2015, ISSN : 0272-8842. DOI : 10.1016/j.ceramint.2015.01.093. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884215001406> (visité le 02/05/2023).
- [64] P. EMMEL, « Nouvelle formulation du modèle de Kubelka et Munk avec application aux encres fluorescentes, »
- [65] LINDHOLM, J. G. FOSSUM et E. L. BURGESS, « Application of the superposition principle to solar-cell analysis, » *IEEE Transactions on Electron Devices*, t. 26, p. 165-171, 1979, ISSN : 0018-9383.
- [66] N. SÁNCHEZ-PANTOJA, R. VIDAL et M. C. PASTOR, « Aesthetic impact of solar energy systems, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 98, p. 227-238, déc. 2018, ISSN : 13640321. DOI : 10.1016/j.rser.2018.09.021. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118306695> (visité le 16/12/2019).
- [67] B. RIEDEL, P. MESSAOUDI, Y. B. ASSOA et al., « Color coated glazing for next generation BIPV : performance vs aesthetics, » *EPJ Photovoltaics*, t. 12, R. KENNY et J. M. SERRA, éd., p. 11, 2021, ISSN : 2105-0716. DOI : 10.1051/epjpv/2021012. adresse : <https://www.epj-pv.org/10.1051/epjpv/2021012> (visité le 07/09/2023).
- [68] B. RIEDEL, P. THONY et C. MENEZO, « Chromatisme et limite de perception humaine : une approche esthétique pour le photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV), » 2020.
- [69] B. RIEDEL, P. THONY, I. TSANAKAS et C. MENEZO, « Glass digital printer characterization for optimization of BIPV aesthetic vs performance balance, » 2022. DOI : 10.4229/WCPEC-82022-4C0.9.4.