

**Caractérisation
de la couleur et
de l'apparence
dans l'industrie
automobile**



Caractérisation de la couleur et de l'apparence dans l'industrie automobile à l'aide d'une fonction BRDF (*bi-directional reflectance differential function*) sous-échantillonnée et d'une nouvelle spectrophotométrie multiangles portable

Les plastiques colorés sont des compositions chimiques complexes, impliquant des processus et procédés avancés, à la pointe de l'innovation et en constante évolution. En adoptant les nanomatériaux et les microtechnologies dans les procédés et les dispositifs de contrôle, des ingénieurs créatifs ont mis au point des systèmes qui permettent de réduire les coûts de l'innovation artistique dans le domaine de la couleur, tout en suscitant la réponse émotionnelle voulue par le concepteur.

Les mesures sphériques et planes de la spectrophotométrie traditionnelle sont insuffisantes pour caractériser les plastiques colorés modernes. Cet article présente une combinaison originale de BRDF spatiale sous-échantillonnée (comprenant la géométrie hors plan) et d'un modèle phénoménologique simple, qui capture à la fois les contributions nanométriques et micrométriques de formulation et les contributions de procédé, à l'apparence globale. Il décrit les géométries d'échantillonnage spectrophotométrique préférables et propose des exemples de variations de distribution de lot à lot de formulation et de procédé, et d'identification des contributeurs.

Introduction

Pour les matériaux où le brillant, la texture et d'autres effets jouent un rôle important, le processus de sélection, de définition et de contrôle de production repose toujours sur des échantillons physiques et une évaluation visuelle. Les méthodes traditionnelles de colorimétrie et de communication des couleurs ne prennent pas directement en charge le contrôle des processus de production et la détection de la cause première. Les pigments texturés et nacrés qui sont ajoutés à certains plastiques font partie de ces domaines qui pourraient tirer avantage d'un moyen numérique de définir, de communiquer et de rendre l'apparence.

L'apparence visuelle est affaire à la fois de détection et d'inférence. Elle étend la réflectance spectrale jusqu'à un certain point dans le contexte d'une observation. Elle résulte de suppositions relatives aux conditions d'éclairage et d'observation ainsi qu'aux propriétés physiques de l'échantillon, telles sa forme et sa texture. À l'origine, notre propos était de livrer l'assise d'un processus colorimétrique fiable basé sur la définition et la communication spectrales des couleurs. Nous avons toutefois besoin pour ce faire d'une méthode permettant de traduire les concepts abstraits de l'apparence chromatique en un modèle expressif concret. Notre recherche en cours s'efforce d'étendre ce paradigme à une définition plus exhaustive de l'apparence totale, incluant le contexte et l'inférence.

Du point de vue de l'instrumentation de mesure, nous partons fondamentalement d'un spectroradiomètre. Une source est dirigée

vers un objet à travers une fonction de transfert optique (FTO) donnée. La lumière incidente interagit à travers chaque couche et interface de l'objet selon les équations de Maxwell et subit une diffusion de Mie et Rayleigh. À partir de là, la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) ou BSSRDF (*Bidirectional Subsurface Scatter Reflectance Distribution Function*) résultante est échantillonnée dans une direction d'observation donnée. Cet ensemble d'échantillons de BRDF est collecté par un système optique doté d'une deuxième FTO. Nous captions alors la FTO et nous la transformons en termes de contexte (décrit et défini ci-après). Une fois l'information traitée pour le contexte, survient l'étape finale impliquant l'inférence, qui rend possible la création, la communication et la prise de décision.

Le défi posé par la mesure de la BRDF d'un échantillon tient au temps nécessaire à la prise de mesures gonio-spectroradiométriques, celles-ci nécessitant un grand nombre d'angles/géométries d'éclairage et d'observation. Notre recherche s'est focalisée sur des prises de mesure à l'aide d'appareils à main, qu'il est difficile de maintenir en position fixe pendant plus d'une ou une seconde et demie. Une mesure de définition rigoureuse demande par conséquent un plus grand nombre de paires éclairage/observation que ce qui est possible dans le temps imparti. Comment une mesure sous-échantillonnée se rapporte-t-elle à une solution de forme aussi fermée ? Quels sont les angles importants ? Quelles sont les informations spectrales importantes ?

Notre plate-forme de mesure de l'apparence telle que rapportée dans cet article se compose d'un spectrophotomètre multiangles compact associé à un échantillonnage rare des spectres de réflectance directionnelle pour la BRDF traditionnelle (voir la Figure 1). Un concept de spectrophotomètre à diodes basé sur un filtre diélectrique permet de dépasser les limitations de dynamique et de précision des autres approches et d'établir une corrélation *a posteriori* avec les géométries planes existantes. L'éclairage et la mesure à partir de multiples angles hors plan génère un riche ensemble de données, de nature à fournir une description complète de l'aspect de surface. La plate-forme commune a permis de décliner une gamme d'instruments destinés aux différents utilisateurs, de la conception jusqu'à la fabrication.

L'échantillonnage des différentes fonctions BRDF au fur et à mesure qu'elles sont générées définit la réponse résultante utilisée pour quantifier l'apparence. Les mesures spectroscopiques multiangles produisent de grandes quantités de données. Afin de rendre ces données « compréhensibles », on applique des modèles physiques rigoureux pour estimer les descripteurs paramétriques de l'apparence d'une surface. Les recherches dans les



domaines de l'optique, de l'électromagnétisme, de l'infographie et de la vision ont engendré des avancées significatives dans la modélisation de l'aspect de surface. Ces modèles ont été évalués et affinés afin de pouvoir être appliqués aux échantillons et applications de l'industrie. Une suite de modèles de réflectance pour la BRDF et le paramétrage de texture a été développée pour décrire l'aspect de surface. Ces descripteurs (paramètres du modèle) sont transportés en XML afin de fournir l'ossature d'un processus numérique d'aspect de surface, du concept à la création. Voir la Figure 2.

Les données BRDF peuvent être dérivées des mesures gonio-spectro-photométriques par application des données à l'expression suivante :

$$L_r(\mathbf{x}, \omega) = \int_{\Omega_x} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{x}, \omega') (\mathbf{n}_x \bullet \omega') d\omega'$$

où L_r est la radiance réfléchie à \mathbf{x} dans la direction ω . Ω_x est l'hémisphère des directions entrantes, f_r est la BRDF à \mathbf{x} et, dans notre cas, contient à la fois un terme spéculaire/brillant f_{rS} et un terme diffus f_D tels que :

$$f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) = f_{rS}(\mathbf{x}, \omega', \omega) + f_D(\mathbf{x}, \omega', \omega)$$

L_i est la radiance entrante et peut être rapportée au flux par :

$$L_i(\mathbf{x}, \omega') = \frac{d^2\Phi_i(\mathbf{x}, \omega')}{(\mathbf{n}_x \bullet \omega') d\omega' dA_i}$$

Dans le cas d'un modèle de transport de photons multicouche, la forme de l'équation de rendu volumétrique est sensiblement différente de ce qui est présenté plus haut, et elle doit considérer à la fois la profondeur optique de chaque couche diffusante et une fonction de phase décrivant la nature de la fonction de diffusion. L'équation prend la forme :

$$L_r(\mathbf{x}, \omega) = \int_0^s e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \sigma_a(\mathbf{x}') L_e(\mathbf{x}', \omega) d\mathbf{x}' + \int_0^s e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \sigma_s(\mathbf{x}') \int_{\Omega_{4\pi}} p(\mathbf{x}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{x}, \omega') d\omega' d\mathbf{x}' + e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}+s\omega)} L(\mathbf{x}-s\omega, \omega)$$

où la profondeur optique $\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ est donnée par :

$$\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \int_{\mathbf{x}}^{\mathbf{x}'} \sigma_t(t) dt$$

et la fonction de phase peut prendre différentes formes selon la structure du revêtement et la nature du matériau diffusant dominant. La fonction de phase la plus communément utilisée est celle de Henyey-Greenstein, qui peut être combinée à des différences pour chaque couche et/ou composant diffusant. Elle prend la forme généralisée :

$$p(\Theta) = \sum_{i=1}^N \frac{w_i(1-g_i^2)}{4\pi(1+g_i^2-2g_i\cos\Theta)^{1.5}}$$

où $w_i=1$

Où g_i commande la forme de chaque lobe et w_i le poids. Selon la complexité du revêtement, le contexte de l'échantillonnage et l'inférence attendue, il faut de 72 à 90 angles de mesure (canaux) pour obtenir une formulation complète de la BSSRDF d'un revêtement à 3 ou 4 couches, tel qu'une peinture de voiture. À l'autre extrême, de 10 à 12 angles suffisent pour la mesure basée sur la

BRDF d'un plastique homogène, où les différences entre formulation et procédé priment sur les questions de formulation pure.

Objectif du travail

Les standards actuels utilisés pour la mesure de plastiques colorés résultent de mesures prises à l'aide d'un spectrophotomètre goniométrique sphérique ou plane. Cette approche pose problème dans la mesure où les plastiques complexes d'aujourd'hui sont, par nature, tridimensionnels. La contribution de la formulation du plastique à la perception change dans la direction hors plan. Les géométries planes traditionnelles et les systèmes à caméra simple ne rendent pas compte du fait que les effets perceptifs sont goniométriques par nature. Ils changent selon les conditions d'éclairage et d'observation. Aujourd'hui, nous ne mesurons pas l'apparence avec une sphère, nous la moyennisons. Les variations d'apparence dues à l'alignement moléculaire sont des effets perceptifs. Aujourd'hui, nous ne mesurons que la diffusion et la réflexion moyennes de la lumière sur l'échantillon. Comme la BRDF (BSSRDF) résultante varie multidimensionnellement, il en va de même des effets perceptifs tels que la texture et l'alignement moléculaire. Les systèmes d'aujourd'hui ne sont pas capables de caractériser et de communiquer convenablement l'incidence de variations de procédé et de formulation sur les effets perceptifs. Notre objectif est de proposer une solution matériel-logiciel qui puisse le faire efficacement.

Procédure expérimentale

Deux propriétés uniques de l'interaction de la lumière avec la matière peuvent être exploitées dans le processus de mesure visant à apprendre et comprendre la structure et la composition d'un matériau ou d'une couche de revêtement. La première propriété à considérer tient au fait que tous les matériaux sont dispersifs. On entend par là que la capacité à dévier la lumière (indice de réfraction) est différente pour la lumière bleue (400 nm) et pour la lumière rouge (700 nm). Cette dispersivité existe indépendamment de la couleur apparente (absorptivité) de la substance. Même un matériau qui paraît noir ou brillant (comme un miroir) est le lieu d'une dispersion due au fait que la lumière n'interagit pas simplement à la surface, mais pénètre sous celle-ci alors qu'elle est absorbée ou réfléchie. (Ce qui nous intéresse en fait, c'est la constante diélectrique du matériau, qui est dispersif. L'indice de réfraction complexe [dispersivité + absorptivité] est proportionnel à la racine carrée de la constante diélectrique.) La deuxième propriété à prendre en compte est la diffusion de la lumière à l'intérieur d'un matériau. La diffusion de la lumière à l'intérieur d'un matériau peut être décrite de nombreuses manières différentes, mais dans tous les cas, elle est, par nature, également dépendante de la longueur d'onde. La lumière bleue se diffuse différemment de la lumière rouge. Tous les matériaux diffusent la lumière à un certain degré, même un verre apparemment transparent. En soumettant la lumière diffusée par un matériau (ou un revêtement) à une spectrophotométrie à haute sensibilité et en comparant les infimes écarts entre les endroits où la lumière bleue est diffusée par rapport à la lumière rouge, il est possible d'identifier la constitution physique et la structure de ce matériau. L'énergie se conserve. Dès lors, en comprenant les caractéristiques de l'énergie d'éclairage et en mesurant les caractéristiques de la lumière renvoyée par un



matériau, nous pouvons résoudre des modèles de plus en plus complexes permettant d'identifier la constitution physique et la structure des matériaux. La lumière ne peut être que réfléchi, réfractée, diffusée ou absorbée et l'énergie doit être conservée. (La lumière peut encore interagir avec la matière de beaucoup d'autres manières et d'autres sujets tels que la polarisation mériteraient d'être évoqués et traités ici. Nous ne nous y arrêterons toutefois pas par souci de simplicité. Le cas spécial d'interférence peut néanmoins se présenter. Nous y reviendrons plus tard à propos de différents pigments à effets spéciaux.)

Le modèle le plus simple que nous puissions peut-être employer est emprunté à la théorie électromagnétique. On l'appelle « théorie du milieu effectif ». La théorie du milieu effectif suppose que nous pouvons traiter tout revêtement ou matériau comme un matériau homogène, peu importe sa complexité. Un matériau décrit comme composé de 3 couches et 9 ingrédients se traite comme s'il constituait un matériau unique, résultant d'une moyenne pondérée d'ingrédients. La pondération s'effectue selon la répartition de ces ingrédients dans les couches, l'épaisseur des couches et la structure de la frontière entre deux couches adjacentes. Un matériau de formulation donnée (recette d'ingrédients et stratification définie) se caractérisera d'après ses propriétés diffusantes dispersives uniques. Si quoi que ce soit est modifié dans la formulation, ces propriétés uniques changeront. Même si la distribution de la taille moyenne de particules change, les propriétés uniques de diffusion s'en trouveront modifiées.

Outre la théorie du milieu effectif, l'une des méthodes les plus simples pour caractériser le comportement diffusant de la lumière consiste à considérer à quel endroit la lumière est diffusée par rapport à l'endroit où elle est réfléchi ou émerge de l'échantillon, à l'intérieur d'un certain système de coordonnées. Nous pouvons nous représenter cela comme une polarisation, avant/arrière et de bord à bord, dont l'amplitude correspond à l'énergie lumineuse qui n'est pas absorbée. Plus la lumière est diffusée/réfléchi dans une direction donnée, plus l'amplitude est importante. En répétant cette mesure pour chaque longueur d'onde, nous pouvons analyser la nature dispersive du matériau ou du revêtement. Partant de cette analogie, un matériau présentant une réflectivité uniforme à toutes les longueurs d'onde et une diffusion uniforme dans toutes les directions ne montrera de polarisation dans aucune direction. Le Spectralon™ (également appelé Fluorolon™) est un matériau au comportement approchant. Le Spectralon apparaît d'un blanc uniformément diffus sous toutes les géométries d'éclairage quel que soit l'angle d'observation. Un Spectralon bien préparé ne présente ni reflet ni brillant, même aux angles d'incidence très rasants. La meilleure manière de calculer la polarisation de l'énergie consiste à représenter chaque angle d'observation comme un vecteur fixe, tiré du centre de l'échantillon vers le centre de la pupille d'entrée du spectrophotomètre. Un vecteur est créé pour chaque longueur d'onde et chaque angle d'observation, l'amplitude étant la quantité d'énergie mesurée. La polarisation est simplement dérivée de la somme vectorielle de tous les angles d'observation,

longueur d'onde par longueur d'onde, ce qui résulte en un vecteur de polarisation unique pour chaque longueur d'onde. Ce processus consistant à appliquer une hypothèse de théorie du milieu effectif en même temps qu'une sommation vectorielle produit la discrimination nécessaire au niveau des caractéristiques.

Les standards actuels utilisés pour la mesure des plastiques colorés résultent de mesures prises à l'aide d'un spectrophotomètre goniométrique sphérique ou plane. Cette approche pose problème dans la mesure où les plastiques complexes d'aujourd'hui sont, par nature, tridimensionnels. La contribution de la structure du matériau à la perception change dans la direction hors plan. Les géométries planes traditionnelles et les systèmes à caméra simple ne rendent pas compte du fait que les effets perceptifs sont goniométriques par nature. Ils changent selon les conditions d'éclairage et d'observation. Nous ne mesurons pas le brillant et le voile. Il s'agit d'effets perceptifs. Nous ne pouvons mesurer que la diffusion et la réflexion de la lumière sur le matériau. Comme la BRDF (BSSRDF) résultante varie multidimensionnellement, il en va de même des effets perceptifs tels que le brillant et le voile.

Devant la faillite des géométries planes traditionnelles et des systèmes à caméra simple, il était pour nous nécessaire de développer une plate-forme qui inclurait les géométries hors plan. Mais face à la nécessité pour l'industrie d'une corrélation avec les systèmes plans en usage actuellement, il était préférable de procéder à des améliorations incrémentielles de l'architecture existante, plutôt que de tenter des approches plus radicales. En outre, les contingences des instruments de mesure à main, comme la durée de mesure, la stabilité de la plate-forme, etc., excluaient des solutions plus robustes telles que les goniophotomètres à balayage. Des considérations de coût et de temps/stabilité de mesure nous ont amenés à procéder à des expériences visant à déterminer le nombre minimum d'angles d'échantillonnage hors plan nécessaires pour parvenir à notre objectif, à savoir fournir des informations directes de procédé et de formulation. Les plans d'expériences élaborés impliquaient des variations d'éprouvettes thermoplastiques moulées par injection présentant des différences de formulation et de procédés. Les éprouvettes ont été créées et mesurées à l'aide d'un spectrophotomètre goniométrique. Les résultats ont été analysés et des lobes mathématiques y ont été appliqués. Partant de là, nous avons déterminé la géométrie d'échantillonnage de notre plate-forme matérielle. En plus de la géométrie plane à 5 angles traditionnelle, nous avons ajouté deux angles d'échantillonnage plans supplémentaires et quatre angles hors plan. Pour encore renforcer la densité et la robustesse des données, nous avons ajouté une deuxième source lumineuse, ce qui revenait à doubler les résultats de la mesure sans multiplier par deux le coût ou la complexité. Voir la Figure 3.

En nous appuyant sur les descriptions fournies ci-avant, nous avons fabriqué plusieurs systèmes et répété nos plans d'expériences sur une base élargie, en utilisant davantage de variantes de formulation et de procédé avec des incréments plus fins.

Les données brutes ont été traitées par notre méthodologie de sommation des vecteurs spectraux. Cette méthode est cohérente avec les fondamentaux de la théorie du milieu effectif relatifs



à l'agrégation des données spectrales multiangles dans une représentation spectrale à deux ou trois dimensions. La méthode est une somme vectorielle pondérée des directions de mesure, les coefficients de pondération étant les facteurs de réflectance pour chaque direction. Le résultat de cette somme est un spectre de points dans un espace 3D, comprenant un point pour chaque longueur d'onde mesurée.

La somme vectorielle pondérée est également proportionnée par le module de la somme vectorielle d'un réflecteur lambertien blanc idéal, ce qui permet de rendre les valeurs raisonnablement comparables à des valeurs de réflectance types. Le système de coordonnées des résultats se compose de la direction spéculaire (axe des z), de la projection de la direction d'éclairage orthogonale à la direction spéculaire (axe des y), et du produit croisé de ces deux directions (axe des x). Nous appellerons ce résultat les spectres xDNA.

La somme vectorielle xDNA est la somme des vecteurs de direction des détecteurs, proportionnée par la réflectance dans chaque sens, ainsi que par un facteur de pondération supplémentaire dans chaque sens. Le facteur de pondération optionnel peut être utilisé pour limiter la somme vectorielle à certaines directions, pour accentuer certaines directions particulières ou pour correspondre à l'énergie présente dans chaque direction. Toutes les données présentées dans cet article n'utilisent qu'une seule source lumineuse (le 45 degré traditionnel) et les 10 canaux diffus (non spéculaires).

L'effet du paramétrage de l'équipement est, bien sûr, spécifique de l'équipement d'application particulier. Autrement dit, deux échantillons peuvent présenter des spectres xDNA de même forme, et être par conséquent classés parmi les différences de procédé. Aucun critère purement optique ne permet toutefois de déterminer si la différence est due à des réglages différents sur le même équipement, à des équipements d'application différents, à des additifs, à des différences d'humidité ou à d'autres conditions susceptibles d'influencer le procédé d'application. Nous avons recours aux opérations linéaires de translation, de rotation et de mise à l'échelle pour évaluer l'équivalence des formes des spectres xDNA. Toutes les opérations de transformation s'effectuent par rapport à un standard. Le vecteur de translation, la matrice de rotation et le facteur d'échelle sont calculés ensemble, un algorithme de Procrustes appliquant une méthode du moindre carré, du spectre xDNA transformé vers le spectre xDNA standard. Pour les besoins de la comparaison avec le standard, les résultats intermédiaires des opérations de translation et de rotation sont eux-mêmes translés et centrés sur le centre du standard.

Rotation

La rotation du spectre translé xDNA se note xDNAa. La rotation est une caractéristique typiquement associée à des changements de procédé et de distribution dans la recette. Par exemple, dans un procédé de moulage, la rotation est le résultat d'une modification de procédé entraînant soit un changement de la

distribution de la masse moléculaire dans la taille des particules dans une recette, soit un changement de l'orientation des particules résultant de ces changements.

Il n'est pas toujours évident de savoir quelles valeurs, entre celles du spectre aligné xDNAa et celles du spectre mis à l'échelle xDNAs, permettent de détecter le mieux les différences de formulation. Dans certains cas, deux échantillons qui ne diffèrent que par leurs conditions de procédé présentent des différences significatives au niveau des spectres alignés xDNAa. Il devient dès lors nécessaire d'examiner les spectres mis à l'échelle xDNAs pour constater que la différence entre les échantillons constitue en fait une différence de procédé et non une différence de formulation. D'un autre côté, on trouvera facilement des cas où les différences de xDNAs seraient très petites pour des échantillons présentant des différences de formulation notables, comme pour des gris diffus.

Pour poursuivre dans l'analogie biologique, nous pouvons considérer que la relation entre le spectre xDNA non transformé et le spectre mis à l'échelle xDNAs est comparable à la relation entre le phénotype d'un être vivant et son génotype. Tout comme le phénotype d'un être vivant n'est pas la seule résultante de son bagage génétique, mais découle également de son interaction avec son environnement, le xDNA dépend à la fois de la surface du matériau sous-jacent, caractérisé par le xDNAs, et de son interaction avec son environnement, c'est-à-dire les conditions du procédé d'application. Lorsque nous considérons les transformations du xDNA, nous devons prêter attention à la fois aux spectres transformés et aux paramètres des transformations. En pareilles situations, il n'est pas possible de condenser toutes les informations pertinentes sous un seul chiffre. Gardez toutefois à l'esprit que les indices ou les autres valeurs uniques comme la formule de différence de couleur sont utilisés avant tout parce que leur simplicité et la quantité d'informations qu'ils véhiculent compensent les informations perdues du fait du passage à une valeur unique.

Nous décrivons les formules de différence qui généralisent les fonctions colorimétriques et les formules de différence par rapport aux coordonnées xDNA. Les formules qui utilisent directement les données de réflectance et les applications de ces formules aux données xDNA transformées spatialement sont également évoquées.

La formule DF

Les données colorimétriques sont dérivées des données spectrales à l'aide de fonctions de pondération de l'illuminant et de l'observateur, de fonctions CIELAB et de fonctions de pondération DE^* , DE_{94} , DE_{2000} et autres. De même, il est possible de dériver des données colorimétriques de spectres xDNA tridimensionnels. On distingue plusieurs approches possibles de la généralisation des formules de différence de couleur vers des spectres dimensionnels de plus haut niveau :

1. Calculez les données colorimétriques telles que XYZ et $L^*a^*b^*$, et les formules de différence sur chacun des plans x, y et z. Combinez les formules de différence calculées sur les différents plans en tirant la racine carrée de la somme des carrés des formules de différence sur un seul plan.
2. Calculez les données XYZ sur chacun des plans x, y et z.



Utilisez ces valeurs comme composantes x , y , z et données X , Y et Z vectorisées, puis calculez l'amplitude des vecteurs tridimensionnels X , Y et Z . À présent, calculez les données L , a , b et les différences de couleur à l'aide des amplitudes X , Y et Z sur une seule dimension.

Nous utilisons la notation DF pour la formule de différence calculée par la généralisation du ΔE ordinaire par l'approche 1. La courbe $xDNA$ peut être la courbe $xDNA$ brute, ou l'une des courbes transformées $xDNA_t$, $xDNA_a$ ou $xDNA_s$. Nous notons le résultat du calcul de la DF sur les courbes transformées, respectivement : DF_t , DF_a et DF_s .

Les fonctions colorimétriques ayant été élaborées pour approcher les différences perceptives de l'œil humain, la DF ne constitue pas nécessairement la meilleure formule de différence à appliquer aux spectres $xDNA$ transformés, à savoir $xDNA_t$, $xDNA_a$ et $xDNA_s$. Il n'en reste pas moins que les approches de généralisation de la formule de différence évoquées plus haut fonctionnent tout aussi bien sur des spectres transformés que sur un $xDNA$ non transformé.

Discussion des données et des résultats

Nous présentons ci-après une série d'exemples de complexité croissante. Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus à l'aide d'une seule source lumineuse (angle d'incidence de 45 degrés) et des 10 angles non spéculaires, comme indiqué sur la Figure 3. Comme $xDNA$ représente essentiellement la polarisation de l'énergie, nous commençons par présenter un échantillon pratiquement dénué de polarisation.

Spectralon™

Le Spectralon est un matériau blanc diffus dont la BRDF est pratiquement hémisphérique. Sa réflectance est de 99,1 % sur l'ensemble du spectre visible et diffuse pour tous les angles. Comme la BRDF est uniforme dans toutes les directions et pour toutes les longueurs d'onde, les vecteurs sont tous égaux. Dans ce cas-ci, les résultats des 31 longueurs d'onde seront tous superposés. Ils sont représentés aux Figures 4a et 4b. Dans ces représentations graphiques (et par la suite), l'axe z apparaît vertical, y est horizontal, et x s'enfonce dans le papier. Rappelez-vous que l'axe des z correspond à la direction spéculaire et y à la direction d'éclairage, et que x sort de l'instrument par le côté. Veuillez noter que la Figure 4b représente le même résultat que 4a, mais avec l'axe tracé sur une différente échelle. Les différences infimes montrées par la Figure 4b sont le résultat d'un sablage humide du Spectralon. La Figure 4c représente le résultat d'un ajout de pigment noir au Spectralon, ce qui donne les réflectances d'échantillons représentées de 99,1, 80, 60, 40, 20, 10, 5 et 2 %.

Carreau céramique

Les Figures 5a et 5b montrent le résultat d'une série de mesures effectuées sur une série de céramiques en gamme de gris. Les valeurs de réflectance sont respectivement de 1, 3,5, 15, 32, 50 et 88 %. Veuillez noter en b la polarisation hors plan, longueur d'onde par longueur d'onde, due à la mince couche de glaçure

du carreau céramique. Celle-ci est absente des échantillons de Spectralon.

Carreaux BCRA rouge et vert

Les Figures 6 représentent des carreaux BCRA rouge et vert. La Figure 6a montre le $xDNA$ du rouge. La Figure 6b montre les références spectrales brutes du rouge. Veuillez noter de nouveau la polarisation hors plan de gauche à droite. Contrairement aux carreaux blancs, cependant, on n'observe pas d'oscillation, longueur d'onde par longueur d'onde. Les Figures 6c et 6d appartiennent au carreau vert. Dans ce cas-ci, la polarisation hors plan forme une boucle, même si elle est sur une petite échelle en x .

Colorants organiques BASF dans des échantillons de polypropylène

La Figure 7 montre une série de formulations de polypropylène différentes comportant 100 % de pigment organique, 99,5 % de pigment organique 0,5 % de pigment noir, 30 % de pigment organique avec 70 % de blanc, 15 % d'organique 85 % de blanc, 8 % de pigment organique avec 92 % de blanc, et 2 % de pigment organique avec 98 % de blanc. Les colorants organiques sont du Violet K5011, du Bleu K6330, du Vert K9360, du Jaune K0961 HD et du Rouge K3911 HD

Échantillons

La Figure 8 montre des colorants organiques BASF à concentration totale à travers le spectre dans l'espace $xDNA$.

Échantillons

La Figure 9 montre des vues dans l'espace $xDNA$, reportées à travers la texture de la surface.

Échantillons

La Figure 10 montre des formulations de gamme de gris en concentrations identiques mais avec des pigments noir et blanc.

Conclusion

Nous avons présenté une combinaison originale de BRDF spatiale sous-échantillonnée (comprenant la géométrie hors plan) et d'un modèle phénoménologique simpliste qui capture à la fois les contributions nanométriques et micrométriques de formulation et les contributions de procédé à l'apparence globale. Nous avons présenté une géométrie d'échantillonnage spectrophotométrique préférable et proposé des exemples de variations de distribution de lot à lot de formulation et de procédé, et de séparabilité des contributeurs. Nous avons présenté une méthode que nous appelons $xDNA$ et les métriques qui en sont dérivées afin de réduire le nombre de données tout en préservant les relations goniométriques essentielles entre des effets perceptifs, tels que la rugosité et le scintillement, et les différences de procédé et de formulation.

Travaux et actions futures

Nous continuons à axer nos efforts de recherche et de développement sur une manière plus robuste de mesurer et de communiquer l'apparence à l'aide d'instruments à main. Les étapes suivantes vont logiquement s'étendre à des outils de mesure, de calcul, de modélisation et de communication spatialement distribués.

Références

QED: The Strange Theory of Light and Matter, Richard P. Feynman, Princeton Science Library, 1971

Zur Elektrodynamik Bewegter Körper, Albert Einstein, Annalen der Physik, 17, 1905

Multiple Scattering Processes, Harriet Kagiwada, Addison Wesley Publishing, 1975

Farbenphysik Fur Industrielle Anwendungen, Georg A. Klein, Springer Verlag, 2004

Light and Matter, Yehuda B. Band, Wiley, 2006

Radiative Transfer, Chandrasekhar, Oxford University Press, 1960

A novel technique for analysis of electromagnetic scattering from microstrip antennas of arbitrary shape, Uckun, S. ; Sarkar, T.K. ; Rao, S.M. ; Salazar-Palma, M., Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, Volume 45, Numéro 4, avril 1997 Page(s) : 485-491

A vector inverse algorithm for electromagnetic scattering, Borden, B. U.S. Naval Weapons Center, China Lake, CA, SIAM Journal on Applied Mathematics (ISSN 0036-1399), Vol. 44, juin 1984, pp. 618-626. 1984

Electromagnetic Scattering by a System of Dielectric Spheres Coated With a Dielectric Shell, Hamid, A. K. ; Hussein, Mousa I. ; Hamid, Michael, University of South Alabama, Mobile, nov. 2003

Fast analysis of electromagnetic scattering from finite strip gratings on a grounded dielectric slab, Valero, Alejandro ; Rojas, Roberto G., Radio Science, Volume 35, Numéro 6, pp. 1307-1314 (page d'accueil RaSc), 2000

A Numerical Solution for Electromagnetic Scattering from Large Faceted Conducting Bodies by Using Physical Optics-SVD Derived Bases, Gianluigi Tiberi, Agostino Monorchio, Giuliano Manara and Raj Mittra, IEICE Transactions on Electronics, Vol. E90-C, Numéro 2, pp. 252-257, 2006

Finite Elements for Wave Electromagnetics, P.P. Silvester, G. Pelosi, IEEE Press : New York, 1994. ISBN 0-7803-1040-3. ix+534 pp.

Illustrations, tableaux et figures

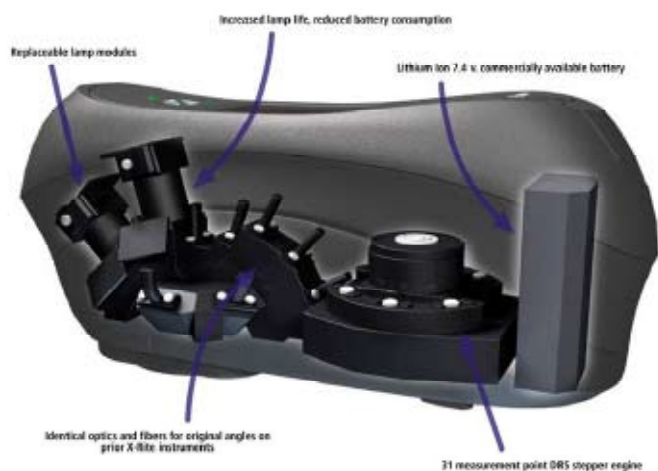


Figure 1 : Gonio-spectrophotomètre hors plan multiangles MA98

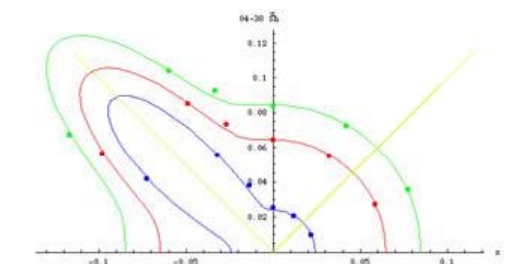
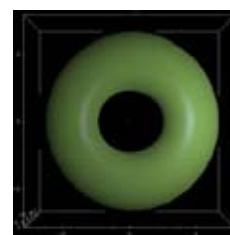


Figure 2 : Figure de la modélisation de la BRDF d'une mesure multiangles et rendu de surface correspondant

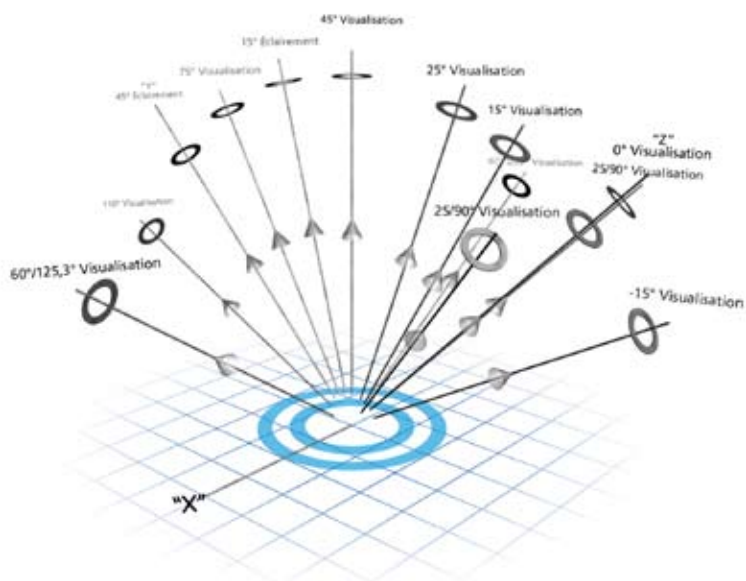
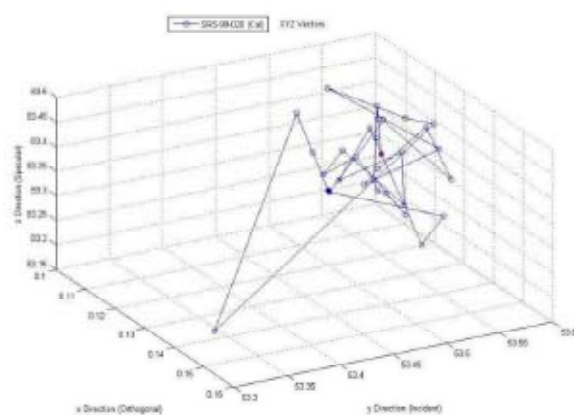
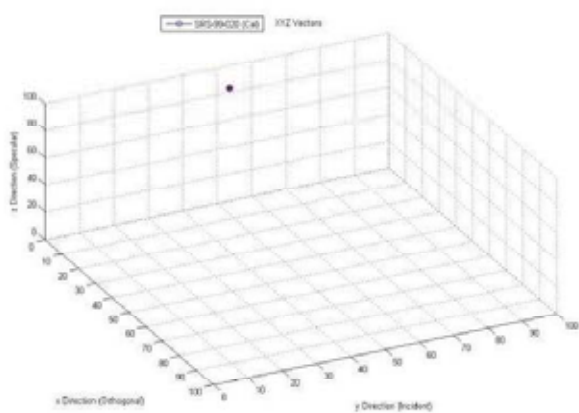
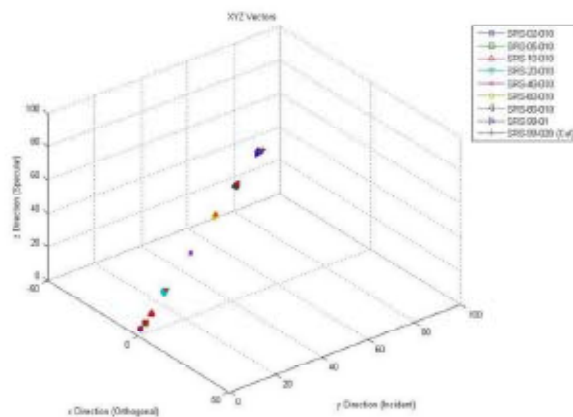
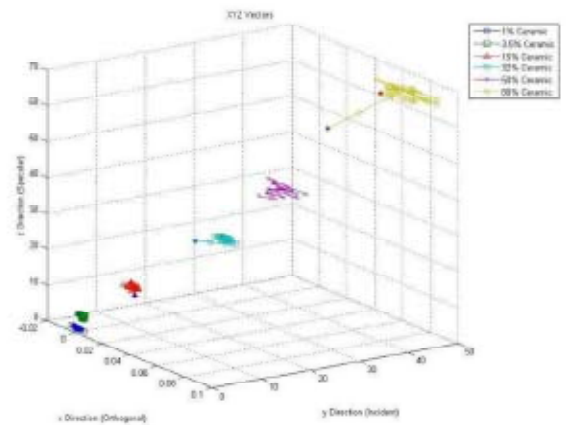
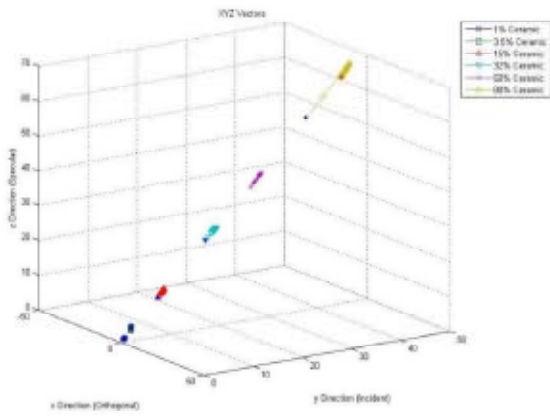


Figure 3 : Géométries et vues du MA98



Figures 4a. et 4b. : Résultats du Spectralon. La Figure 4c montre l'ajout de pigment noir au Spectralon, ce qui donne les réflectances d'échantillons représentées de 99, 1, 80, 60, 40, 20, 10, 5 et 2 %.





Figures 5a. et 5b. : Résultat d'une série de mesures effectuées sur une série de céramiques en gamme de gris. Les valeurs de réflectances sont respectivement de 1, 3,5, 15, 32, 50 et 88 %.

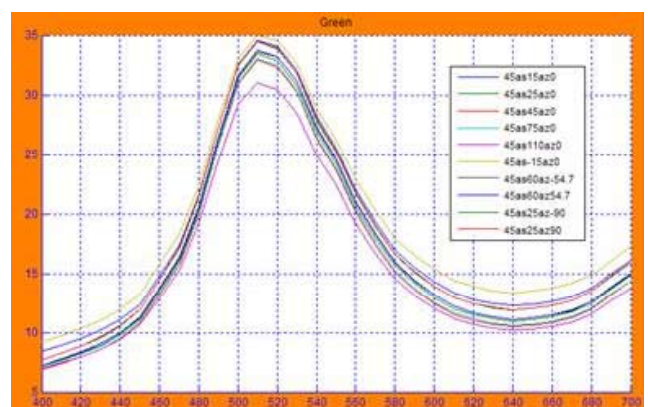
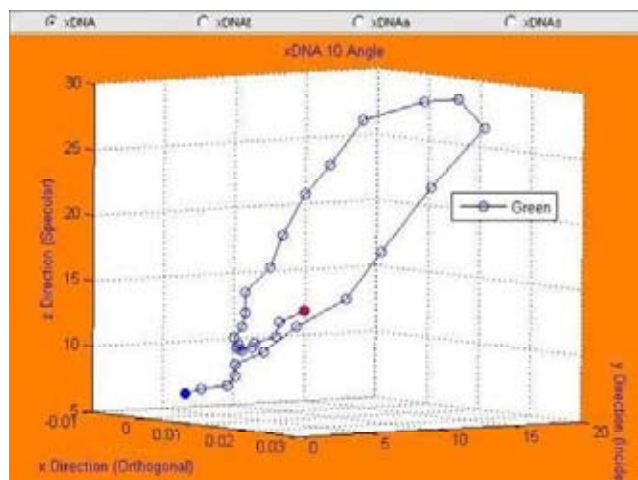
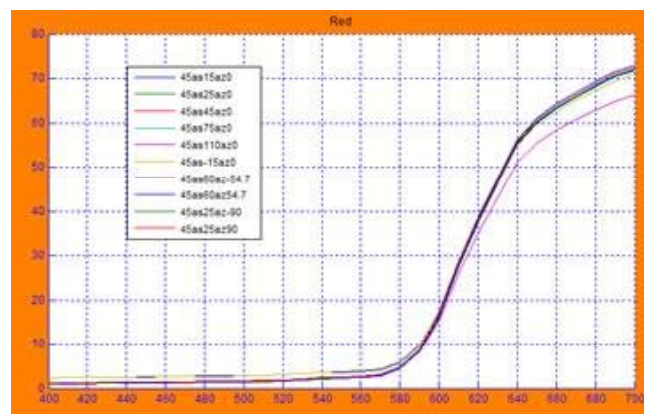
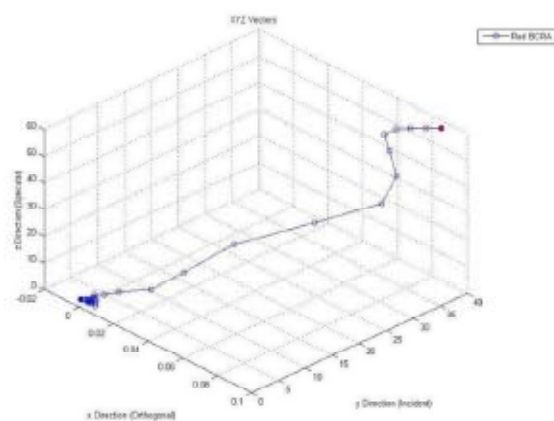


Figure 6 : Carreaux BCRA rouge et vert. La Figure 6a montre le xDNA du rouge. La Figure 6b montre les références spectrales brutes du rouge. Les Figures 6c et 6d appartiennent au carreau vert.

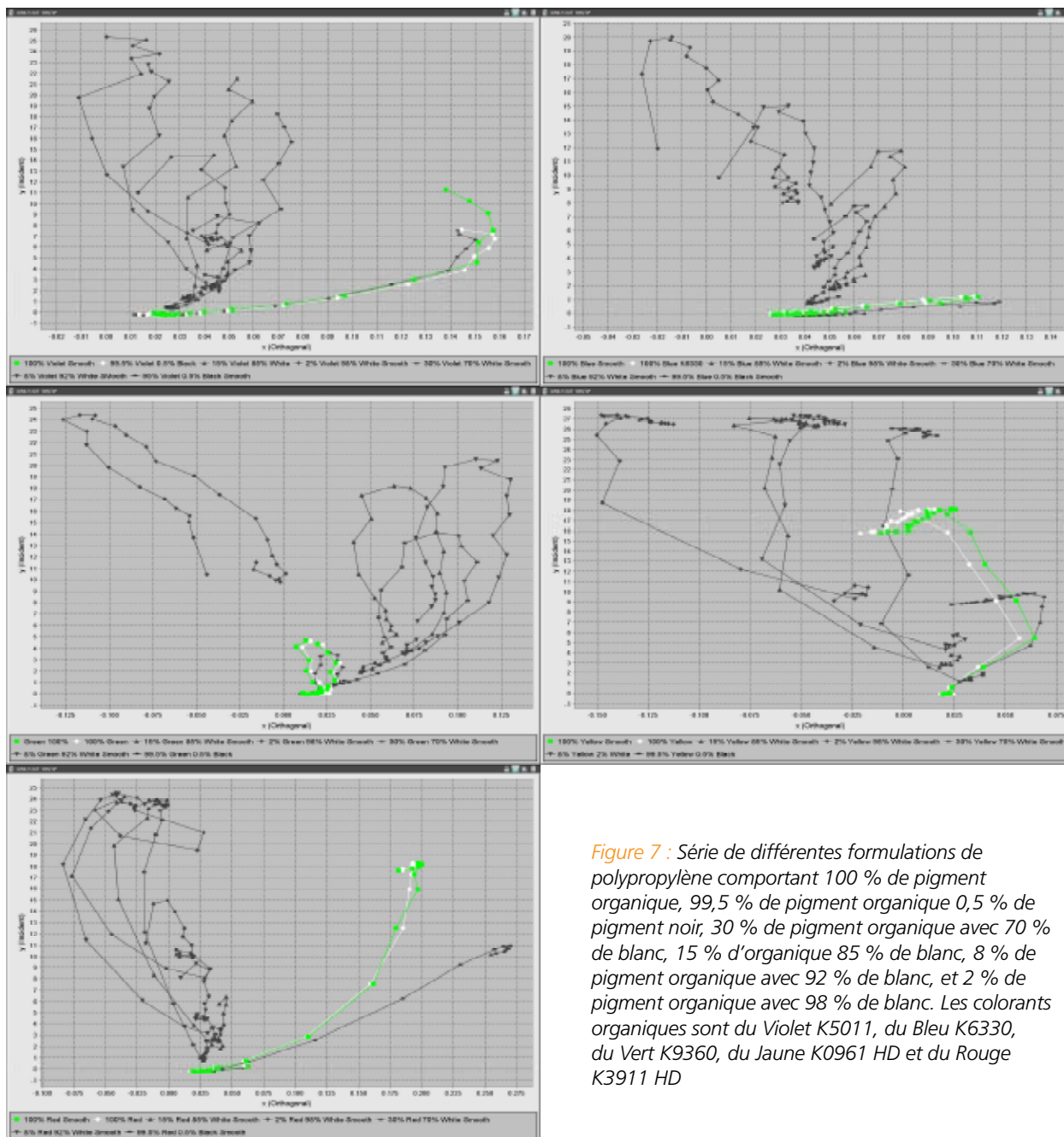


Figure 7 : Série de différentes formulations de polypropylène comportant 100 % de pigment organique, 99,5 % de pigment organique 0,5 % de pigment noir, 30 % de pigment organique avec 70 % de blanc, 15 % d'organique 85 % de blanc, 8 % de pigment organique avec 92 % de blanc, et 2 % de pigment organique avec 98 % de blanc. Les colorants organiques sont du Violet K5011, du Bleu K6330, du Vert K9360, du Jaune K0961 HD et du Rouge K3911 HD

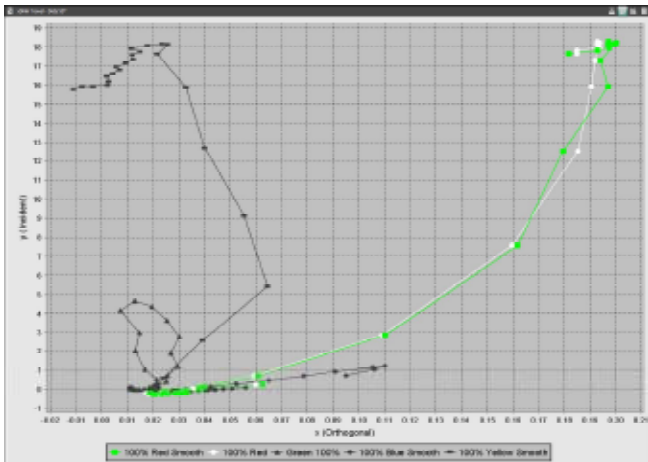


Figure 8 : Colorants organiques BASF à concentration totale, à travers le spectre dans l'espace xDNA.

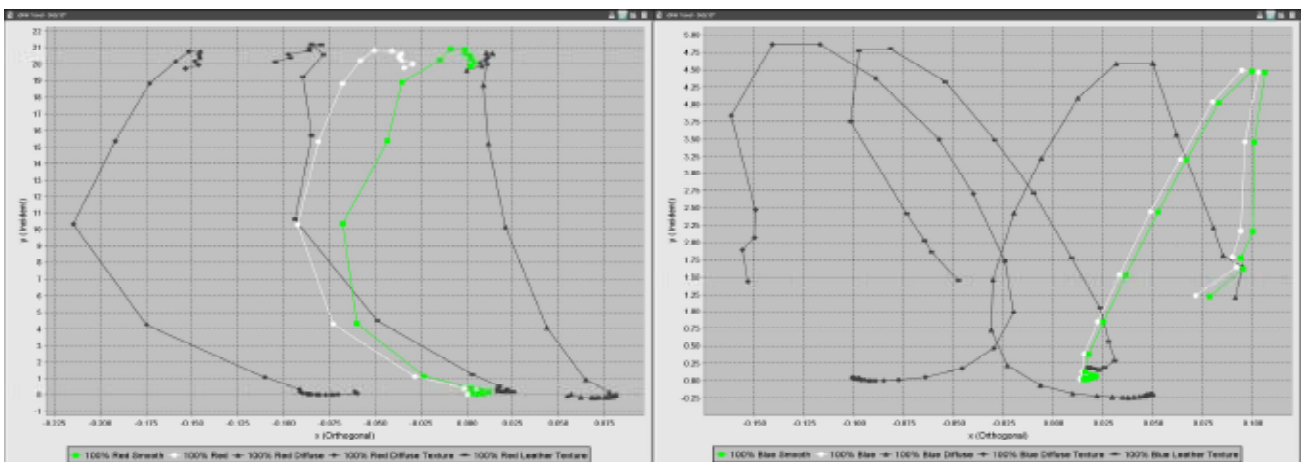


Figure 9 : Vues dans l'espace xDNA, reportées à travers la texture de la surface.

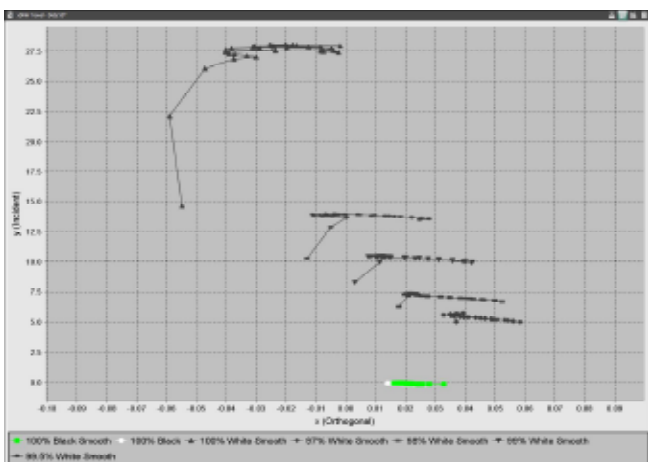


Figure 10 : Formulations de gamme de gris en concentrations identiques, mais avec des pigments noirs et blancs.

