

# Chromatisme et limite de perception humaine : une approche esthétique pour le photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV)

Benjamin RIEDEL<sup>1,3</sup>, Philippe THONY<sup>2</sup>, Christophe MENEZO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université Grenoble Alpes, CEA-LITEN-DTS-LIPV, INES, 73375 Le Bourget du Lac, France, [benjamin.riedel@cea.fr](mailto:benjamin.riedel@cea.fr)

<sup>2</sup> Université Grenoble Alpes, CEA-LITEN-DTS-LIPV, INES, 73375 Le Bourget du Lac, France, [philippe.thony@cea.fr](mailto:philippe.thony@cea.fr)

<sup>3</sup> Université Savoie Mont Blanc, LOCIE UMR CNRS, INES, Solar Academy, 73375 Le Bourget du Lac, France, [christophe.menezo@univ-smb.fr](mailto:christophe.menezo@univ-smb.fr)

---

## RESUME.

*Afin d'améliorer le confort visuel dans les villes et également donner plus de libertés artistiques aux architectes, la technologie BIPV est étudiée d'un point de vue esthétique. Des méthodes de colorisation ont déjà été mises au point mais celles-ci ne permettent pas un rendu qui s'intègre dans le reste du décor urbain, contrairement à la colorisation par impression céramique, qui permet davantage de possibilités artistiques. En s'inspirant de la technique du pointillisme, les travaux ont été orientés vers la simulation optique de la perception humaine, afin de déterminer les limites de résolution de l'œil. Des décalages colorimétriques spatiaux ont été mis en évidence et des distances limites de résolution ont été calculées, dans le but de poursuivre et imaginer des motifs pouvant tromper l'œil tout en minimisant les pertes énergétiques.*

**MOTS-CLÉS :** BIPV, esthétique, perception humaine.

---

**ABSTRACT.** *In order to improve visual comfort in cities and also give more artistic liberties to architects, BIPV technology is studied from an aesthetic point of view. Colorization methods have already been developed, but these do not allow a rendering that integrates with the rest of the urban scenery, unlike coloring by ceramic printing, which allows more artistic possibilities. Inspired by the pointillism technique, work has been directed towards the optical simulation of human perception, in order to determine the limits of resolution of the eye. Spatial colorimetric mismatches have been demonstrated and resolution limit distances have been calculated, in order to pursue and imagine patterns that could deceive the eye while minimizing energy losses.*

**KEYWORDS :** BIPV, aesthetic, human perception

---

## 1. INTRODUCTION

Le dérèglement climatique est l'un des défis les plus importants auquel l'humanité doit faire face. Afin de limiter ses effets, les émissions de gaz à effet de serre doivent diminuer drastiquement et la consommation énergétique diminuer sur la base d'énergies décarbonnées. Les bâtiments représentent 40 % de l'énergie primaire consommée par un pays tel que la France (« ADEME » s. d.). Il est donc nécessaire de concevoir des bâtiments peu demandeurs d'énergie voire autonomes en énergie, grâce à une meilleure isolation, une meilleure conception des réseaux fluides chauffage et circulation d'air mais également grâce à des technologies à énergies renouvelables comme des panneaux solaires thermiques

ou photovoltaïques (PV). Au regard d'une part des besoins, d'autre part des rendements de conversion, les technologies PV nécessitent une surface de collecte d'énergie souvent très contrainte en milieu urbain. Certains dispositifs techniques tel que les centrales de traitement d'air, bouche de ventilation génèrent des effets d'ombrages limitant les surfaces disponibles. La technologie Building Integrated Photovoltaïques (BIPV) permet de pallier à ce problème en transformant les façades des bâtiments en éléments producteurs d'électricité. Aujourd'hui les cellules PV les plus efficaces sont devenues bon marché et il est envisageable de réaliser un déploiement massif des modules BIPV sur les grandes surfaces qu'offrent les façades des bâtiments. Ce type de cellule étant essentiellement sombre, la diversité d'aspect et l'intégration esthétique sont limitées. Afin de donner davantage de liberté artistique aux architectes qui concevront ces bâtiments et éviter aux nouveaux quartiers d'être intégralement sombres, il est nécessaire d'imaginer des modules BIPV esthétiques. Cependant, un changement de couleur d'un module PV modifie son spectre d'absorption et engendre ainsi une perte d'énergie produite.

L'objectif de ces travaux est donc de concevoir un module BIPV esthétique, peu coûteux et avec le moins de perte de performance possible. On abordera premièrement une étude bibliographique des travaux considérant l'esthétique des modules PV, comme, les filtres optiques multicouches, la teinte de l'encapsulant ou encore la peinture céramique sur verre. On s'appuiera ensuite sur la théorie de l'optique ondulatoire afin de mettre en lumière les limites potentiellement exploitables de l'œil humain et qui est la voie de recherche adoptée pour notre étude. Les premiers résultats obtenus concernant la simulation optique de la perception humaine seront ainsi présentés.

## 2. COMPROMIS EFFICACITE/ESTHETIQUE

### 2.1. QUANTIFIER L'EFFICACITE

Une cellule PV possède une limite de rendement théorique car son fonctionnement repose sur la jonction de deux matériaux semi-conducteurs (Shockley et Queisser, s. d.), où seules les électrons ayant suffisamment d'énergie (supérieure à une valeur donnée  $E_g$ ) peuvent franchir cette jonction et ainsi être récupéré sous forme d'électricité. La taille et le nombre des jonctions définissent la quantité d'électrons maximum pouvant circuler. Ainsi les cellules PV les plus répandues, en silicium monocristallin à une seule jonction, ont une limite d'efficacité théorique de 33 %. Le surplus d'énergie est alors converti sous forme de chaleur (pertes par thermalisation) (figures 1 et 2). De plus, le Silicium monocristallin convertit les rayons lumineux sur des longueurs d'ondes allant de 350 à 1100 nm (figure 1). L'énergie présente dans la partie du spectre solaire au-delà de 1100 nm est donc perdue (pertes par transparence).

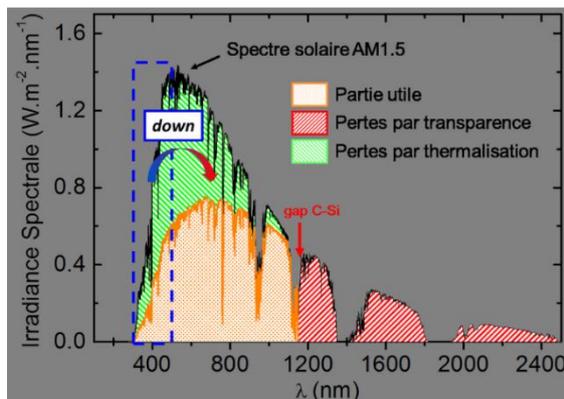


Figure 1 : Partie utile du spectre solaire convertie en électricité par une cellule PV Silicium (Abdellaoui 2015)

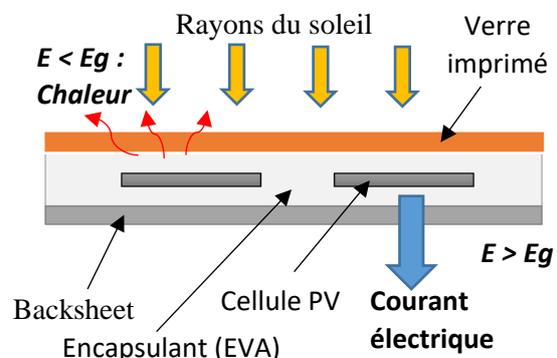


Figure 2 : Schéma en coupe d'un module photovoltaïque et de son fonctionnement

Lorsque l'on modifie l'apparence d'un module PV en jouant par exemple sur sa couleur, une partie du spectre solaire dans le visible est réfléchi et/ou absorbée avant l'arrivée sur la cellule, ce qui induit une nouvelle perte d'efficacité par rapport à la limite théorique (Halme et Mäkinen 2019). Cette perte dépend de la couleur appliquée sur le module, car chacune ne transmet pas l'énergie de la même manière. En effet, certaines sont plus énergétiques que d'autres, comme les différents tons de gris, le violet, le marron, le bleu, le kaki. Ainsi, dans le cas de cellules monocristallines à une seule jonction, le blanc 9.5 (figure 3) a un rendement maximal théorique de 24,1% tandis que celui du noir de référence est de 33,4%. Si l'on veut allier esthétique et performance, il est nécessaire d'utiliser des couleurs engendrant un bon rendement énergétique ainsi que des méthodes de colorations minimisant l'impact sur le spectre incident.

Dark skin 0.103 32.7 %	Light skin 0.354 30.6 %	Blue sky 0.185 31.8 %	Foliage 0.133 32.6 %	Blue flower 0.233 31.3 %	Bluish green 0.418 30.2 %	Orange 0.311 30.9 %	Purplish blue 0.114 32.2 %	Moderate red 0.199 31.6 %	Purple 0.064 32.9 %	Yellow green 0.444 30.5 %	Orange yellow 0.436 30.1 %
Blue 0.057 32.7 %	Green 0.230 32.0 %	Red 0.126 32.2 %	Yellow 0.607 28.9 %	Magenta 0.200 31.4 %	Cyan 0.189 31.7 %	White 9.5 0.909 24.1 %	Neutral 8 0.585 28.4 %	Neutral 6.5 0.357 30.6 %	Neutral 5 0.191 32.0 %	Neutral 3.5 0.089 32.9 %	Black 2 0.032 33.4 %

Figure 3 : Rendements théoriques maximaux de différentes couleurs pour des modules PV (Halme et Mäkinen 2019)

## 2.2. QUANTIFIER L'ESTHÉTISME

L'esthétique étant une notion subjective, il est intéressant de parvenir à le quantifier afin d'estimer le mieux possible les préférences du plus grand nombre de personnes. Ici, on s'intéresse à l'impact esthétique des modules solaires en général. Une des premières notions importantes est le paysage environnant : en effet, la perception plus ou moins agréable d'un objet dépend de l'environnement dans lequel il est placé. Cette impression peut dépendre d'un facteur culturel appris de la société humaine et d'un facteur biologique plutôt innée de ce qui est beau (attirant) ou non dans le paysage. (Sánchez-Pantoja, Vidal, et Pastor 2018). Parmi les notions les plus objectives, l'esthétique va d'abord dépendre de la visibilité de l'objet. En effet il semble évident que si l'objet n'est pas visible, il ne posera pas de problème visuel. Le BIPV est lui destiné à être présent sur les façades, donc visible depuis le sol ainsi que depuis les autres bâtiments. Ensuite, les observateurs seront sensibles à sa couleur, à sa texture (éblouissement ou non), et à sa géométrie dans la façade (partie intégrante, juste déposé, fixé en bataille). Les facteurs variables sur lesquels on peut jouer sont ainsi la couleur et la texture. Il existe plusieurs méthodes pour colorer un module PV, comme les filtres optiques multicouches, la teinte de l'encapsulant ou encore enfin la peinture céramique sur verre.

## 2.3. LES FILTRES OPTIQUES MULTICOUCHES

La lumière est une onde et par conséquent, elle est sujette à des phénomènes d'interférences après diffraction. Grâce à une superposition de lames minces d'indices optiques différents (miroir de Bragg) et de l'épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière visible, il est possible de ne réfléchir qu'une partie du spectre solaire et ainsi observer des couleurs par interférences constructives (figure 4). Celles-ci se produisent lorsque  $\lambda = 4 \cdot e_i \cdot n_i$  ( $i = B$  ou  $i = H$ ), où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $e_i$  l'épaisseur de la lame mince et  $n_i$  l'indice optique du milieu. Cette technologie permet d'obtenir des couleurs saturées et relativement pures (Bläsi 2017) (figure 5) avec un spectre de réflexion comportant des bandes fines. Ainsi, la perte de production d'énergie est relativement faible (de 3 à 10 % de pertes selon la couleur par rapport à un module PV non coloré) (Kutter 2018). Des couleurs plus variées peuvent

être obtenues avec des empilements de couches plus complexes. Cependant, les procédés de fabrication de tels structures sont difficiles et restent coûteux (surcoût pouvant atteindre 100 euros par m<sup>2</sup>). De plus, des couleurs vives et saturées ne font pas partie des cas généraux concernant l'aspect des bâtiments, où l'on recherche plutôt des couleurs plus sobres, proche des matériaux constituant le paysage urbain afin que les modules BIPV s'intègrent dans leur environnement.

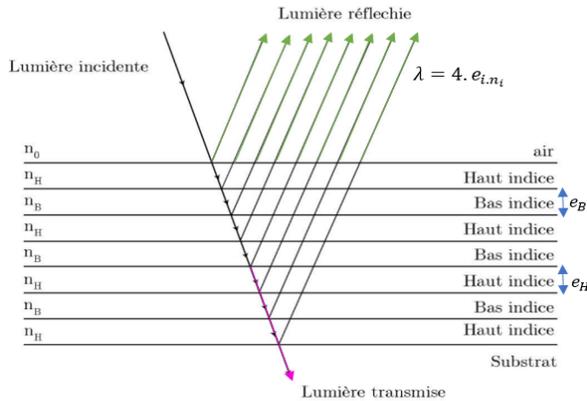


Figure 4 : Schéma d'un filtre optique multicouche (miroir de Bragg) Figure 5 : Modules PV montrant le niveau de saturation obtenu avec des filtres optiques multicouches (Bläsi 2017)

#### 2.4. LA TEINTE DE L'ENCAPSULANT

Lorsqu'un module PV est assemblé (laminé), la cellule PV est figée dans un polymère, l'EVA, qui joue le rôle d'encapsulant entre deux plaques de verres. Ils en existent des colorés, pouvant être utilisés lors de la fabrication du module PV. Originellement conçus pour le contrôle des radiations solaires au sein d'un bâtiment, leur fonction première est de réduire la transmittance, c'est pourquoi ils possèdent une absorbance relativement élevée. Ceux-ci donnent ainsi des couleurs peu saturées et avec davantage de pertes énergétiques que la technologie précédente (6 à 20 % de pertes par rapport selon la couleur par rapport à un module PV non coloré) (Kutter 2018). Enfin, colorer un module PV de cette façon reste la moins chère (environ 12 euros de plus au mètre carré).

#### 2.5. L'IMPRESSION CERAMIQUE

Les encres céramiques peuvent être appliquées en surface du verre et être stables pendant plus de 30 ans, soit environ la durée de vie du module PV (25 ans selon les normes IEC). Malgré un certain coût (35 euros de plus par mètre carré) (Kutter 2018), cette technologie permet d'avoir une grande liberté artistique. En effet, un large panel de couleur est disponible et il est possible d'imaginer toutes sortes de dessins, de motifs complexes pouvant imiter les matériaux du paysage urbain comme la brique, le bois, le marbre ou la pierre. Le projet Dutch Solar Design a mis au point des modules BIPV avec une trame adaptée à des motifs pointillés. (Slooff et al. 2017). Selon le taux de couverture en encre du module, la perception des motifs (figure 6) ainsi que l'énergie transmise varient. Cette technique peut jouer avec les limites de résolution de l'œil humain et s'avérer exploitable. La faible présence bibliographique d'études sur le sujet pousse à vouloir explorer cette voie et déterminer les types de motifs et de couleur pouvant tromper l'œil humain. Celui-ci est limité en résolution à cause du phénomène de diffraction. En effet, le critère de Rayleigh indique qu'au-delà d'un angle limite, l'œil peut distinguer des tâches lumineuses différentes. Des diffractions plus ou moins importantes suivant la longueur d'onde et le diamètre de la pupille sont donc à considérer. Par le calcul, on peut observer la répartition énergétique et colorimétrique sur la rétine de l'œil due à ces phénomènes de diffraction.

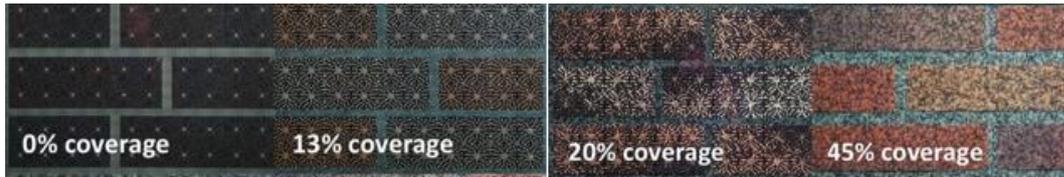


Figure 6 : Module PV imitant de la brique de Dutch Solar Design

### 3. OPTIQUE ONDULATOIRE

#### 3.1. THEORIE

La lumière est un flux de photons mais également une onde électromagnétique. Celle-ci peut alors être décrite grâce aux nombres complexes et la transformée de Fourier, qui permet de travailler dans un domaine spectral plutôt que dans l'espace des fréquences spatiales (Dubois 2019). En éclairage spatialement cohérent, les ondes sont en phase et possèdent la même fréquence (monochromatique). En éclairage incohérent (polychromatique), ce qui est le cas avec le soleil, aucune onde n'est en phase avec l'autre et il suffit de sommer les intensités lumineuses de chaque longueur d'onde en un point donné. Dans notre modèle, l'image source est décrite par une matrice donnant la répartition spatiale énergétique lumineuse de l'image. Lorsque l'onde rencontre un objet diffractant, la matrice subit un produit de convolution avec la réponse percussionnelle incohérente (RPI) de la pupille, ce qu'on appelle l'étalement du point lumineux. Ce calcul est basé sur un produit des transformées de Fourier (TF) avant d'en calculer la transformée inverse (figure 7). Ici  $\gamma$  est le grandissement entre l'image et l'objet source. Le phénomène de diffraction limite les instruments optiques comme l'œil humain à une valeur de résolution angulaire définie par le critère de Rayleigh (Benisty, s. d.) :  $\alpha_{lim} \approx 1,22. \lambda/a$  et  $\tan(\alpha/2) = d/2f = D/2L$ , où  $a$  est la taille de la pupille,  $d$  est la taille de l'image au niveau de la rétine,  $D$  la taille de l'objet,  $f$  est la focale de l'œil et  $L$  est la distance d'observation.

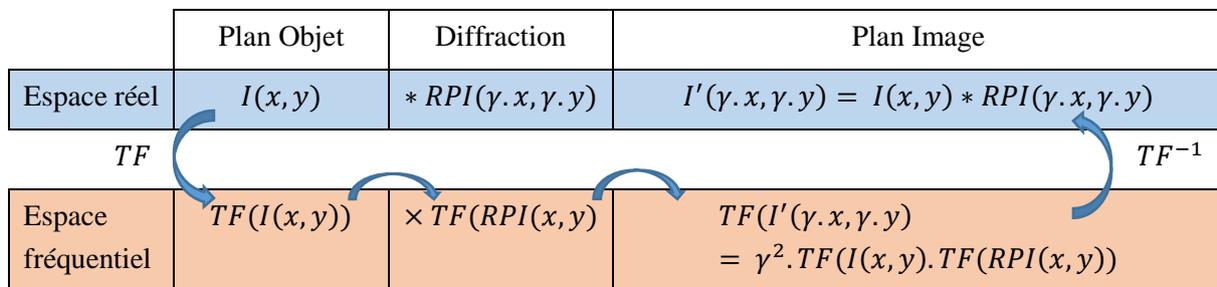


Figure 7 : Calcul de la formation d'une image en éclairage incohérent

#### 3.2. ŒIL HUMAIN

Deux points proches ne seront discernables par l'œil que si la distance séparant leurs image au niveau de la rétine est supérieure à la distance limite de Rayleigh (figure 8):  $d_{Rayleigh,rétine} = f. \tan(1,22. \lambda/a)$ . Mais l'oeil se comporte différemment suivant la longueur d'onde perçue et il existe une différence de puissance focale d'environ 1,5 dioptries entre les bornes rouges et bleu du spectre visible. (Blomme, s. d.). La pupille varie également de taille d'ouverture suivant la luminosité, allant de 2 mm lorsqu'il y a beaucoup de lumière à 7 mm lorsqu'il fait noir. Ceci permet à la rétine de ne pas capter trop d'énergie pour ne pas saturer et ainsi éviter des lésions. Celle-ci est composée de 3 types de cônes différents pour détecter les couleurs, plus ou moins sensibles au bleu, au vert, et au rouge (figure 9). (Peharz et Ulm 2018).

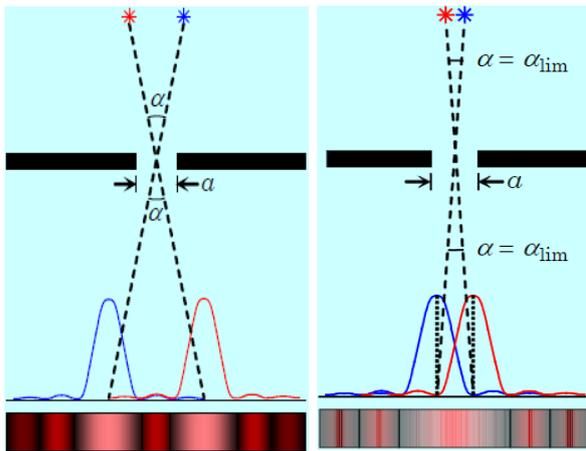


Figure 8 : Schéma de la limite de perception de l'oeil

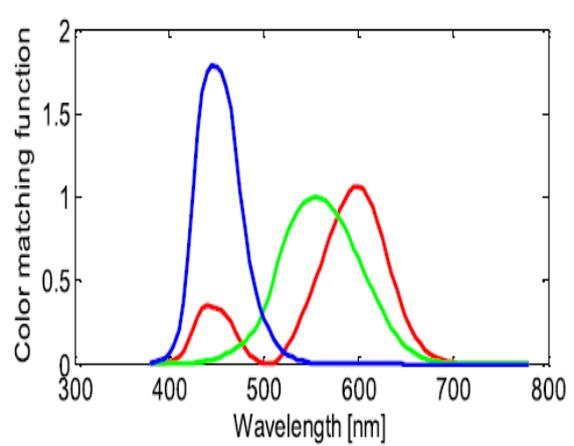


Figure 9 : Coubes de sensibilités des cônes de l'oeil

## 4. RESULTATS : CHROMATISME ET RESOLUTION

### 4.1. SIMULATION

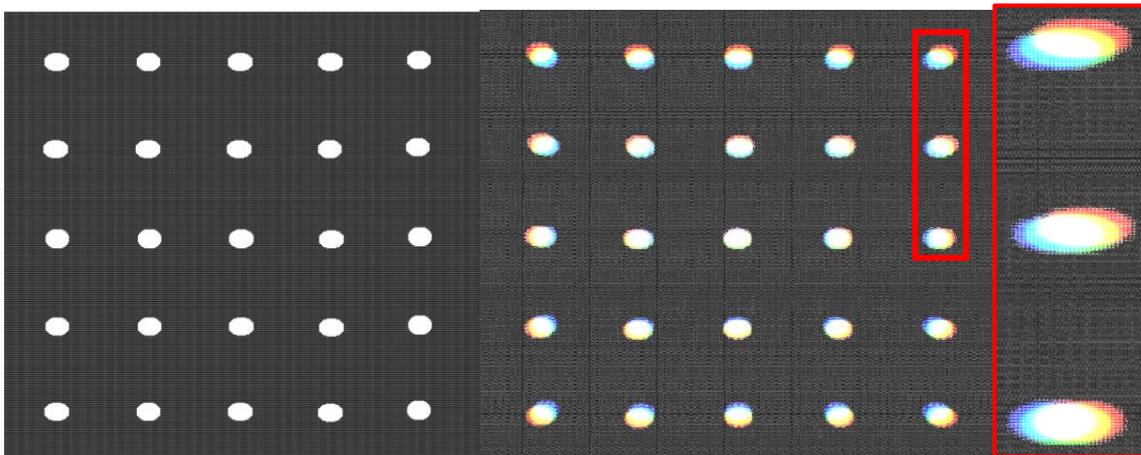


Figure 10 : De gauche à droite : 1. L'objet source observé ; 2. Image obtenue sur la rétine ; 3. Zoom sur la partie encadrée montrant les décalages colorimétriques

On a simulé numériquement la diffraction d'une image dans l'œil humain en utilisant le programme Matlab. Une image est d'abord convertie en matrice « Source » composées de valeurs représentant l'intensité lumineuse en niveau de gris. L'objet source qui a été choisi est une image noire carrée de 1,8m de côté représentant un module PV, sur lequel plusieurs points blancs représentant des points d'encres sont uniformément répartis (figure10). Afin d'obtenir un résultat observable sans nécessiter un important temps de calcul (échantillonnage plus grossier), la taille des points blancs est importante (environ 10cm) devant la taille de la rétine. Pour une distance d'observation de 5m, l'image qui sera formée sur la rétine fera donc une taille d'environ 6 mm de côté. On suppose que les points blancs reflètent l'intégralité de la lumière blanche, on peut alors multiplier cette matrice source par les valeurs d'intensités du spectre solaire. Enfin on utilise les courbes de sensibilités des cônes de l'œil humain pour pondérer certaines longueurs d'ondes dominantes et évaluer davantage la visibilité perçue. Les simulations étant numériques, il est nécessaire de représenter les couleurs d'un pixel grâce à trois coordonnées colorimétriques représentant les intensités relatives de Rouge, de Vert et de Bleu, correspondant respectivement à des longueurs d'onde de référence de 435 nm, 546 nm et 700 nm. Trois images représentant les composantes rouge, verte et bleue sont donc déduites de l'image source. Celles-

ci subissent chacune une diffraction différente on obtient ainsi trois images pour chaque composante. On réalise enfin une superposition de ces images afin d'observer le rendu final des couleurs (figure 10).

On y observe un décalage colorimétrique lorsqu'on s'éloigne de l'axe optique. En effet, plus les rayons sont éloignés du centre de l'image et plus ils subissent la diffraction. De plus, les rayons avec une plus grande longueur d'onde (rouge) vont subir d'avantage l'étalement du point car la focale de l'œil a une valeur plus élevée. Il en résulte des contours de points rouge à l'extérieur et bleu vers l'intérieur. Ce résultat est logiquement attendu de par la différence de grandissement pour chaque longueur d'onde et donc la différence de la taille des images. Ainsi, quelle que soit la distance d'observation, l'image de la composante rouge sera toujours 3,5% plus grande que l'image de la composante bleue. Pour évaluer numériquement la visibilité perçue, on peut comparer la valeur des décalages avec la distance limite de Rayleigh au niveau de la rétine. Pour une pupille de 2 mm de diamètre, celle-ci est comprise entre 4 et 8 micromètres sur la bande de longueur d'onde visible 380 nm – 780 nm. On est donc poussé à supposer que si la distance entre les centres des points est inférieure à 4  $\mu\text{m}$ , les points images correspondants vont paraître confondus. A l'inverse, si la distance entre deux pics est supérieure à 8  $\mu\text{m}$ , les points images paraîtront irisés. On compare les abscisses des centres des points les plus excentrés. Pour une distance d'observation de 5 mètres, entre les longueurs d'ondes 380 nm (la moins diffractée) et 780 nm (la plus diffractée), on mesure un décalage de 78  $\mu\text{m}$ . Cette valeur est supérieure à la distance limite de Rayleigh (voir tableau). Il semble donc que ce décalage chromatique soit observable à l'œil nu dans ces conditions. Il est possible de calculer à partir de quelle distance à l'axe optique le décalage des centres des points est supérieur à la distance de Rayleigh (voir tableaux). Ainsi, au niveau de la rétine, les points qui se trouvent au-delà de cette distance à l'axe optique subissent un chromatisme qui semble perceptible à l'œil nu.

#### 4.2. DETAILS DE CALCULS

La focale de l'œil basse longueur d'onde :	$f_{\min(\text{bleu})} = 0.01639 \text{ m}$
La focale de l'œil haute longueur d'onde :	$f_{\max(\text{rouge})} = 0.01695 \text{ m}$
Grandissement pour le Rouge :	$\gamma_R = \frac{f_{\max(\text{rouge})}}{L}$ ; pour le bleu : $\gamma_B = \frac{f_{\min(\text{bleu})}}{L}$
Décalage relatif :	$\beta = \frac{x_R - x_B}{x_B} = \frac{(\gamma_R - \gamma_B) \cdot x_0}{\gamma_B \cdot x_0} = \frac{(f_{\max} - f_{\min})}{f_{\min}} = 0,0342$
=> Rouge décalé de 3,5 % par rapport au bleu	
Longueur de Rayleigh au niveau de la rétine :	$d_{\text{Rayleigh} \text{rétine}} = f \cdot \tan\left(1,22 \cdot \frac{\lambda}{a}\right)$
Distance limite à l'axe de perception :	$X_{\text{limite}} = \frac{d_{\text{Rayleigh}}}{(\beta - 1)}$

	Distance de Rayleigh au niveau de la rétine	Distance limite à l'axe de perception du chromatisme
a = 2 mm	$d_{\text{Rayleigh}} \in [4, 8] \cdot 10^{-6}$	$X_{\text{limite}} \in [1, 2,5] \cdot 10^{-4}$
a = 3,5 mm	$d_{\text{Rayleigh}} \in [2, 4] \cdot 10^{-6}$	$X_{\text{limite}} \in [0,5, 1,25] \cdot 10^{-4}$
a = 7 mm	$d_{\text{Rayleigh}} \in [1, 2] \cdot 10^{-6}$	$X_{\text{limite}} \in [0,25, 0,75] \cdot 10^{-4}$

## 5. PERSPECTIVES

Les précédents résultats ont montré que les valeurs des décalages colorimétriques sont de l'ordre de grandeur de la distance de Rayleigh, limite de résolution de l'œil humain au niveau de la rétine. Cette proximité pousse à vouloir poursuivre les travaux dans cette voie, l'idée étant de pouvoir s'approcher correctement de la perception d'un motif complexe. Les paramètres sur lesquels il sera possible de jouer sont la variation de couleur de la source, mais également la variation de contraste. Dans une optique de détermination du spectre réfléchi et de l'énergie mise en jeu, il est important de parvenir à affiner le modèle numérique à l'aide de grandeurs réelles. Des mesures de spectre de réflectivité d'échantillons de verres peints par céramique ont été réalisées afin d'utiliser des valeurs réalistes dans les simulations, ce qui permettra de travailler avec des points d'une autre couleur que le blanc purement théorique. Par la suite, on jouera sur la taille des points, leurs couleurs, leur nombre et leur positionnement dans le motif afin de déterminer les meilleures configurations pour tromper l'œil humain. A terme, l'idée est de comparer les résultats de simulations de certains motifs avec les images perçues par un individu dans la réalité afin d'évaluer la pertinence du modèle numérique et ainsi l'affiner.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- « Abdellaoui, Nora. (2015). Rare Earth Luminescent Thin Film Coupled with Metallic Nanostructure Synthetized by PLD : Study of the Growth, the Structure and the Luminescence Properties for down Shifting Application. » s. d. ResearchGate. Consulté le 8 février 2021. [https://www.researchgate.net/figure/Spectres-solaire-AM-1-5-La-fraction-du-spectre-convertie-efficacement-par-une-cellule\\_fig25\\_301570255](https://www.researchgate.net/figure/Spectres-solaire-AM-1-5-La-fraction-du-spectre-convertie-efficacement-par-une-cellule_fig25_301570255).
- « ADEME ». s. d. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-batiment-edition-2013-8123.pdf>.
- Benisty, Henri. s. d. « Optique physique, interférences et diffraction », 21.
- Bläsi, Benedikt. 2017. « MORPHO BUTTERFLY INSPIRED COLOURED BIPV MODULES », 5.
- Nicolas BLOMME, Studio. s. d. « Abbe (nombre d') ». Docteur Damien Gatinel. <https://www.gatinel.com/glossaire/abbe-nombre-d/>.
- Dubois, Arnaud. 2019. « Optique de Fourier ». <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=187&fileid=392>.
- Halme, Janne, et Pyy Mäkinen. 2019. « Theoretical Efficiency Limits of Ideal Coloured Opaque Photovoltaics ». *Energy & Environmental Science* 12 (4): 1274-85. <https://doi.org/10.1039/C8EE03161D>.
- Kutter, Christoph. 2018. « DECORATED BUILDING-INTEGRATED PHOTOVOLTAIC MODULES: POWER LOSS, COLOR APPEARANCE AND COST ANALYSIS », 5.
- Peharz, Gerhard, et Andreas Ulm. 2018. « Quantifying the Influence of Colors on the Performance of C-Si Photovoltaic Devices ». *Renewable Energy* 129 (décembre): 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.068>.
- Sánchez-Pantoja, Núria, Rosario Vidal, et M. Carmen Pastor. 2018. « Aesthetic Impact of Solar Energy Systems ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98 (décembre): 227-38. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.021>.
- W. Shockley et H.J. Queisser, s. d. « Detailed Balance Limit of Efficiency of P-n Junction Solar Cells », 11.
- L. H. Slooff, F. Frumau, M. Rietbergen, L. Polinder, E. M. B. Heller, F. De Vries, T. S. Visuals, V. D. Oudkarspel, E.E. Rotterdam. 2017. « An architectural approach for improving aesthetics of PV »,
- « Spectres-solaire-AM-1-5-La-fraction-du-spectre-convertie-efficacement-par-une-cellule.png ». s. d.