

Mesures de couleurs et de rétro réflexion des matériaux pour revêtements routiers en milieu urbain

Felice GIULIANI
Silvia RASTELLI *

Université de Parme (Italie)

■ RÉSUMÉ

Les caractéristiques photométriques des revêtements de surface routiers sont de prime importance pour leur réponse de jour (éclairage naturel) et de nuit (en présence d'éclairage public ou automobile) pour la perception diurne du tracé ainsi que pour la valorisation du contexte urbain dans lequel s'insère l'ouvrage. Les paramètres habituellement pris en compte pour évaluer la réponse photométrique des surfaces de chaussée en présence d'éclairage public sont le coefficient de luminance moyenne et le facteur de spécularité, caractérisant respectivement la clarté et le degré de spécularité du revêtement. Pour améliorer la sécurité et optimiser des projets d'infrastructures routières, le comportement des matériaux vis-à-vis de la lumière a été étudié pour différentes conditions de mise en œuvre. En particulier, le coefficient de luminance pour un éclairage diffus et le coefficient de luminance rétrofléchie pour un éclairage par des phares de véhicule ont été évalués, par analogie avec la démarche suivie lors d'études menées sur la signalisation horizontale. L'objectif est l'évaluation quantitative et qualitative des variations des caractéristiques photométriques et colorimétriques des matériaux soumis à un processus d'usure et de gommage artificiels. Ce processus permet de reproduire les conditions de service des routes après plusieurs mois voire plusieurs années de trafic véhiculaire.

Color and retroreflection measurements of urban road surfacing materials

■ ABSTRACT

The photometric characteristics of road surfacing materials are of critical importance for their response both in daylight (natural lighting) and at night (in the presence of public streetlights or automobile headlamps), for the daytime perception of road alignments, and for enhancing their urban setting. The parameters typically included when evaluating the photometric response of pavement surfaces in the presence of street lighting are: the average luminance coefficient and the specularly factor, which respectively characterize the brightness and degree of specularity inherent in the surfacing material. In order to improve safety and optimize road infrastructure projects, material behavior with respect to light has been studied for various application conditions. In particular, both the luminance coefficient for diffuse lighting and the coefficient of retroreflected luminance for vehicle headlamp lighting were measured, by analogy with the approach employed in studies conducted on road markings. The objective herein is to provide a quantitative and qualitative assessment of variations in the photometric and colorimetric characteristics of materials submitted to a process of wear and artificial rubber coating. This process makes it possible to reproduce road service conditions after several months, or even years, of withstanding vehicle traffic.

* AUTEUR À CONTACTER :

Silvia RASTELLI
silvia.rastelli@nemo.unipr.it

INTRODUCTION

L'étude des performances des chaussées routières est étroitement liée à l'analyse de toutes les propriétés qui conditionnent la sécurité de la circulation, surtout en terme d'adhérence et d'uniformité. Toutefois, il ne faut pas oublier l'importance de la perception visuelle des surfaces de chaussées, conjointement à une signalisation horizontale adéquate, pour garantir au conducteur une perception correcte du contexte routier. Couleur et luminance du revêtement peuvent avoir une influence notable sur la sécurité de la conduite diurne, nocturne ou en tunnel, même en présence d'un éclairage artificiel adéquat.

Plus que les autres environnements routiers, l'espace urbain est caractérisé par une hétérogénéité de revêtements qui permettent de distinguer les différentes zones urbaines (centre historique, zone résidentielle, zone d'activités) et qui sont souvent soumis à différents systèmes d'éclairage publics. La norme italienne actuelle de référence [1, 2] sépare les surfaces routières en deux classes photométriques (fondées sur le coefficient de luminance moyenne et le facteur de spécularité) C1 et C2 (respectivement revêtement obscur et revêtement clair), sans tenir compte, par exemple, des particularités des revêtements rocheux, essentiellement polychromes et polycristallins, ni de celles des éléments de bétons autobloquants de différentes couleurs.

Il apparaît donc nécessaire d'approfondir l'étude des propriétés de réflexion de ces revêtements en considérant plusieurs grandeurs photométriques et colorimétriques représentatives de différentes conditions d'illumination (jour, nuit, présence d'éclairage public).

Par la suite, les plages de variation des grandeurs photométriques de différents revêtements soumis à une action progressive d'usure et de gommage artificiels sont analysées. Ceci permet de quantifier la stabilité des propriétés de réflexion et des couleurs de chacun des matériaux sous l'action simulée du trafic.

■ Éléments essentiels de photométrie

L'analyse des effets visuels produits par une surface nécessite de considérer la propagation d'énergie d'une onde lumineuse en considérant la réponse spectrale du système visuel humain.

Les grandeurs relatives décrites doivent prendre en compte la réponse spectrale du système visuel. De telles grandeurs sont définies en faisant référence à la courbe de réponse spectrale de l'œil humain. Celle-ci est identifiée pour la vision diurne à l'aide de la courbe photopique et pour la vision nocturne à l'aide de la courbe scotopique [3]. Les grandeurs photométriques ont pour but d'évaluer de façon objective la sensation de luminosité, de façon à fournir des paramètres permettant une définition correcte de la problématique de la vision [4].

Afin d'étudier les propriétés de réflexion des matériaux, il est utile d'introduire les notions d'éclairement et de luminance.

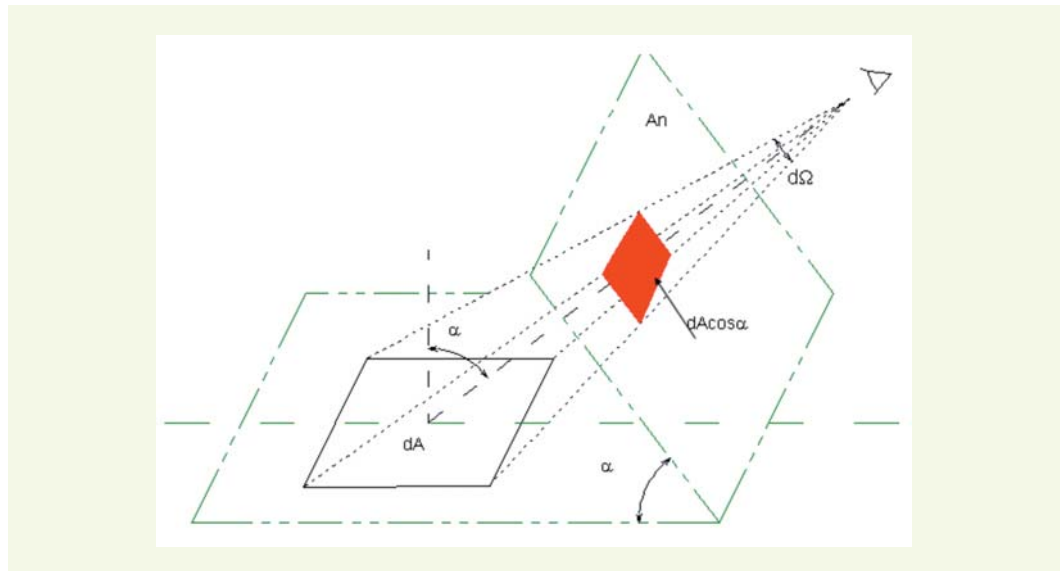
L'éclairement E (lx) en un point d'une surface A est défini comme le quotient du flux lumineux ϕ_s reçu par un élément de surface contenant le point par l'aire de cet élément. Il représente ainsi la quantité de lumière incidente par unité de surface.

$$E = \frac{d\phi_s}{dA}$$

La luminance L (cd m⁻²) dans une direction en un point d'une surface est le quotient du flux lumineux ϕ_s , atteignant un élément de surface en ce point, en se propageant dans des directions définies par un cône élémentaire contenant la direction donnée, par le produit de l'angle solide du cône et de l'aire de projection orthogonale de l'élément de surface sur un plan perpendiculaire à la direction donnée (figure 1).

L'expression de la luminance est : $L = \frac{d\phi_s}{d\Omega dA \cos \alpha}$.

figure 1
Le concept de luminance.



La luminance représente la sensation visuelle de luminosité reçue d'une source lumineuse primaire (corps émettant directement des rayons lumineux) ou secondaire (corps réfléchissant ou transmettant des rayons provenant d'une source primaire).

Les paramètres de la chaussée considérés lors du dimensionnement d'une installation d'éclairage sont le facteur de spécularité S_1 (caractérisant le degré de spécularité des surfaces) et le coefficient de luminance moyenne Q_0 (représentant la moyenne des coefficients de luminance de chaque élément de revêtement pondérée par les angles solides respectifs). Q_0 exprime la clarté du revêtement [2, 5].

Les indicateurs utilisés pour caractériser la réflexion des produits de marquage sont le facteur de luminance en conditions d'éclairage diffus Q_d (conditions d'éclairage diurne ou en présence d'éclairage artificiel) et le coefficient de luminance rétro-réfléchi en conditions d'éclairage avec des projecteurs de véhicules R_L (conditions nocturnes et éclairage uniquement par des projecteurs de véhicule).

Ces deux coefficients représentent le rapport entre la luminance et l'éclairage exprimé en $\text{mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ soit :

$$Q_d = \frac{L}{E}$$

$$R_L = \frac{L}{E_\alpha}$$

avec :

L : luminance de la surface éclairée (cd.m^{-2})

E : éclairement horizontal reçu par la surface (lx)

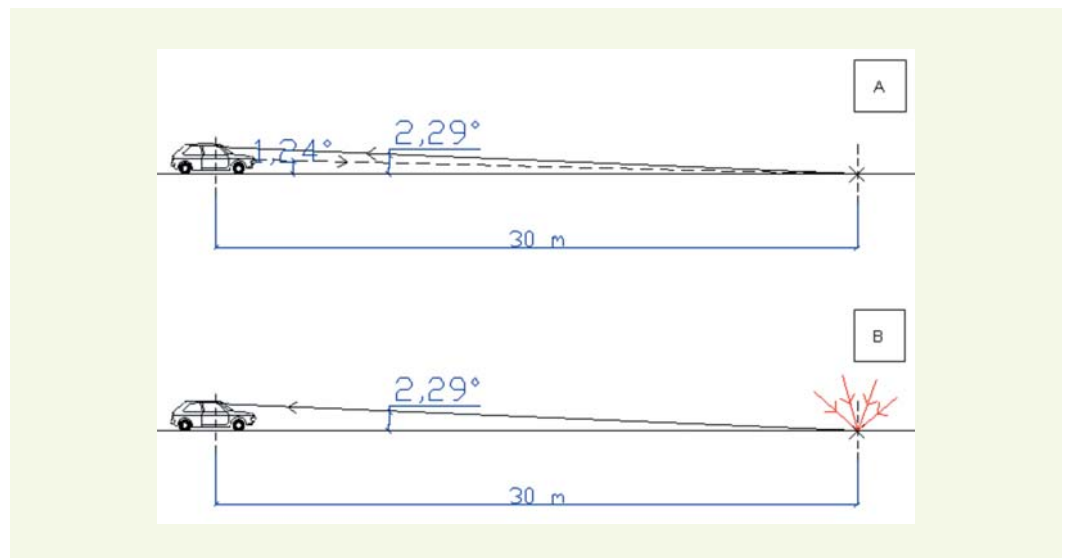
E_α : éclairement créé par la source lumineuse (avec angle d'éclairage $\alpha = 1,24^\circ$) sur la surface.

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Les aspects construction et étude d'éclairage sont souvent traités séparément alors qu'il est opportun de savoir si les matériaux utilisés peuvent favoriser la perception de l'espace routier et du contexte de circulation.

L'approche expérimentale utilisée pour l'évaluation des performances de la signalisation horizontale (mesure des coefficients Q_d et R_L) a été étendue aux surfaces de chaussées urbaines, dans la mesure où les matériaux utilisables en milieu urbain, de la pierre aux bétons bitumineux, peuvent être caractérisés en terme de couleur et de visibilité, en plus des traditionnelles exigences de durabilité et d'adhérence. L'acquisition des données sur les mesures de Q_d , de R_L et de couleur dans le contexte des matériaux routiers est assujettie à une grande disparité due à la variabilité même des éléments naturels ou artificiels constituant le revêtement. Dans tous les cas, de telles mesures constituent des éléments de comparaison pour aider à choisir les matériaux les plus adaptés pour un revêtement. Le trafic piéton et véhiculaire et les agressions dues à l'environnement tendent à modifier progressivement la couleur et les caractéristiques de réflexion. Il est donc intéressant d'évaluer en laboratoire les variations possibles de ces caractéristiques en reproduisant les conditions d'usure et de gommage des revêtements. Dans le cas des mesures de R_L et Q_d , il est essentiel de reproduire une géométrie de mesure cohérente avec la position du conducteur et les conditions d'éclairage. Les conditions de mesure standard retenues sont destinées à simuler une distance d'observation de 30 m pour un conducteur de véhicule léger [6]. La mesure est réalisée selon un angle d'observation de $2,29^\circ$. Dans le cas de R_L , l'éclairage est produit par les phares du véhicule pour un angle d'éclairage $\alpha = 1,24^\circ$ (figure 2A) alors que dans le cas de Q_d l'éclairage est diffus (figure 2B).

figure 2
Géométrie de la mesure
des coefficients R_L (A)
et Q_d (B).



TPOLOGIE DES REVÊTEMENTS ROUTIERS ÉTUDIÉS

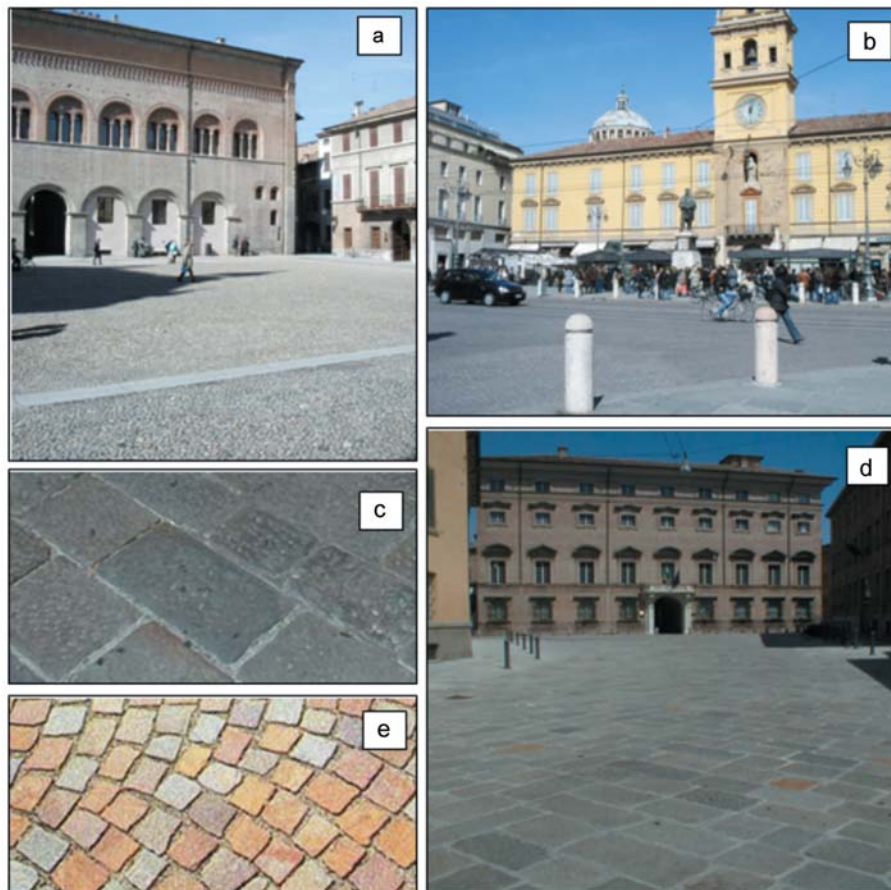
Pour cette étude expérimentale, réalisée en laboratoire, le choix des matériaux employés s'est porté sur les revêtements rocheux les plus répandus en Italie et dans la majeure partie des pays européens pour un environnement urbain. Sont également étudiés des éléments de béton de différentes couleurs ainsi que deux types de béton bitumineux caractérisés par des granulats clairs et foncés. Ceux-ci ont été formulés spécialement pour l'étude en utilisant des granulats respectivement calcaires et basaltiques ayant un fort contraste chromatique.

Les typologies de revêtements rocheux se ramènent souvent aux structures historiques locales impliquant une méthodologie de pose et des matériaux locaux.

Pour un important trafic piéton/véhicules, les solutions les plus fréquentes sont au nombre de trois. Selon la forme et les dimensions des éléments, on trouve le pavé, le cailloutage et le dallage (figure 3) [7].

Les dalles sont réalisées en roche dure et résistante à l'usure (granit, porphyre, syénite, grès). Elles sont de forme rectangulaire et de dimensions variables, mais suffisamment courtes pour pouvoir s'adapter aux éventuelles courbes de la route. Le cailloutage est constitué d'éléments oblongs de

figure 3
Cailloutage (a), pavés (b,
e) et dallages (c, d) dans la
ville de Parme.



plus grande dimension (8 à 12 cm) et arrondis, de roche dure et résistante (granit, porphyre, syénite) d'origine fluviale. Ils sont utilisables sans traitement, tels qu'on les trouve dans la nature.

Les pavés se différencient du cailloutage par l'emploi d'éléments de roche de taille réduite et travaillés pour obtenir des formes régulières à peu près carrées. Ils sont communément composés de porphyre, de granit, de diorite et de basalte qui sont des éléments rocheux particulièrement micro-rugueux et résistants à l'usure.

Les dalles ou les pavés sont produits sans utiliser d'outils à lame ; les surfaces sont alors brutes et rugueuses et la géométrie est régulière. De ce fait, ces éléments sont adaptés aux mesures des propriétés photométriques en laboratoire.

Les matériaux utilisés pour le cailloutage, de dimensions et de convexités hétérogènes, n'ont pas été pris en compte dans cette étude tandis que ceux retenus pour l'étude expérimentale sur les revêtements rocheux sont indiqués dans le [tableau 1](#).

Les revêtements réalisés avec des pavés de béton autobloquants sont caractéristiques des places, des trottoirs, zones de parking et zones résidentielles, et correspondent, en général, à un trafic de moyenne intensité. Ces éléments de béton peuvent avoir des formes et des couleurs différentes ([figure 4](#)) et ces caractéristiques sont utilisées pour définir les espaces routiers (par exemple : distinction des pistes cyclables et des zones de stationnement).

Les bétons bitumineux sont classiquement utilisés pour des revêtements d'infrastructures routières en environnement urbain et extra-urbain. Ils sont, avec les bétons, pratiquement l'unique forme de revêtement prise en compte dans la norme [1]. Dans cette étude, on considère deux types de bétons bitumineux, réalisés avec le même bitume mais avec des agrégats différents, calcaires (granulats clairs, [figure 5a](#)) ou basaltiques (granulats foncés, [figure 5b](#)).


| Nom | Granit Tonalite | Granit Beola Argenté | Pierre de Lessines (Prune) | Marbre blanc de Carrare | Porphyre du Trentin | Porphyre argentin | Pierre de Luserne | Grès |
|--------------------------------------|---|---|---|---|--|---|---|---|
| Photographie |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Origine | Italie Trentin-Haut-Adige | Italie Piémont | Italie Vénétie | Italie Toscane | Italie Trentin-Haut-Adige | Argentine | Italie Piémont | Italie Toscane |
| Famille | granit de l'Adamello | granit | scaglia rossa | marbre | porphyre | porphyre | gneiss | grès |
| Couleur de la matrice | gris clair | gris clair | rose | blanc | gris | gris | gris vert | gris |
| Couleur des inclusions ou des veines | blanc et noir | gris foncé | blanc | gris | blanc et marron | rose et marron | gris foncé et blanc | gris |
| Grain | moyen | moyen | moyen | très fin | fin | fin | fin | fin |

tableau 1

Matériaux rocheux analysés lors de l'étude expérimentale.



figure 4

Emploi d'éléments de béton autobloquants : pistes cyclables (a), zones résidentielles (b), zones de stationnement (c).

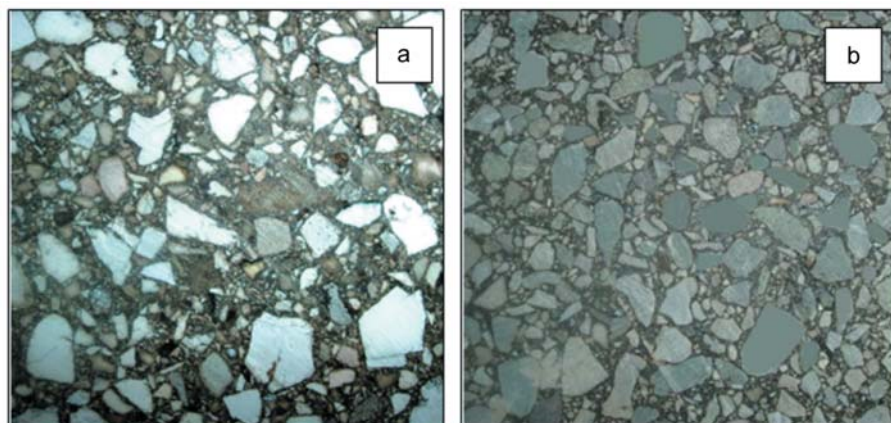


figure 5

Béton bitumineux avec des granulats calcaires (a) et basaltiques (b).

INTERACTION LUMIÈRE-SURFACE

■ Préparation des matériaux

L'étude expérimentale a été menée en laboratoire afin de déterminer le comportement des matériaux en terme d'interaction avec la lumière, à l'état sec et humide, pour différents niveaux d'usure. L'objectif étant l'étude quantitative et qualitative des variations des caractéristiques photométriques au cours du temps, les matériaux ont été soumis à un processus d'usure et de gommage artificiels permettant de simuler les conditions de service après des mois ou des années de trafic routier.

L'usure de la surface des matériaux a été obtenue à l'aide de disques abrasifs (meule pour matériaux rocheux) utilisés pendant une durée de 20 secondes pour trois profondeurs de passe différentes correspondant à quatre états d'usure différents (figure 6). L'état initial (état I) correspond aux matériaux intacts (éléments rocheux ayant une surface brute et rugueuse, éléments de bétons autobloquants et échantillon de béton bitumineux réalisés en laboratoire). L'état final (état IV) correspond au contraire à l'usure limite. Pour chacun des états, les surfaces des matériaux ainsi préparés font l'objet d'une mesure de l'adhérence exprimée en BPN (*british pendulum number*) à l'aide d'un pendule anglais [8].

Le gommage a été réalisé artificiellement au moyen d'un pneumatique entraîné par un moteur et sur lequel sont placés pendant 15 secondes les dalles de pierre et les éléments de béton autobloquants. Quatre états de gommage progressifs ont été réalisés. L'état initial (état I) correspond aux matériaux intacts tandis que l'état final (état IV) correspond au gommage limite. Dans ce cas également, les échantillons ont fait l'objet d'une mesure de l'adhérence (tableau 2).

■ Mesure du facteur de luminance et du coefficient de luminosité rétroréfléchie

Des mesures du coefficient de luminance en condition d'éclairage diffus (Q_d) et du coefficient de luminance rétroréfléchie (R_L) pour un éclairage par des phares de véhicule ont été effectuées sur les échantillons soumis à l'usure et au gommage artificiels en utilisant un rétroréfectomètre portable conformément à la norme EN 1436 [6]. Les résultats, obtenus par une moyenne de trois mesures indépendantes, sont reportés dans les tableaux 3 à 6 pour des surfaces sèches et mouillées.

figure 6
Conditions d'usure simulée
en laboratoire.

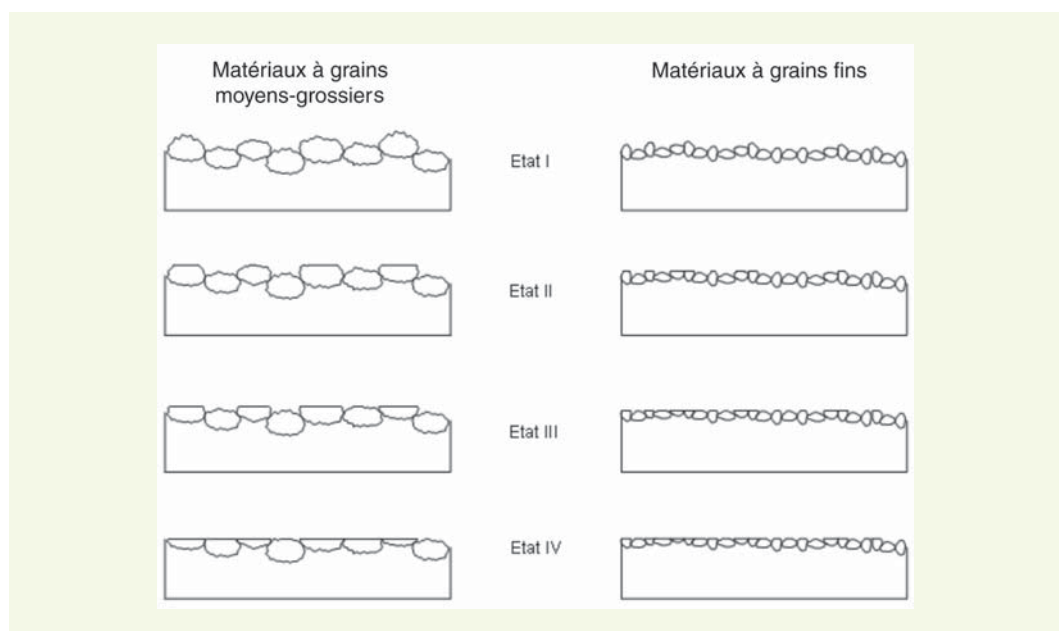


tableau 2
Mesure de l'adhérence
exprimée en BPN.

| ADHÉRENCE ESSAI AU PENDULE | Usure accélérée | | | Gommage accéléré | | |
|----------------------------------|-----------------|----------------|------|------------------|----------------|------|
| | BPN état I | BPN état IV | ΔBPN | BPN état I | BPN état IV | ΔBPN |
| Porphyre argentin | 70 | 68 | -2 | 70 | 68 | -2 |
| Porphyre du Trentin | 65 | 63 | -2 | 65 | 70 | 5 |
| Granit Tonalite | 75 | 76 | 1 | 75 | 72 | -3 |
| Granit Beola | 83 | 62 | -21 | 83 | 83 | 0 |
| Marbre de Carrare | 66 | 56 | -10 | 66 | 53 | -13 |
| Pierre de Lessines | 77 | - | - | 77 | 80 | 3 |
| Luserne | 52 | 53 | 1 | 52 | 63 | 11 |
| Grès | 47 | 64 | 17 | 47 | 41 | -6 |
| Éléments autobloquants gris | 50 | 55 | 5 | 50 | 47 | -3 |
| Éléments autobloquants rouges | 63 | 58 | -5 | 63 | 50 | -3 |

tableau 3
Mesure des propriétés
de réflexion (Q_d , R_L)
sur les surfaces de
matériaux rocheux
artificiellement usés.

| USURE ACCÉLÉRÉE | Surface sèche | | | | Surface mouillée | | | |
|---------------------|--|----|--|-----|--|----|--|-----|
| | R_L [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | Q_d [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | R_L [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | Q_d [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | |
| ÉTAT | I | IV | I | IV | I | IV | I | IV |
| Porphyre argentin | 26 | 42 | 87 | 90 | 13 | 9 | 85 | 45 |
| Porphyre du Trentin | 28 | 35 | 74 | 92 | 20 | 13 | 64 | 44 |
| Granit Tonalite | 14 | 17 | 18 | 80 | 11 | 6 | 17 | 73 |
| Granit Beola | 46 | 51 | 139 | 136 | 21 | 35 | 71 | 39 |
| Marbre de Carrare | 37 | 41 | 211 | 207 | 50 | 84 | 95 | 59 |
| Pierre de Lessines | 19 | 36 | 18 | 127 | 26 | 19 | 71 | 102 |
| Luserne | 29 | 15 | 109 | 120 | 5 | 9 | 111 | 77 |
| Grès | 30 | 19 | 182 | 200 | 18 | 7 | 122 | 104 |

tableau 4
Mesure des propriétés
de réflexion (Q_d , R_L) sur
les surfaces d'éléments
de béton autobloquants
et de béton bitumineux
artificiellement usés.

| USURE ACCÉLÉRÉE | Surface sèche | | | | Surface mouillée | | | |
|---------------------------------------|--|----|--|----|--|----|--|----|
| | R_L [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | Q_d [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | R_L [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | Q_d [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | |
| ÉTAT | I | IV | I | IV | I | IV | I | IV |
| Béton bitumineux (agrégats foncés) | 10 | 25 | 24 | 81 | 2 | 3 | 13 | 41 |
| Béton bitumineux (agrégats clairs) | 11 | 12 | 26 | 71 | 5 | 7 | 25 | 99 |
| Éléments autobloquants gris | 8 | 4 | 77 | 86 | 9 | 6 | 67 | 99 |
| Éléments autobloquants rouges | 6 | 5 | 66 | 71 | 4 | 7 | 102 | 89 |

Pour les surfaces mouillées, une quantité d'eau prédéterminée est versée sur la surface d'essai inclinée d'une pente de 2,5 % par rapport à l'horizontal (pente caractéristique du profil routier considéré). La mesure est effectuée après un laps de temps de 30 secondes.

tableau 5

Mesure des propriétés de réflexion (Q_d , R_L) sur les surfaces de matériaux rocheux artificiellement gommés.

| GOMMAGE ACCÉLÉRÉ | Surface sèche | | | | Surface mouillée | | | |
|---------------------|--|----|--|-----|--|----|--|-----|
| | R_L [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | Q_d [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | R_L [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | Q_d [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | |
| ÉTAT | I | IV | I | IV | I | IV | I | IV |
| Porphyre argentin | 93 | 12 | 56 | 47 | 5 | 3 | 91 | 90 |
| Porphyre du Trentin | 24 | 8 | 74 | 50 | 5 | 3 | 122 | 90 |
| Granit Tonalite | 32 | 22 | 124 | 109 | 10 | 5 | 130 | 104 |
| Granit Beola | 27 | 15 | 114 | 79 | 4 | 1 | 122 | 111 |
| Marbre de Carrare | 32 | 8 | 226 | 117 | 42 | 18 | 124 | 66 |
| Pierre de Lessines | 107 | 15 | 89 | 40 | 27 | 5 | 109 | 30 |
| Luserne | 27 | 13 | 110 | 92 | 3 | 2 | 90 | 107 |
| Grès | 22 | 14 | 175 | 136 | 7 | 9 | 183 | 140 |

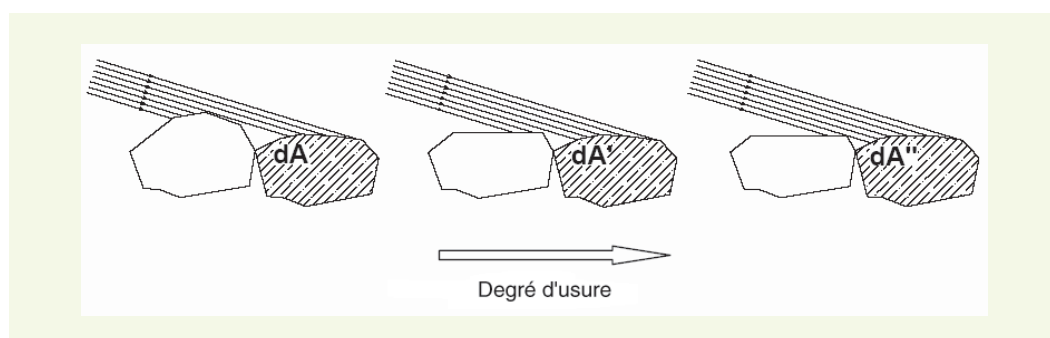
tableau 6

Mesure des propriétés de réflexion (Q_d , R_L) sur les surfaces d'éléments de béton autobloquants artificiellement gommés.

| GOMMAGE ACCÉLÉRÉ | Surface sèche | | | | Surface mouillée | | | |
|-------------------------------|--|----|--|----|--|----|--|----|
| | R_L [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | Q_d [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | R_L [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | | Q_d [mcd·m ⁻² ·lx ⁻¹] | |
| ÉTAT | I | IV | I | IV | I | IV | I | IV |
| Éléments autobloquants gris | 8 | 2 | 19 | 36 | 2 | 2 | 29 | 47 |
| Éléments autobloquants rouges | 16 | 2 | 56 | 48 | 3 | 1 | 29 | 44 |

figure 7

Microcristaux superficiels réfléchissant la lumière à différents degrés d'usure.



Pour les surfaces mouillées, une quantité d'eau prédéterminée est versée sur la surface d'essai inclinée d'une pente de 2,5 % par rapport à l'horizontal (pente caractéristique du profil routier considéré). La mesure est effectuée après un laps de temps de 30 secondes.

L'analyse globale des résultats obtenus sur des matériaux tellement hétérogènes et intrinsèquement différents de par leur nature minéralogique et leur structure cristalline est inéluctablement soumise à interprétations et hypothèses. Elle ne permet pas une détermination exacte de la réponse à la lumière de chacun des matériaux. Quoiqu'il en soit, à part pour quelques cas (Luserne, grès et granit tonalite), on observe une augmentation du coefficient R_L avec le degré d'usure pour les surfaces sèches.

Ceci est peut-être une conséquence du processus d'usure des macro-aspérités superficielles présentes sur les surfaces analysées qui reçoivent alors plus de rayons lumineux (pour une géométrie de mesure caractérisée par un angle d'incidence particulièrement rasant, c'est-à-dire 1,24°). La micro-texture peut expliquer la capacité de rétrodiffusion de la lumière (figure 7). Sauf pour le marbre et le granit beola, pour lesquels il reste à peu près constant, le coefficient de luminance pour une lumière diffuse (Q_d) croît en même temps que le degré d'usure dans le cas des matériaux secs.

Ce comportement est explicable par la diminution du phénomène masquage/ombrage [9] causée par les interférences dues aux macro-aspérités lors de la réflexion des rayons lumineux et par la prépondérance de la micro-texture du revêtement entraînant une augmentation du comportement diffus.

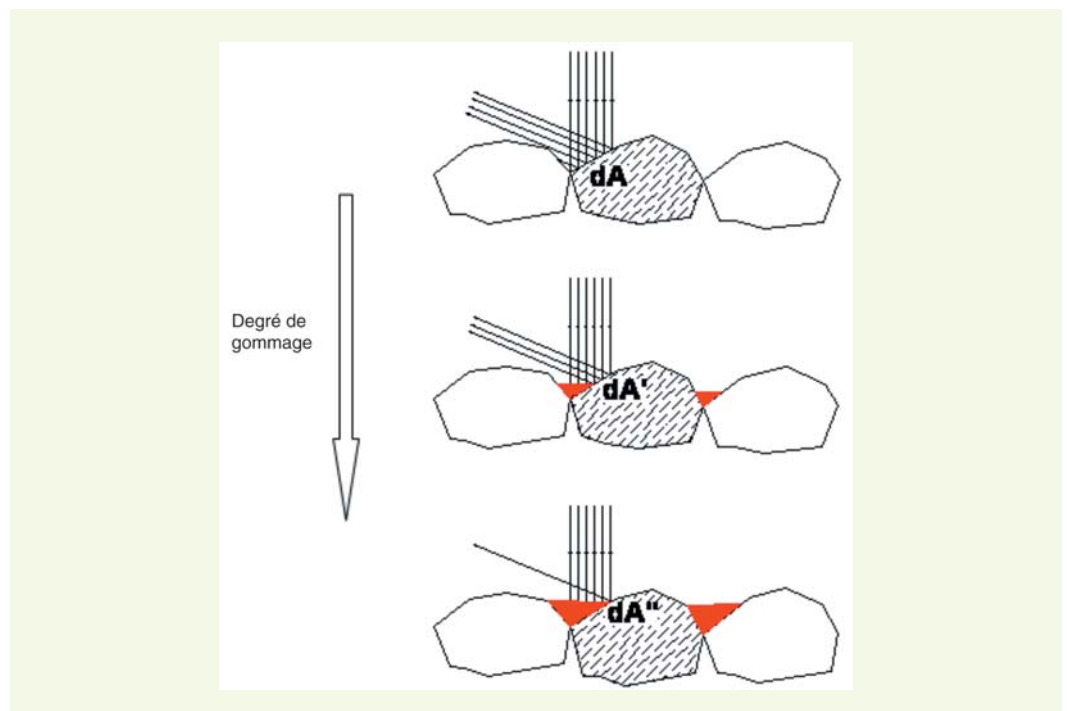
Pour les bétons bitumineux à l'état sec, on observe également une augmentation de R_L et de Q_d avec le degré d'usure qui est probablement due, comme pour les matériaux rocheux, à la diminution des aspérités superficielles et à l'affleurement des éléments rocheux lors de la dispersion progressive du liant bitumeux. Les éléments de béton autobloquants présentent, au contraire, des valeurs de R_L plus faibles que pour les matériaux rocheux et avec une variabilité plus faible, respectivement imputables à l'opacité de la pâte de ciment et à l'uniformité du matériau.

D'un point de vue théorique, on pourrait s'attendre à ce que les surfaces mouillées aient une capacité de réflexion diffuse moindre avec une augmentation de la réflexion spéculaire, impliquant une diminution des valeurs du coefficient Q_d . En pratique, les bétons bitumineux et les éléments de béton autobloquants ont un comportement différent des matériaux rocheux lorsqu'ils sont mouillés : les valeurs de R_L sont globalement constantes et Q_d tend à augmenter avec le degré d'usure, hormis pour les éléments de couleur rouge.

En ce qui concerne la variation des paramètres analysés à la suite des phases de gommage, on remarque que le coefficient R_L diminue significativement au fur et à mesure du gommage, que ce soit pour une surface sèche ou humide. Les valeurs de R_L au dernier stade de gommage en conditions sèches sont particulièrement basses quel que soit le matériau : de l'ordre de 10 à 15 $\text{mcd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ pour les matériaux rocheux et 2 $\text{mcd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ pour les éléments autobloquants, indiquant effectivement que la visibilité et la perception changent notablement avec le dépôt de gomme des pneumatiques sur la surface routière.

Un tel dépôt, hétérogène par sa quantité et sa localisation sur le revêtement, conduit à une réduction de la surface capable de restituer à l'œil du conducteur une partie de la lumière émise par les sources lumineuses (figure 8). En effet, les facteurs de réflexion de la gomme sont plus faibles que ceux des autres constituants du revêtement. Le coefficient Q_d présente le même comportement avec des variations plus limitées et des valeurs finales de l'ordre de 80 à 100 $\text{mcd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ pour les matériaux rocheux.

figure 8
Microcristaux superficiels
réfléchissant la lumière
pour différents degrés
de gommage.



■ Mesure des couleurs

Une évaluation objective de la couleur est effectuée en utilisant le système colorimétrique de la CIE (commission internationale de l'éclairage) qui permet de quantifier une radiation lumineuse en terme de couleurs, en se fondant sur les coordonnées trichromatiques X, Y et Z et les valeurs L^* , a^* et b^* dans l'espace chromatique CIELab [10]. L'instrument utilisé pour la mesure des caractéristiques colorimétriques des échantillons de matériaux est un colorimètre à géométrie diffus/0°. Le colorimètre permet de décomposer le faisceau de radiations polychromatique en ses différentes composantes, opération impossible pour le système visuel humain. La géométrie de l'instrument permet un éclairage standard diffus et la détermination des coordonnées trichromatiques pour deux champs de vision angulaires standards définis par la CIE (2° et 10°, **figure 9**). L'éclairage D65 émet une distribution spectrale d'énergie de lumière typique de l'Europe du Nord, correspondant à la température de couleur de 6500K [11]. La géométrie effective de mesure de l'instrument est telle que l'angle d'observation est fixé à 8°, représentatif d'un observateur à pied (**figure 10**).

Les mesures ont été effectuées sur des échantillons rocheux secs et mouillés pour les états initiaux et finaux de gommage accéléré. On a pu ainsi relever la variation de couleur de la surface du matériau, notamment en terme de facteur de réflexion, due au dépôt de gomme provenant du pneumatique. Les résultats obtenus sur les échantillons de granit et de porphyre sont reportés sur les **figures 11 et 12**, représentant la distribution spectrale relative de la réponse du matériau dans le spectre visible.

On observe que la présence de gomme a une influence significative sur le facteur de réflexion spectrale du granit (courbe décalée vers le bas) tandis qu'elle n'a qu'une influence négligeable sur le porphyre. Les coordonnées trichromatiques L^* , a^* , b^* (CIELab 1976) et X-Y-Z (CIE 1931) des échantillons de granit et de porphyre, pris comme exemple, sont reportés dans les **tableaux 7 et 8**.

On constate une faible variation des coordonnées trichromatiques du porphyre (Δ de l'ordre de 0,4 à 0,5) tandis que les coordonnées du granit varient plus fortement (Δ de l'ordre de 3 à 7), tout comme pour les autres matériaux rocheux « clairs » (marbre, pierre de Lessines, grès, **tableau 9**). Pour ces matériaux, les courbes représentant la répartition spectrale du coefficient de réflexion ont des formes diverses mais évoluent de la même façon. Des variations négatives de L^* signifient que le matériau devient plus foncé. En effet, la couleur blanche correspond à $L^* = 100$ et l'augmentation de a^* ou de b^* traduit l'évolution de la couleur de l'échantillon vers une couleur marron teinté de rouge tandis que l'augmentation de b^* et la diminution de a^* indiquent une tendance au marron teinté de vert (due à la couleur du pneumatique).

figure 9
Schéma géométrique
de l'angle d'observation
du colorimètre.

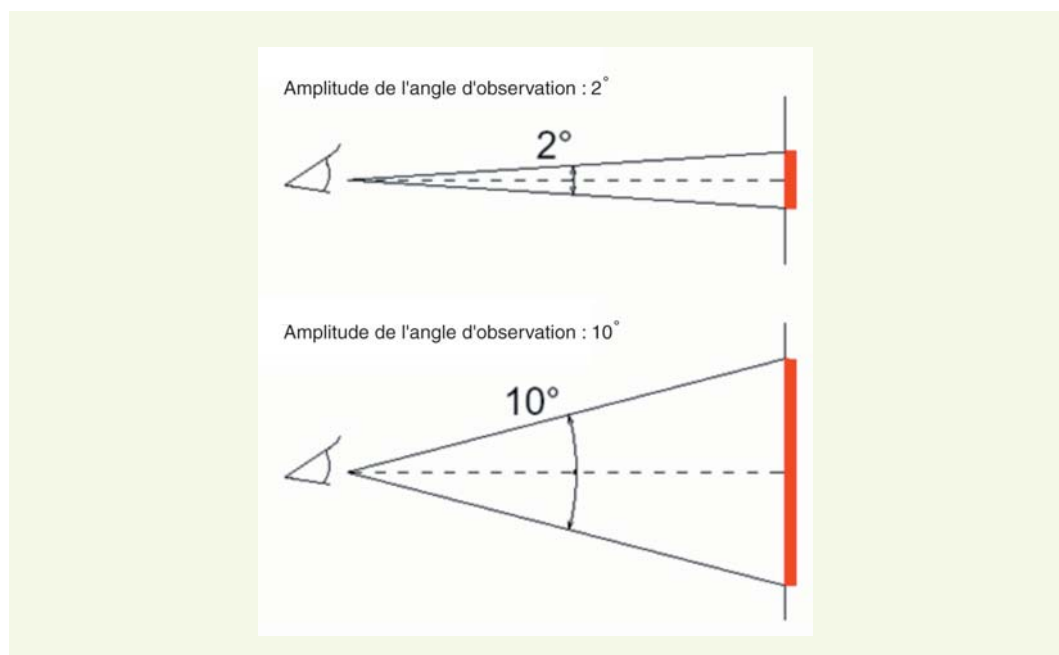


figure 10

Schéma géométrique du protocole de mesure du colorimètre.

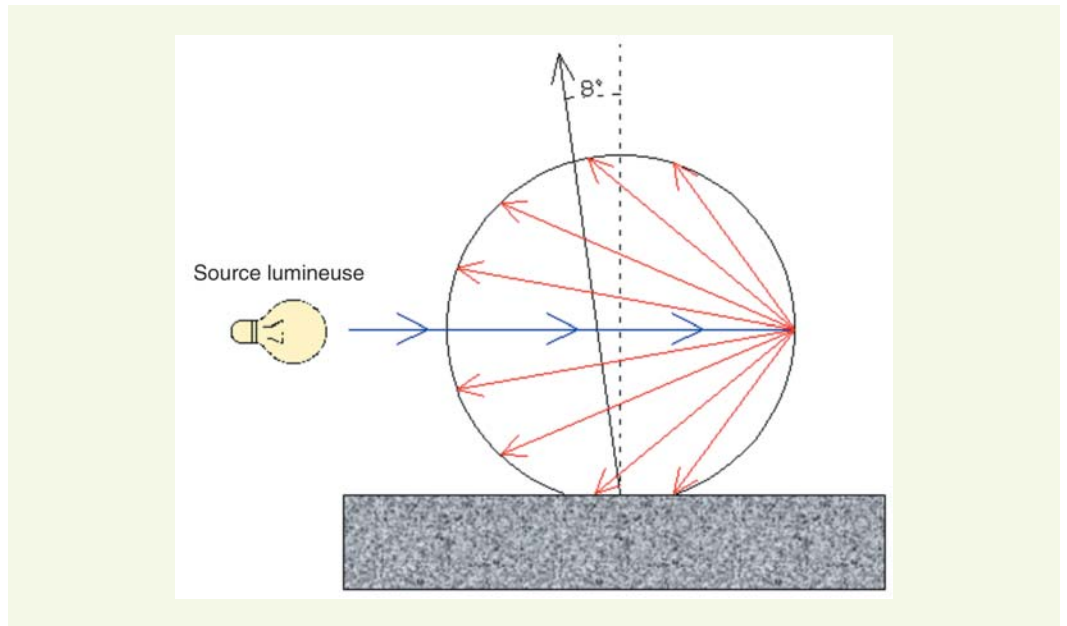


figure 11

Facteur de réflexion spectrale mesuré sur un échantillon de granit soumis à un gommage artificiel.

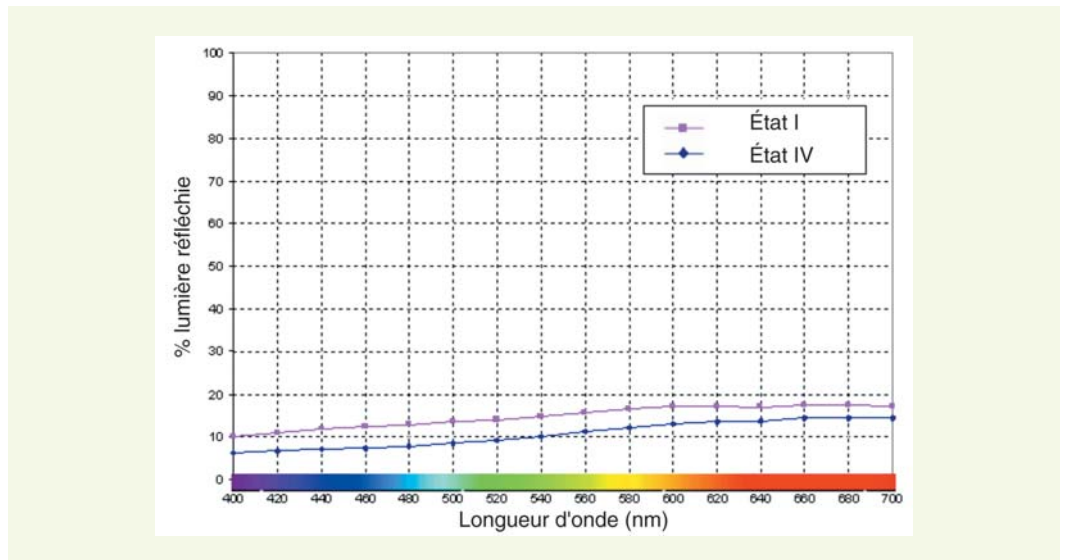


figure 12

Facteur de réflexion spectrale mesuré sur un échantillon de porphyre soumis à un gommage artificiel.

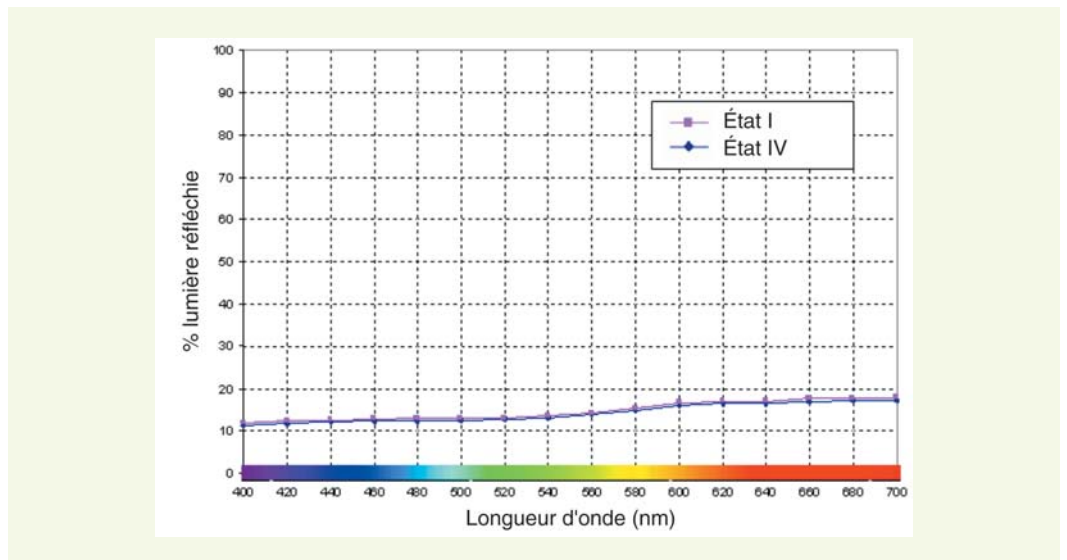


tableau 7

Granit : coordonnées trichromatiques avec l'éclairage D65.

| Coordonnées CIELab 1976 | Intact | Soumis au gommage | Δ | Coordonnées CIE | Intact | Soumis au gommage | Δ |
|-------------------------|--------|-------------------|----------|---------------------|--------|-------------------|----------|
| Observateur CIE 2° | | | | Observateur CIE 2° | | | |
| L* | 46,15 | 39,54 | - 6,61 | X | 14,92 | 10,98 | - 3,93 |
| a* | 1,81 | 4,13 | 2,83 | Y | 15,38 | 10,98 | - 4,40 |
| b* | 7,89 | 11,73 | 3,84 | Z | 13,32 | 8,08 | - 5,24 |
| Observateur CIE 10° | | | | Observateur CIE 10° | | | |
| L* | 45,90 | 39,17 | - 6,73 | X ₁₀ | 14,79 | 10,84 | - 3,95 |
| a* | 2,36 | 4,89 | 2,53 | Y ₁₀ | 15,20 | 10,76 | - 4,44 |
| b* | 7,71 | 11,35 | 3,64 | Z ₁₀ | 13,02 | 7,88 | - 5,14 |

tableau 8

Porphyre : coordonnées trichromatiques avec l'éclairage D65.

| Coordonnées CIELab 1976 | Intact | Soumis au gommage | Δ | Coordonnées CIE | Intact | Soumis au gommage | Δ |
|-------------------------|--------|-------------------|----------|---------------------|--------|-------------------|----------|
| Observateur CIE 2° | | | | Observateur CIE 2° | | | |
| L* | 45,00 | 44,42 | - 0,58 | X | 14,53 | 14,07 | - 0,47 |
| a* | 4,45 | 4,05 | - 0,40 | Y | 14,54 | 14,13 | - 0,41 |
| b* | 4,44 | 4,91 | 0,47 | Z | 13,91 | 13,31 | - 0,60 |
| Observateur CIE 10° | | | | Observateur CIE 10° | | | |
| L* | 44,84 | 44,25 | - 0,59 | X ₁₀ | 14,39 | 13,93 | - 0,46 |
| a* | 4,46 | 4,13 | - 0,33 | Y ₁₀ | 14,43 | 14,01 | - 0,42 |
| b* | 4,25 | 4,73 | 0,48 | Z ₁₀ | 13,67 | 13,07 | - 0,60 |

tableau 9

Coordonnées trichromatiques avec l'éclairage D65 et amplitude de l'angle d'observation de 10°.

| Coordonnées CIELab 1976 | Intact | Soumis au gommage | Δ | Coordonnées CIE 1964 | Intact | Soumis au gommage | Δ |
|-------------------------|--------|-------------------|----------|-------------------------|--------|-------------------|----------|
| Pierre de Lessines | | | | Pierre de Lessines | | | |
| L* | 80,82 | 68,64 | - 12,18 | X ₁₀ | 55,58 | 37,22 | - 18,36 |
| a* | 1,13 | 1,28 | 0,15 | Y ₁₀ | 58,15 | 38,84 | - 19,30 |
| b* | 5,78 | 8,41 | 2,63 | Z ₁₀ | 56,13 | 34,88 | - 21,25 |
| Grès | | | | Grès | | | |
| L* | 77,72 | 75,65 | - 2,07 | X ₁₀ | 50,32 | 47,39 | - 2,93 |
| a* | 0,85 | 1,74 | 0,89 | Y ₁₀ | 52,74 | 49,33 | - 3,42 |
| b* | 5,01 | 9,27 | 4,26 | Z ₁₀ | 51,49 | 44,15 | - 7,34 |
| Marbre blanc de Carrare | | | | Marbre blanc de Carrare | | | |
| L* | 84,15 | 67,20 | - 16,95 | X ₁₀ | 57,63 | 34,85 | - 22,78 |
| a* | 0,35 | 0,47 | 0,12 | Y ₁₀ | 54,17 | 36,90 | - 17,27 |
| b* | 1,15 | 0,89 | - 0,26 | Z ₁₀ | 59,12 | 38,85 | - 20,27 |

En général, on observe que les matériaux foncés, comme le porphyre, ne changent sensiblement pas de couleur même après le dépôt de gomme de pneumatique, tandis que ceux qui sont plus clairs (granit, marbre, pierre de Lessines, Luserne, grès) subissent une forte variation due à la simulation du trafic, à état de gommage égal. Les coordonnées trichromatiques des éléments de bétons autobloquants sont reportées dans le **tableau 10** et présentent des variations significatives avec l'augmentation du degré de gommage.

La répartition spectrale du coefficient de réflexion avant et après gommage artificiel pour les éléments de béton autobloquants a été également mesurée (figures 13 et 14). Les éléments gris présentent une variation de la courbe de réponse spectrale après gommage plus accentuée que les éléments rouges, ce qui est dû au fait que les éléments gris sont initialement plus « clairs ».

Les échantillons de béton bitumineux n'ont pas été soumis au gommage artificiel mais à l'usure artificielle car la variation de couleur due au dépôt de gomme de pneumatique est négligeable sur le matériau intact lorsque les agrégats sont complètement recouverts de bitume. L'usure artificielle, au contraire, a mis en évidence la différence existant, en terme de couleur, entre les bétons bitumineux à agrégats clairs et ceux à agrégats foncés, lorsque ceux-ci apparaissent avec l'usure (figures 15 et 16). Cette configuration est fréquente sur les routes soumises à un trafic routier important et est donc représentative des variations possibles une fois la chaussée en service, même si l'usure atteinte en laboratoire est extrême.

La variation de couleur peut être perçue par l'observateur, créant une perception différente de l'environnement routier et influençant naturellement la réponse du matériau à la lumière. En outre, la variation de couleur influence le contraste, lequel est fondamental pour la perception des objets se trouvant sur la chaussée. On observe également que la variation d'amplitude de l'angle d'observation (de 2° à 10°) n'agit pas de manière significative sur les valeurs de coordonnées trichromatiques. Que ce soit en vision centrale (2°) ou en vision périphérique (10°), la couleur perçue est la même.

tableau 10
Coordonnées trichromatiques avec l'éclairage D65 et amplitude de l'angle d'observation de 10°.

| Coordonnées CIELab 1976 | Intact | Soumis au gommage | Δ | Coordonnées CIE 1964 | Intact | Soumis au gommage | Δ |
|----------------------------|--------|-------------------|----------|----------------------------|--------|-------------------|----------|
| Élément autobloquant rouge | | | | Élément autobloquant rouge | | | |
| L* | 48,70 | 42,34 | - 6,36 | X ₁₀ | 18,24 | 13,12 | 5,12 |
| a* | 9,79 | 7,19 | - 2,61 | Y ₁₀ | 17,35 | 12,72 | 4,63 |
| b* | 9,62 | 7,24 | - 2,38 | Z ₁₀ | 14,20 | 10,91 | 3,30 |
| Élément autobloquant gris | | | | Élément autobloquant gris | | | |
| L* | 51,46 | 46,66 | - 4,80 | X ₁₀ | 18,68 | 14,88 | 3,80 |
| a* | 0,18 | - 0,36 | - 0,54 | Y ₁₀ | 19,67 | 15,76 | 3,91 |
| b* | 6,08 | 3,70 | - 2,38 | Z ₁₀ | 17,97 | 15,23 | 2,73 |

figure 13
Facteur de réflexion spectrale mesuré sur des éléments de béton autobloquant gris soumis à un gommage artificiel.

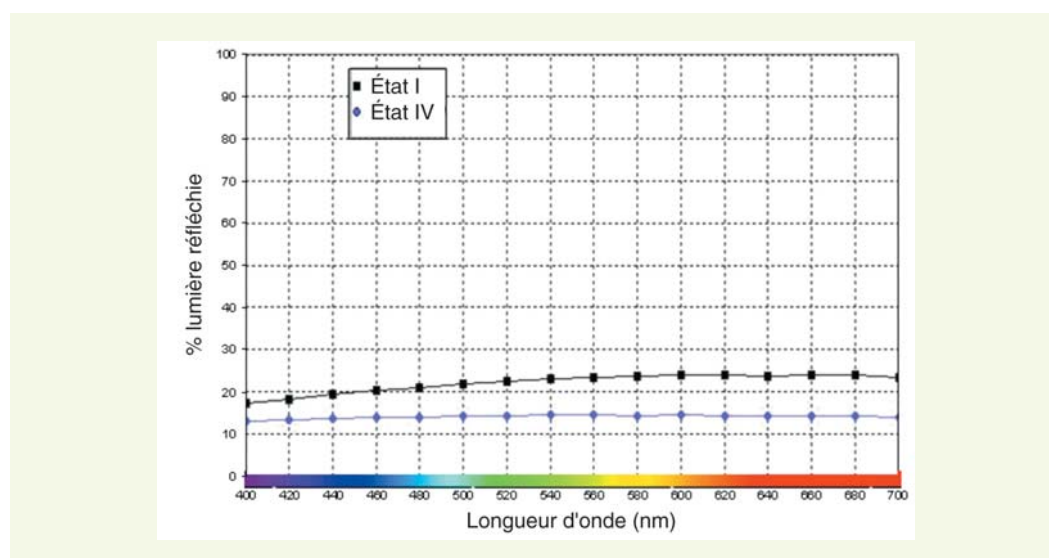


figure 14

Facteur de réflexion spectrale mesuré sur des éléments de béton autobloquant rouge soumis à un gommage artificiel.

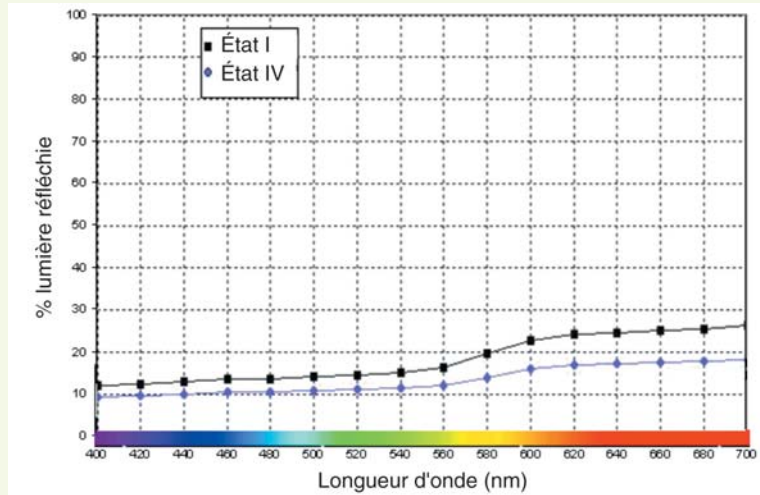


figure 15

Facteur de réflexion spectrale mesuré sur un échantillon de béton bitumineux à agrégats foncés soumis à une usure artificielle.

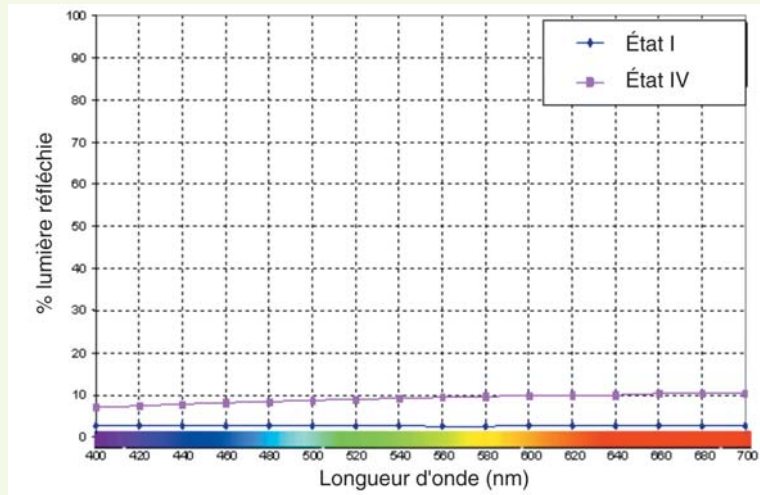
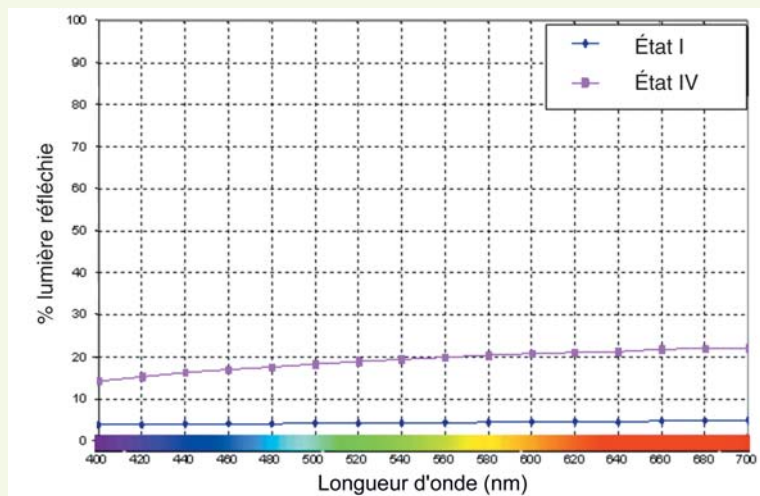


figure 16

Facteur de réflexion spectrale mesuré sur un échantillon de béton bitumineux à agrégats clairs soumis à une usure artificielle.



CONCLUSIONS

Les critères usuels de choix d'un matériau de revêtement sont la résistance mécanique et les caractéristiques d'adhérence. Toutefois, les auteurs ont jugé intéressant d'étudier l'évolution de la couleur et de certaines propriétés photométriques, déjà adoptées dans le cadre de la signalisation horizontale, pour fournir d'autres critères de choix sur l'efficacité des revêtements routiers. En particulier, l'objectif est de fournir un certain nombre d'éléments pour caractériser les matériaux au moment du choix, en fonction de l'application et du contexte dans lequel ils seront mis en œuvre. De nombreux matériaux d'usage fréquent pour les revêtements en milieu urbain ont été soumis à une usure accélérée et un gommage artificiel en laboratoire. Il a été observé que les caractéristiques de rétro réflexion de la surface des matériaux rocheux et des éléments de béton autobloquant des bétons bitumineux (caractérisés par des agrégats de couleur différente) évoluent considérablement durant la vie utile de la route. Les processus d'usure et de gommage ont été appliqués successivement alors que l'usure n'est pas nécessairement suivie de gommage des surfaces, une fois le revêtement mis en œuvre (surfaces de zones piétonnes, polissage de la route à cause des pluies ou du lavage).

La large gamme des revêtements naturels et artificiels analysés, malgré l'inévitable variabilité due aux matériaux, montre que l'usure augmente de façon importante (25 % à 50 %) les valeurs du coefficient de luminance rétro réfléchie R_L en condition d'éclairage par des projecteurs de véhicule. Le facteur de luminance en condition d'éclairage diffus Q_d pour des surfaces sèches reste toutefois relativement constant. Le gommage dû au passage de pneumatique met en évidence, après les premiers mois de service, une réduction de R_L et de Q_d atteignant respectivement 50 % et 30 %, toujours pour des surfaces sèches. La même expérience menée sur des surfaces mouillées, mis à part les situations d'eau stagnante ou de flux important, a montré que les phénomènes de réflexion diffuse et spéculaire prévalent sur les phénomènes de rétro réflexion.

La couleur des revêtements joue un rôle important, au-delà de l'aspect esthétique, comme élément permettant de reconnaître les espaces routiers, ainsi que pour obtenir un contraste adéquat avec la signalisation horizontale et les obstacles possibles sur la route. Les mesures de couleur obtenues en utilisant un colorimètre montrent la bonne stabilité colorimétrique du porphyre, des bétons bitumineux et à base de ciment qui seront préférentiellement utilisés pour des zones où leur bonne stabilité photométrique et chromatique est requise. Les autres matériaux (grès et pierre de Luserne) évoluent vers des tonalités plus sombres qui modifient sensiblement leur aspect d'origine et seront donc réservés aux trottoirs et aux zones piétonnes. Les porphyres et les granits, matériaux naturels traditionnellement utilisés pour les routes, garantissent une micro-rugosité élevée (même sous les effets du trafic) et sont stables en terme de caractéristiques photométriques. Concernant les éléments de béton autobloquant et les bétons bitumineux, les paramètres photométriques étudiés sont relativement stables, mais il faut tenir compte, en phase d'étude d'éclairage, de la variation de couleur qui peut se présenter en service. Cette dernière dépend des agrégats utilisés, qui affleurent progressivement avec l'usure.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Professeur Claudio Oleari (Département de Physique de l'Université de Parme) pour sa disponibilité et ses compétences sur la thématique de la lumière et des couleurs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **Norme UNI 10439**, *Requisiti di illuminotecnica delle strade con traffico motorizzato*, 2^e édition, **2001**, Italie.
- 2 **Norme EN 13201**, *Éclairage public*, **2004**.
- 3 **Norme ISO 25539**, *Photometry-The CIE system of physical photometry*, 1^{re} édition, **2005**.
- 4 **GIULIANI F., RASTELLI S.**, Road perception in non-uniform lighting conditions, in *5 th European Conference of young research and science workers in transport and telecommunications*, **TRANSCOM**, **2003**, Žilina (Slovaquie).
- 5 **BONOMO M.**, *Guida alla progettazione dell'illuminazione stradale e urbana*, Mancosu Editore, **2006**, Italie.
- 6 **Norme EN 1436**, *Produits de marquage routier, Performances des marques appliquées sur la route*, novembre **1997**.
- 7 **TOMIO P., FILIPPI F.**, *Il manuale del porfido*, Ente Sviluppo Porfido, Albiano (TN), **1996**, Italie.
- 8 **Norme EN 13036-4**, *Caractéristiques des routes et aérodromes – Méthodes d'essai – partie IV : méthode de mesurage de l'adhérence d'une surface – Essai au pendule*, **2003**.
- 9 **IAQUINTA J., LUKIANOWICZ C., MERLIOT E.**, Caractériser la texture de revêtements routiers par analyse différentielle de la lumière rétrodiffusée, in *Journées des Sciences de l'Ingénieur*, **2003**, Dourdan, France, pp.29-34.
- 10 **Norme CIE 15**, *Colorimétrie*, 3^e édition, **2004**.
- 11 **ISO 10526**, *Illuminants colorimétriques normalisés CIE*, 2^e édition, **1999**.