

MÉTROLOGIE DE L'APPARENCE : MESURER CE QUE L'ON VOIT

Gaël OBEIN*

LNE-Cnam (EA 2367), La Plaine St Denis, France

*gael.obein@lecnam.net



Dans la continuité de la colorimétrie initiée au XIX^e siècle, la métrologie optique s'applique aujourd'hui à développer des grandeurs, des techniques de mesures et des étalons pour caractériser les effets visuels contemporains que sont l'iridescence, le scintillant, le mat, le brillant ou la translucidité, en accord avec la sensation visuelle qu'ils génèrent. On appelle cette branche de la spectrophotométrie, la métrologie de l'apparence.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613629>

L'apparence visuelle des objets manufacturés occupe aujourd'hui une place centrale dans l'industrie et la société.

Dans un contexte où la fonctionnalité des produits a atteint un haut niveau de maturité, l'apparence est devenue un facteur déterminant de différenciation, de valeur perçue et de choix pour l'utilisateur. Couleur, brillant, texture, translucidité, scintillement ou iridescence sont des attributs visuels qui permettent à un observateur d'identifier un matériau, d'inférer sa qualité, son mode de fabrication, voire son histoire (fig1).

Pour le métrologue, la difficulté majeure réside dans le fait que l'apparence n'est pas une grandeur physique directement accessible. Elle est une sensation construite par le système visuel à partir du signal optique issu de l'interaction entre la

lumière, l'objet et l'environnement. La métrologie de l'apparence se situe précisément à cette interface entre optique, vision et perception : elle vise à développer des grandeurs, des méthodes et des étalons permettant de mesurer des indicateurs pertinents, en cohérence avec ce qui est effectivement perçu par un observateur humain. Cet article propose une introduction à la métrologie de l'apparence qui est une branche de la spectrophotométrie.

APPARENCE ET MÉTROLOGIE

L'apparence d'un objet est définie par la CIE comme « l'aspect de l'expérience visuelle par laquelle les choses sont reconnues » [1]. Lorsqu'un observateur regarde une scène, les photons issus des sources lumineuses sont réfléchis, transmis ou diffusés par les objets, puis captés par la rétine. Le système visuel traite ensuite

ces signaux pour construire une représentation cohérente de cette scène. La scène vient d'apparaître. Ainsi, l'apparence n'est pas localisée dans l'objet, mais dans l'observateur.

Cette caractéristique pose un défi au métrologue : le mesurande n'est ni directement accessible, ni aisément définissable. La stratégie adoptée en métrologie de l'apparence consiste à travailler sur le stimulus physique, c'est-à-dire le flux radiométrique émis par l'objet dans des conditions données – et à établir des liens entre ce stimulus et la sensation visuelle, par le biais d'études psychophysiques.

En effet, l'expérience montre que, bien que complexe, l'apparence est quantifiable. Lorsqu'on demande à des observateurs de classer des échantillons selon leur couleur, leur niveau de brillant ou leur translucidité, les classements obtenus sont remarquablement

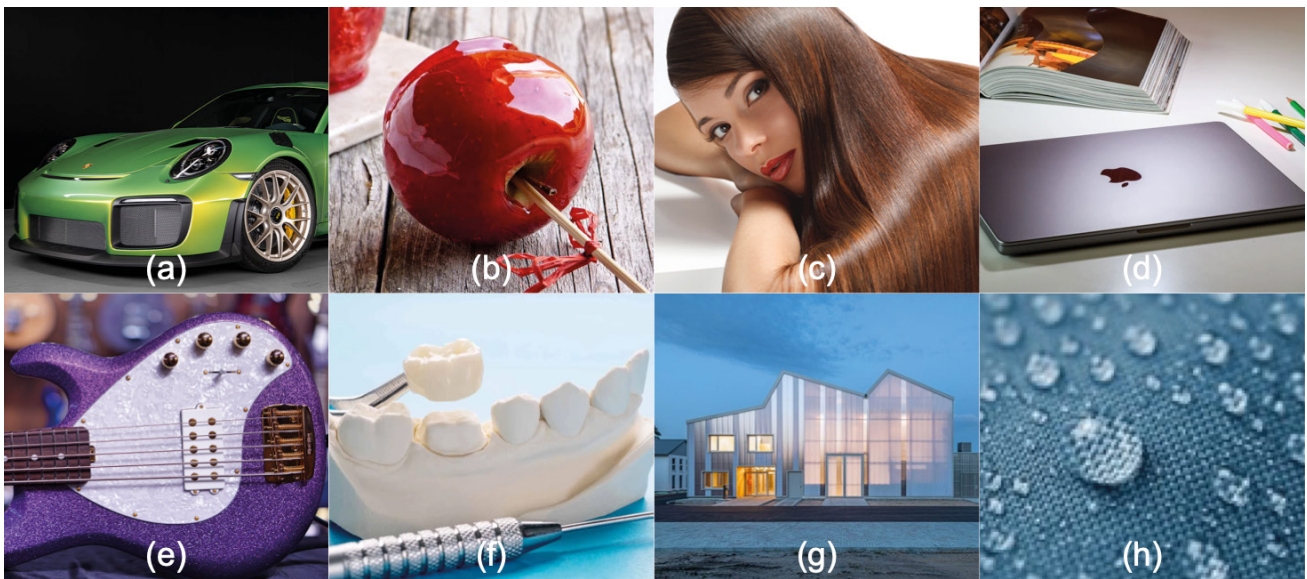


Figure 1. goniochromatisme (a), brillant (b), texture (c), matité (d), scintillant (e), translucidité (f), transparence (g), fonctionnalité (h), sont des attributs visuels qui participent à notre sentiment d'esthétique, de qualité et de singularité. Le contrôle de ces attributs est essentiel pour toutes les industries car ils sont impliqués dans les critères de choix des consommateurs et leur envie d'acheter.

reproductibles. Le rôle du métrologue est ainsi de définir des grandeurs spectrophotométriques et des indicateurs associés qui permettent de retrouver ces classements perceptifs à partir de mesures physiques traçables.

Cette démarche repose sur un triptyque :

- l'acquisition de la sensation visuelle par des protocoles psychophysiques,
- la mesure de grandeurs pertinentes par des méthodes radiométriques et spectrophotométriques,
- la modélisation des relations entre mesures et perception, qui peut dans certains cas aller jusqu'à la normalisation et la création d'observateurs « étalons ».

La spécificité de la métrologie de l'apparence est donc de ne jamais perdre de vue la finalité perceptive de la mesure : ce que l'on mesure doit correspondre, autant que possible, à ce que l'on voit.

GRANDEURS SPECTROPHOTOMÉTRIQUES POUR LA MÉTROLOGIE DE L'APPARENCE

BRDF : Bidirectional Reflectance Distribution Function

La grandeur centrale pour la caractérisation de l'apparence en réflexion est la fonction de distribution

bidirectionnelle du coefficient de luminance, plus connue sous son acronyme anglais BRDF [2]. La BRDF décrit l'évolution de la luminance d'une surface rapportée à l'éclairement de celle-ci, en fonction des directions d'illumination et d'observation, de la longueur d'onde et, le cas échéant, de l'état de polarisation. C'est une grandeur à 6 dimensions qui s'exprime en inverse stéradian (figure 2a).

La BRDF (fig2a) constitue une description complète du comportement optique directionnel d'une surface opaque. Elle est indispensable dès lors que l'on s'éloigne du modèle lambertien, ce qui est le cas de la majorité des surfaces industrielles modernes : surfaces brillantes, satinées, métalliques, goniochromatiques ou scintillantes.

En théorie, la BRDF est définie pour des paramètres géométriques infinitésimaux, à savoir angles solides, diverges et surfaces éclairées nulles. Dans la pratique, il convient d'ouvrir ces paramètres, ce qui appelle une prudence mêlée d'une

expertise en fonction des surfaces explorées [3].

On mesure la BRDF avec des dispositifs dédiés appelés goniospectrophotomètres (fig 3a). Il s'agit d'instruments capables de contrôler les géométries d'illumination et de détection. Aujourd'hui, la plupart de ces instruments combinent les atouts des bras robots et des capteurs imageurs. Les principaux défis métrologiques des goniospectrophotomètres se situent au niveau des résolutions angulaires, de la dynamique de la détection, de la maîtrise de la polarisation, de la gestion des volumes de données, de la vitesse de mesure, de la traçabilité des mesures à différentes échelles ou encore de la compréhension des effets de la cohérence sur les résultats.

BTDF : Bidirectional Transmittance Distribution Function

Lorsque l'on s'intéresse aux matériaux transmissifs ou semi-transparents, la grandeur pertinente est la fonction de distribution bidirectionnelle de la

transmittance, ou BTDF. Elle décrit la luminance transmise dans une direction donnée, rapportée à l'éclairement directionnel (fig2b).

La BTDF est essentielle pour caractériser des diffuseurs, des verres dépolis, des matériaux architecturaux, des composants pour l'éclairage ou les revêtements des panneaux photovoltaïques. Bien que des mesures de BTDF existent depuis longtemps, la définition métrologique rigoureuse de la BTDF et sa traçabilité sont des développements récents [6].

BSSRDF : Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function

La translucidité constitue un attribut visuel majeur de l'apparence, mais longtemps négligé du point de vue métrologique. Elle résulte de phénomènes de diffusion volumique, pour lesquels la lumière pénètre dans le matériau, y subit des interactions multiples, puis ressort dans le demi-espace à une position différente de celle du point d'incidence.

La grandeur adaptée pour décrire ce comportement est la fonction de distribution bidirectionnelle de la diffusion sous la surface, ou BSSRDF. Contrairement à la BRDF, la BSSRDF dépend non seulement des directions d'illumination et d'observation, mais également de la distance spatiale entre les points d'entrée et de sortie de la lumière (fig 2c). Elle s'exprime par le rapport de la luminance d'un élément de surface dans une direction donnée par le flux tombant sur un autre élément de surface et provenant d'une direction particulière. Son unité est en $[m^{-2} \cdot sr^{-1}]$.

La BSSRDF est une grandeur à 8 degrés de liberté, ce qui rend sa mesure particulièrement complexe sur le plan instrumental. Elle n'a commencé à devenir accessible qu'avec les progrès récents en goniospectrophotométrie et en imagerie [7, 8]. Elle ouvre la voie à une véritable métrologie de la translucidité, avec des applications directes sur

des surfaces comme la peau ou les prothèses dentaires. Au-delà, la mesure de la BSSRDF va permettre de valider des modèles de propagation radiative largement utilisés dans la formulation ou la synthèse d'image, mais qui n'ont jamais été confrontés à des mesures.

BSSTDF et extension aux matériaux complexes

Si l'on bascule sur l'autre hémisphère, une extension naturelle de la BSSRDF conduit à la BSSTDF (fig2d), qui décrit la diffusion bidirectionnelle à travers des matériaux minces, épais ou multicouches [9]. Cette grandeur, encore en cours de structuration, est appelée à jouer un rôle croissant dans la caractérisation de matériaux fonctionnels et de structures complexes issues, par exemple, de l'impression 3D. Elle permettra également de quantifier les pertes latérales ou l'absorption. Là encore, de nombreux modèles existent mais n'ont jamais été validés.

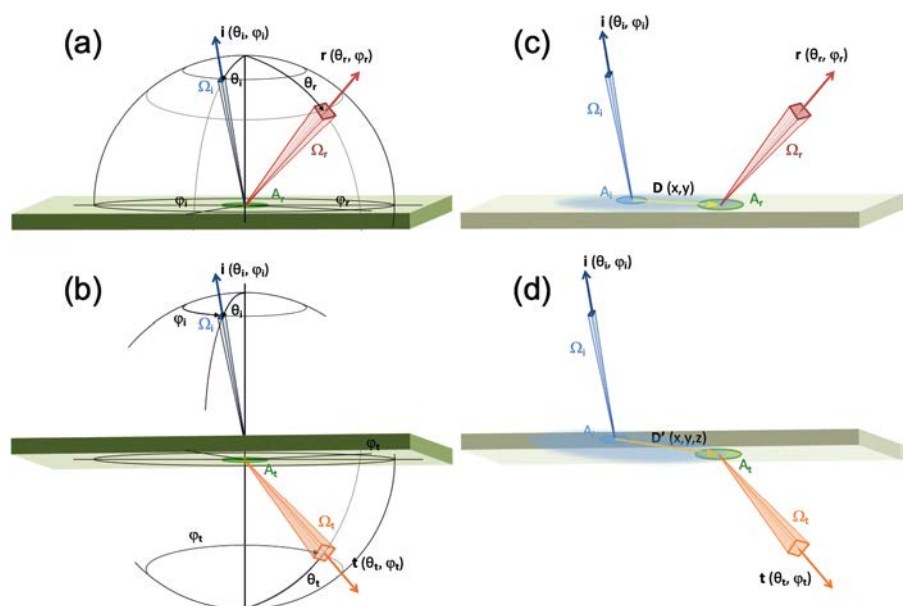
STRUCTURATION DE LA DISCIPLINE

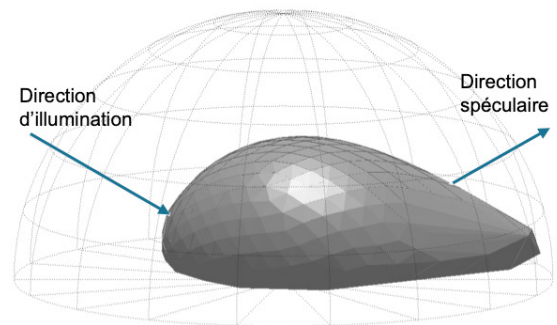
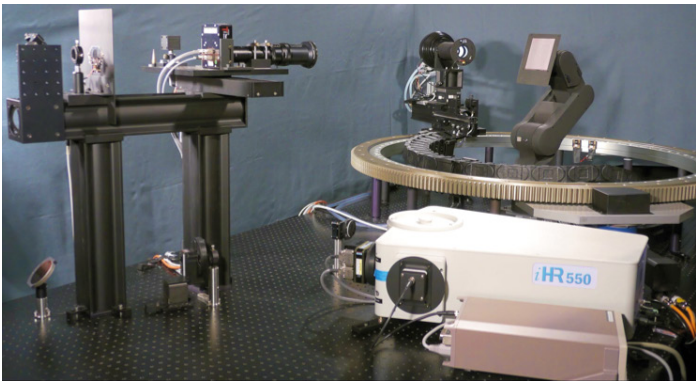
Au cours de la dernière décennie, la métrologie de l'apparence a connu un développement rapide, porté en grande partie par des projets collaboratifs européens [10]. Ces travaux ont permis de faire évoluer la discipline d'un ensemble de pratiques instrumentales hétérogènes vers une approche plus cohérente et traçable.

Un premier axe majeur a consisté à améliorer les dispositifs primaires de mesure de la BRDF. Les progrès réalisés en résolution angulaire, en dynamique de détection et en maîtrise des effets de polarisation et de speckle ont permis de réduire significativement les incertitudes de mesure et d'accéder à des phénomènes jusqu'alors hors de portée instrumentale (Fig 4).

Un second axe a porté sur la définition de protocoles de mesure et de stratégies d'échantillonnage adaptées aux différents types ●●●

Figure 2. Les différentes grandeurs de la métrologie de l'apparence sont la BRDF (a) et la BTDF (b), définies respectivement comme le rapport de la luminance selon r et t par l'éclairement selon i, et la BSSRDF et la BSSTDF, définies respectivement comme le rapport de la luminance selon r et t par le flux incident au point A_i selon la direction i. La BRDF et la BTDF ont 6 dimensions ($\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r, \lambda, \sigma$), la BSSRDF a 8 dimensions ($\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r, \lambda, \sigma, x, y$), la BSSTDF a 9 dimensions ($\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r, \lambda, \sigma, x, y, z$).





d'effets visuels. Il est désormais établi que les paramètres instrumentaux pertinents dépendent fortement de la nature de la surface étudiée. Des recommandations ont ainsi été formulées pour la mesure de surfaces quasi-lambertiennes [12], brillantes [13], goniochromatiques [14] ou scintillantes [15], en lien avec les seuils de perception visuelle.

Parallèlement, des travaux importants ont été menés pour définir de nouvelles grandeurs spectrophotométriques, en particulier la BTDF et la BSSRDF, et pour développer des références primaires et des artefacts de transfert associés [16]. Ces développements constituent une étape essentielle vers la mise en place d'une infrastructure métrologique complète pour l'apparence.

Enfin, un effort particulier a été consacré à la corrélation entre mesures physiques et sensation visuelle. Des études psychophysiques ont permis de mieux comprendre les mécanismes perceptifs associés au brillant [17], au scintillement [18] ou à la translucidité [19]. Malheureusement, il reste difficile aujourd'hui de corréler les mesures spectrophotométriques et les échelles perceptives, afin de

Figure 3. gauche : ARGon³, un goniophotomètre classique qui combine l'utilisation d'un bras robot, d'une source rotative et d'un système imageur en guise de détecteur [4]. Droite : Mesure de la BRDF d'un échantillon de spectralon® pour $\theta_i = 60^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$, $\lambda = 550$ nm et 332 directions d'observation réparties sur l'hémisphère [5]. La surface illuminée était d'environ 1,2 cm², l'angle solide $\Omega_i = 0,96 \times 10^{-3}$ sr, faisceau dépolarisé. La sphère représente une BRDF de 0,56 sr⁻¹.

proposer des indicateurs métrologiques mieux alignés avec l'expérience visuelle des observateurs.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET SCIENTIFIQUES

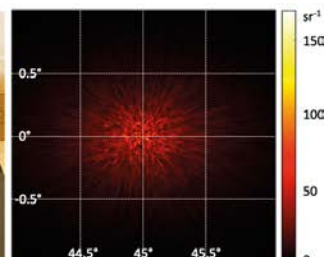
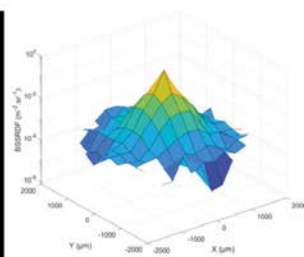
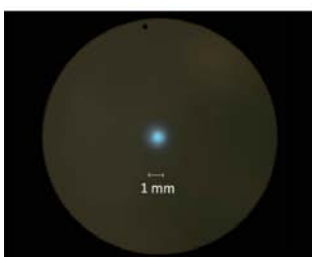
Les retombées de la métrologie de l'apparence sont multiples et concernent un large spectre d'applications.

Sur le plan industriel, ces travaux permettent d'assurer un contrôle objectif et traçable de l'apparence des produits manufacturés, en complément ou en remplacement de l'expertise visuelle. Ils ouvrent la voie à une maîtrise fine des effets visuels, à la formulation de nouveaux matériaux et à la stabilisation des procédés de production.

La métrologie de l'apparence joue également un rôle clé dans la validation des modèles de rendu utilisés pour l'imagerie scientifique, la réalité virtuelle et le prototypage numérique. Des données spectrophotométriques fiables et traçables sont indispensables pour produire des images virtuelles crédibles, tant du point de vue physique que perceptif.

Les secteurs émergents de l'impression 3D et du jumeau numérique bénéficient directement de ces avancées, en permettant la caractérisation et l'archivage de propriétés optiques complexes, notamment pour des objets patrimoniaux ou des œuvres d'art.

Figure 4. gauche : Mesure de BSSRDF réalisée sur un échantillon de spectralon®. Le spot d'illumination mesure 50 μ m. La diffusion s'étale sur plus de 4 mm [8]. Droite, mesure de BRDF dans la direction spéculaire d'un échantillon brillant en spectre photopique $V(\lambda)$ [11]. La résolution angulaire est de 0,017°, ce qui impose d'avoir des faisceaux tellement collimatés que le speckle apparaît, bien que la largeur de bande soit d'environ 150 nm.



Au-delà de l'industrie, la métrologie de l'apparence fournit des outils précieux pour la compréhension du fonctionnement du système visuel humain et des phénomènes de transfert radiatif dans les matériaux. Elle contribue ainsi à un dialogue fécond entre optique, vision et sciences des matériaux.

CONCLUSION

La métrologie de l'apparence constitue aujourd'hui un champ de recherche à la croisée de l'optique, de la spectrophotométrie et des sciences de la vision. En s'attachant à mesurer non

seulement des grandeurs physiques, mais des grandeurs pertinentes du point de vue perceptif, elle répond à des besoins industriels et sociétaux croissants.

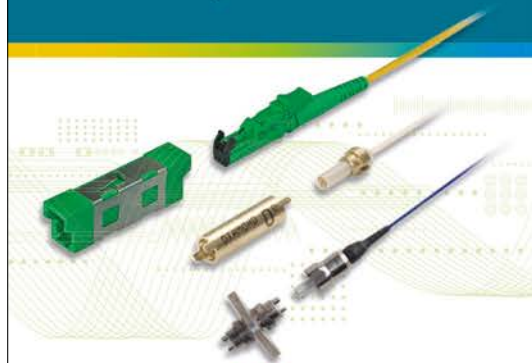
Les progrès récents dans la définition des grandeurs bidirectionnelles, le développement d'instruments primaires et l'intégration des connaissances issues de la psychophysique ont structuré la discipline. Si de nombreux défis subsistent, les bases sont désormais posées pour une métrologie de l'apparence robuste, traçable et utile. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J. S. Christie, *CIE-Journal* **5**(2), 41 (1986)
- [2] F. Nicodemus, J. Richmond, J. Hsia, I. Ginsberg, T. Limperis, NBS Monogr. 160, National Bureau of Standards (1977)
- [3] G. Obein, in *Quand la matière diffuse la lumière*, Presses des Mines, 71 (2019)
- [4] A. Höpe, T. Atamas, D. Hünerhoff, S. Teichert, K.-O. Hauer, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 045102 (2012)
- [5] G. Obein, R. Bousquet, M. Nadal, *Proc. SPIE* 5880, T1-T10 (2005)
- [6] J. Fu *et al.*, *Metrologia* **61**(3) (2024)
- [7] P. Santafé-Gabarda, A. Ferrero, N. Tejedor-Sierra, J. Campos, *Opt. Express* **29**, 34175 (2021)
- [8] L. Gevaux, D. Saha, G. Obein, *Appl. Opt.* **62**(18) (2023)
- [9] M. Gerardin, M. Paulin, R. Pacanowski, *Opt. Express* **32**, 39267 (2024)
- [10] JRP projects xDReflect, BiRD, BxDiff, xDDiff (2013–2027), EMRP/EMPIR/EPM programmes (2009–2030)
- [11] P. Chavel, T. Labardens, L. Simonot, M. Hébert, Y. Sortais, G. Obein, *Frontiers in Optics + Laser Science*, paper JTh5A.76 (2021)
- [12] N. Basic *et al.*, *Appl. Opt.* **62**(13), 3320 (2023)
- [13] A. Rabal, G. Ged, G. Obein, *Proc. 29th Quadrennial Session of CIE*, CIE x046:2019, OP88 (2019)
- [14] C. Strothkämper, K.-O. Hauer, A. Höpe, *J. Opt. Soc. Am. A* **33**(1) (2016)
- [15] A. Ferrero *et al.*, *Metrologia* **57**, 065029 (2020)
- [16] P. Santafé-Gabarda *et al.*, *J. Opt.* **26**(3), 035601 (2024)
- [17] G. Ged, A. M. Rabal, M. Himbert, G. Obein, *Color Res. Appl.* **45**(6), 591(2020)
- [18] O. Gómez, E. Perales, E. Chorro, V. Viqueira, F. Martínez-Verdú, *Appl. Opt.* **55**, 6458 (2016)
- [19] D. Gigilashvili, J. B. Thomas, J. Hardeberg, M. Pedersen, *J. Vis.* **21**(8), 4 (2021)

2BLighting Technologies

High performance and reliable fiber optic assemblies



PM+

Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)

- Up to +4dB higher PER
- State-of-the-art insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
- Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
- Available on homologated fibres and cables



16W

NEW

E-2000® PS+

Contact expanded beam

- Low loss
- Interlock solution optional
- 1310-1550nm or 980-1060nm



100W

E-2000® PSm

Contact pump laser connector

- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



www.2blighting.fr

info@2blighting.com

+33 1 64 59 21 30