

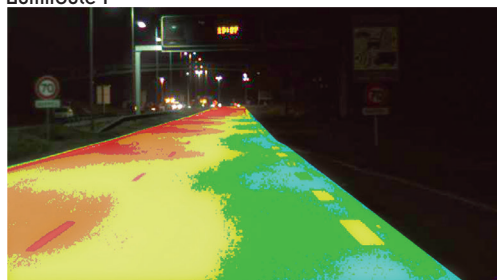
Le procédé Lumiroute®

OPTIMISATION DU COUPLE REVÊTEMENT ET LUMIÈRE POUR ÉCLAIRER JUSTE

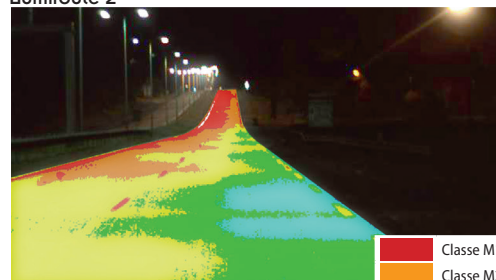
Les projets de voirie associent rarement les capacités de réflexion du revêtement de chaussée en place aux caractéristiques des luminaires qui vont équiper l'infrastructure. À défaut, les revêtements types CIE (Commission internationale de l'éclairage)¹ sont utilisés. Pourtant, la performance lumineuse, ou luminance, qui correspond à la lumière perçue par l'utilisateur conducteur, résulte de l'interaction entre la lumière émise et la matière qui reflète cette lumière.

Caractérisation en
luminance des sections
Lumiroute expérimentées.

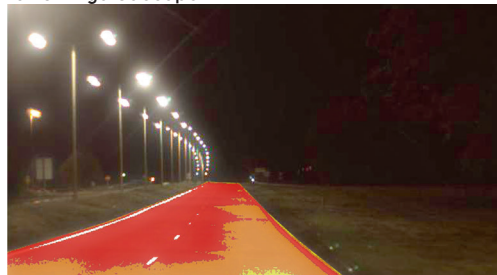
Lumiroute 1



Lumiroute 2



Témoin hydrodécapé



Témoin



Classe M1
Classe M2
Classe M3
Classe M4
Classe M5
Classe M6

AUTEURS

Aurélia Nicolai
Chef de Projets R & D
Entreprise Malet

Paul VERNY
Responsable de la mission Éclairage,
maîtrise de l'énergie et des nuisances
liées à la lumière
Cerema

Valérie Muzet
Responsable d'activité Imagerie -
Méthodes optiques - Photométrie
Cerema

Florian Greffier
Chef de projets de recherche - Expert Éclairage
Cerema

Patricia El Baâmrani
Directrice support Projets & Solutions
Thorn Europhane

Patrick Tardieux
Directeur des études techniques
Limoges Métropole

Marc Lavigne
Directeur général
Spie batignolles énergie Borja

En effet, pour les projets « en luminance », c'est précisément à ce stade que le revêtement routier prend toute son importance : la combinaison de la distribution lumineuse des luminaires et des propriétés de réflexion du revêtement aboutit à cette optimisation qui favorise l'éclairage moyen minimal associé à la luminance à maintenir exigée. Lumiroute® s'appuie sur ce constat pour proposer un projet associant les 2 thématiques afin d'améliorer les performances des installations et de réaliser ainsi d'importantes économies d'énergie². Lauréat en 2011 de l'appel à projets Innovation routière lancé chaque année par le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM), Lumiroute est évalué sur un site expérimental situé à Limoges³. Le comité de pilotage du projet est constitué des différents acteurs, publics et privés, qui y travaillent en partenariat depuis plus de 2 ans : la communauté d'agglomération Limoges Métropole, maître d'ouvrage de l'opération, le Cerema, missionné par le Comité d'innovation routes et rues (CIIR), Malet, Thorn, Spie batignolles énergie Borja et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).

PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIMENTATION

SITE

Le site expérimental est une chaussée de 2 x 2 voies d'une largeur de 6,50 m et de 400 m de long sur le boulevard Schuman à Limoges (figure 1) supportant un trafic T2 (150 à 300 poids lourds par jour) et dont la limitation de vitesse des véhicules est de 70 km/h. Le terre-plein central, d'une largeur de 4 à 4,5 m, accueille un éclairage d'une hauteur de feu de 9 m avec une implantation des lanternes dos à dos.

REVÊTEMENTS

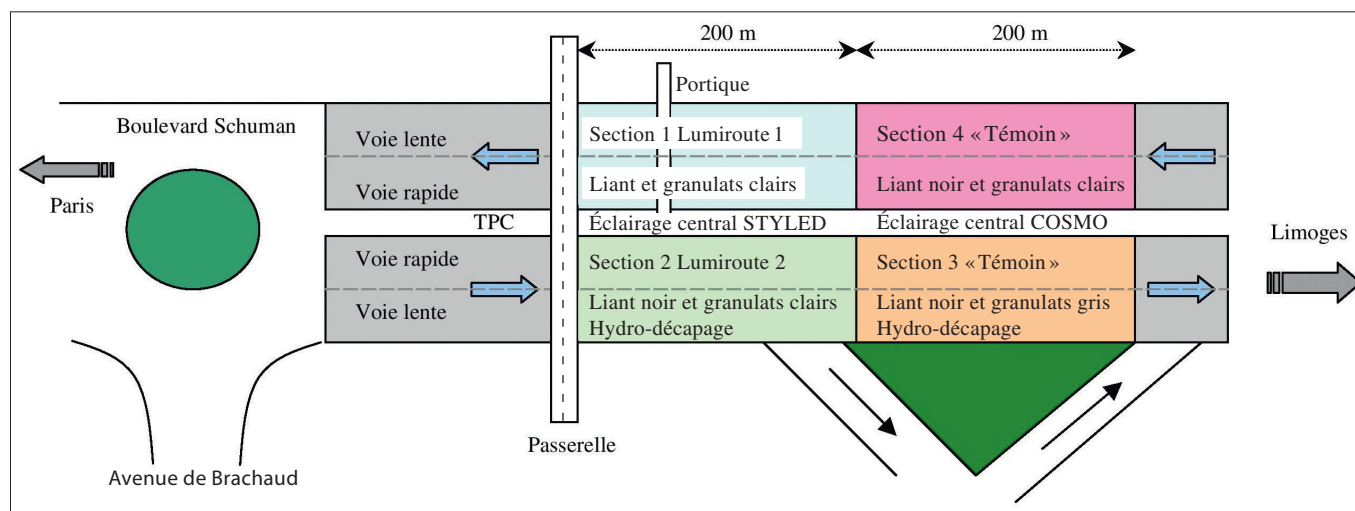
Le revêtement routier de l'ensemble du boulevard Schuman est une formule de type béton bitumineux mince continu (BBMC) 0/10. Les 4 formulations mises en œuvre sont présentées dans le tableau 1.

LUMINAIRES

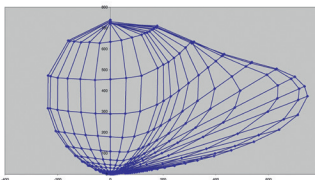
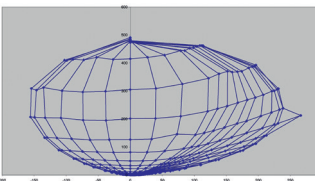
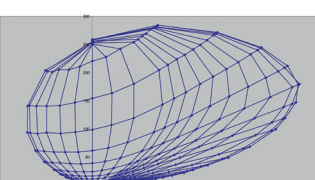
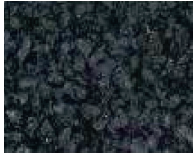
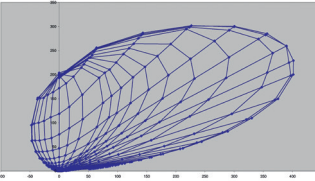
Les sections témoins sont éclairées par un luminaire de type lampe à décharge Oracle S équipé d'une source à iodures Cosmo de 140 W en lumière blanche.

—Figure 1—

Site expérimental de Lumiroute à Limoges.



© MALLET

Identification de section	Réflectivité (Q0)	Spécularité ou brillance (S1)	Solide photométrique
 Section 1 : Lumiroute 1	0,140	1,15	
 Section 2 : Lumiroute 2	0,074	0,415	
 Section 3 : témoin hydrodécapé	0,056	0,86	
 Section 4 : témoin brut	0,069	2,27	

© MALET / CEREMA

—Tableau 1—

Caractéristiques des différentes sections.

L'optique est de type routière (figure 2) et ne présente aucune émission de lumière au-dessus de l'horizontale (ULOR (*Upward Light Output Ratio*) = 0). Grâce à l'équipement électronique bi-puissance, l'éclairage peut être réduit à un niveau inférieur pendant les 8 heures creuses du trafic routier nocturne.

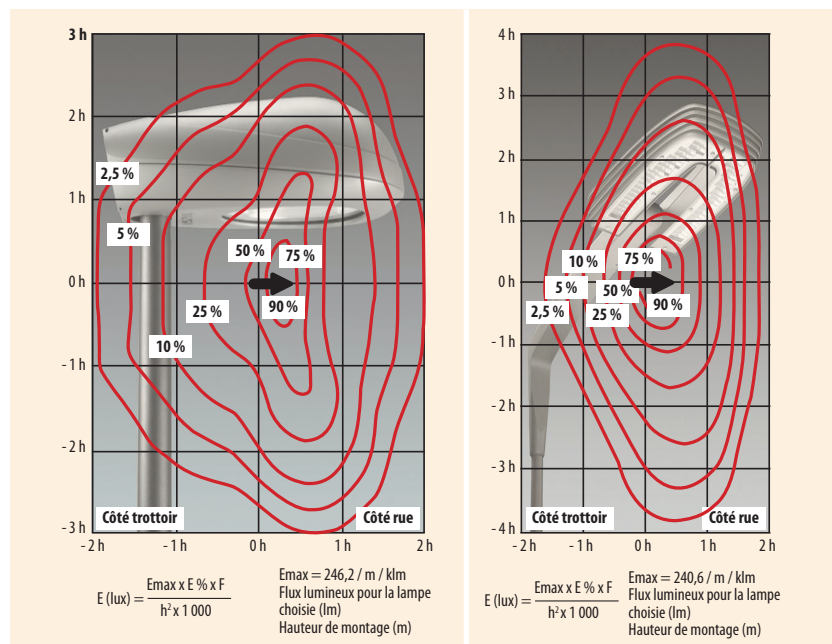
Les sections Lumiroute 1 et 2 sont respectivement éclairées par des luminaires LED Styled 77 W (48 LED) et 103 W (64 LED). La technologie LED permet un meilleur facteur d'utilisation du luminaire,

notamment en optimisant les optiques de chaque LED (figure 3). De plus, le numérique offre de nombreuses possibilités d'ajustement du courant qui alimente les LED et permet d'adapter la photométrie à l'évolution du revêtement dans le temps.

Afin d'évaluer la puissance initiale nécessaire sur le tronçon expérimental, les concepteurs de Lumiroute se sont appuyés sur les valeurs théoriques normatives de la classe d'éclairage ME3a - 1 cd/m² déprécié par rapport au type d'enrobé (carottes préparées et mesurées en laboratoire)⁴.

–Figures 2 et 3–

Répartition des intensités lumineuses sur la chaussée pour les lampes Oracle (figure 2) et Styled (figure 3).



Les bilans réalisés tous les 6 mois (de T0 à T24) ont notamment pour objectif d'évaluer les performances de l'installation et de procéder à des ajustements sur les dispositifs Lumiroute en cas de sur ou sous-performance lumineuse, cette dernière évoluant notamment en raison du vieillissement des revêtements tests. Une analyse économique et environnementale des produits complètera le dossier final d'évaluation à 3 ans.

RÉSULTATS

VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT INITIAL

À l'issue des mesures réalisées in situ à la mise en service, il a été possible de vérifier :

- la corrélation entre le dimensionnement théorique réalisé à partir de carottes en laboratoire et les valeurs mesurées, qui a validé le processus ayant abouti au dimensionnement des installations d'éclairage du boulevard Schuman ;
- la correspondance des indicateurs de luminance moyenne (Lmoy), d'uniformités générale (U0) et longitudinale (U1).

VALIDATION DES COMPORTEMENTS CLASSIQUES DES REVÊTEMENTS

L'adhérence d'une chaussée est évaluée par sa micro- et sa macrotexture. Les évaluations menées à 2 ans démontrent un double phénomène, classique pour des chaussées réalisées à partir de BBMC 0/10 :

- une légère augmentation de la macrotexture des 4 revêtements, avec des résultats conformes au niveau demandé dans le cadre de la circulaire adhérence⁵ (*macrotexture moyenne* $\geq 0,60 \text{ mm}$ et *macrotexture minimum* $> 0,40 \text{ mm}$) ;

• une réduction du niveau moyen de l'adhérence sur les 4 sections. En effet, leur coefficient de frottement transversal (CFT) se situe entre 60 et 70 points de 100 CFT, correspondant à un niveau d'adhérence satisfaisant sur la classe de revêtement mesurée.

De la même façon, le niveau sonore des 4 sections d'enrobés a été mesuré et suivi régulièrement. Les niveaux sonores sont stables et similaires sur les 4 sections, avec une valeur moyenne de 95,8 dB (A), ce qui est classique pour un BBMC 0/10.

ÉVALUATION DE LA PHOTOMÉTRIE DES REVÊTEMENTS

Les mesures réalisées sur site avec l'appareil Coluroute, qui mesure le coefficient de luminance des routes, ont évalué l'évolution photométrique des différentes sections en termes d'homogénéité, de clarté (Q0) et de brillance (S1).

Les revêtements neufs ont des comportements photométriques très hétérogènes, contrairement aux revêtements hydrodécapés de Lumiroute 2 et de la section 3 témoin, résultat conforme à la littérature⁶. Après 2 ans, les différentes sections sont plus homogènes (figures 4 et 5).

Implication de Limoges Métropole dans l'expérimentation

La communauté d'agglomération Limoges Métropole s'est intéressée à la démarche liant la route et l'éclairage public dès mai 2012. Le boulevard Schuman, un des principaux axes d'entrée nord de la ville correspondait au cadre prévu pour l'expérimentation et la réfection de la chaussée et de l'éclairage était programmée.

Le concours de Limoges Métropole a porté sur plusieurs points : juridique (protocole d'expérimentation et rédaction du marché négocié), financier (surinvestissement), organisationnel (sécurisation des interventions), technique (adaptation des connaissances) et communication participative (enquête usagers sur le site de Limoges Métropole). Le suivi technique a été riche d'enseignements sur l'importance de câblages adaptés, l'évolution du matériel et les pratiques de programmation. Cette expérience permet à Limoges Métropole de poursuivre l'utilisation du couple route et lumière et de décliner ce concept avec des matériaux locaux.

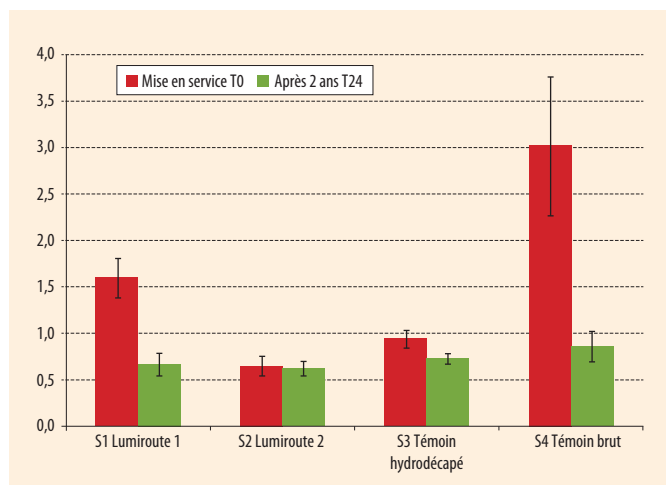
PROTOCOLE D'ÉVALUATION

L'expérimentation Lumiroute, qui a officiellement débuté le 2 décembre 2013, est conduite par un comité de pilotage. Le Cerema est chargé de la réalisation et de l'exploitation des mesures réalisées à échéances régulières. Ce suivi comporte plusieurs volets thématiques :

- évaluation conventionnelle des revêtements ;
- évaluation de la photométrie des revêtements en laboratoire et sur site (voir encadré p. 106) ;
- évaluation énergétique ;
- évaluation de la qualité de l'éclairage perçu avec le système Cyclope (voir encadré p. 107) ;
- évaluation environnementale.

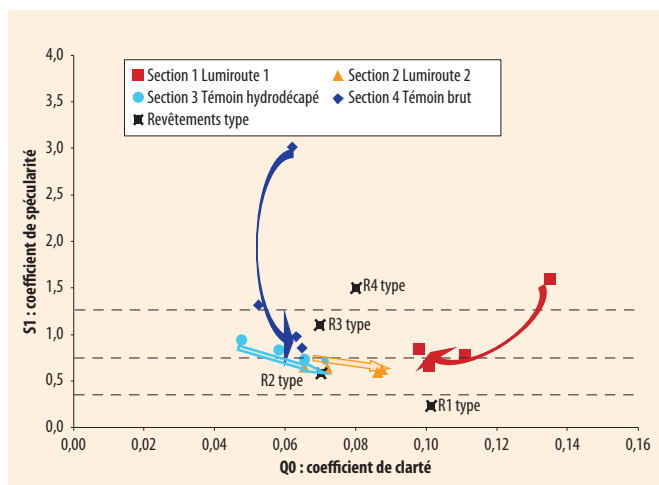
—Figure 4—

Spécularité S1 moyenne des 4 sections mesurées sur site avec Coluroute à T0 et T24.



—Figure 5—

Propriétés photométriques moyennes des 4 revêtements au cours des 2 ans d'expérimentation. L'évolution au cours du temps est représentée par des flèches.



Au fur et à mesure des évaluations de la section Lumiroute 1, l'enrobé s'assombrit et devient plus diffusant. À la pose de l'enrobé, le film de liant n'étant pas décapé, il s'encrasse naturellement.

Sur la section Lumiroute 2, la spécularité est stable. En revanche, le liant bitumineux (noir), partiellement découvert lors du décapage, continue à déga-ger les granulats blancs, rendant le revêtement globalement plus clair.

La section témoin hydrodécapée 3 présente des similarités avec la section Lumiroute 2, les 2 enrobés bénéficiant d'un hydrodécapage à leur mise en service.

La section témoin brute 4 présente des similarités avec la section 3, puisqu'il s'agit des mêmes maté-riaux. Cependant, les premières mesures diffèrent, la section brute étant recouverte de bitume, ce qui explique la forte spécularité initiale.

À l'issue de 2 ans de mesures, il apparaît que les caractéristiques photométriques des sections Lumiroute 1 et 2 se rejoignent, mais restent plus claires que les sections témoins. Les caracté-ristiques des sections témoins 3 et 4 se rejoignent également. L'hydrodécapage des sections permet d'accélérer la stabilisation des propriétés de surface du revêtement.

PERFORMANCES DES INSTALLATIONS

Évaluation énergétique

Sur la base des relevés photométriques de toutes les sections de l'expérimentation réalisés à diffé-rentes périodes, un surdimensionnement du niveau lumineux a été constaté sur toutes les sections.

Dans le but d'« éclairer juste », notion introduite par la norme NF EN 13201⁴, le procédé Lumiroute des sections 1 et 2 permet l'optimisation du flux lumineux. Ainsi, le comité de pilotage a pris la décision de baisser progressivement la puissance des LED des 2 sections Lumiroute (l'installation ne

prévoyant pas l'équivalent sur les lanternes témoins). Deux campagnes de réduction des alimentations électriques des luminaires Styled ont pu être menées pour ajuster au mieux le flux des LED de manière à adapter la performance en lumi-nance aux objectifs fixés, avec une diminution en proportion des puissances par luminaire et des consommations énergétiques respectant les exigences normatives :

- 78,7 W à T0 réduit à 50 W à T + 24 sur Lumiroute 1 ;
 - 103,2 W à T0 réduit à 65 W à T + 24 sur Lumiroute 2.
- Les sections 3 et 4 (152 W consommés) sont restées fixes afin de conserver leur caractère de témoins.

Dimensionnement d'un projet d'éclairage

Afin de répondre aux exigences de luminance ou d'éclairage définies dans la norme NF EN 13201, le projet d'éclairage permet de dimensionner la solution lumière en termes de :

- hauteur de mâts, inter-distances, reculs ;
- répartition photométrique, flux lumineux sortant, puissance ;
- paramètres du site à éclairer ;
- type de revêtement.

En fonction de la classe d'éclairage, des valeurs de luminance moyenne (L_{moy}) et d'uniformités longitudinale (UI) et générale (U0) sont requises. Ces valeurs sont calculées entre 2 mâts sur la base d'un maillage spécifique de points de mesure défini dans la norme.

La complexité d'un projet réside dans l'optimisation du couple revêtement/luminaire afin d'obtenir la solution la plus efficace possible en termes de quantité de lumière/W/m². Sur la base d'un premier dimensionnement d'installation, les logiciels de calculs effectuent toutes les combinaisons possibles courbe photométrique/flux lumineux/puissance pour définir la solution la mieux adaptée au projet.

En général, ce sont les tables de revêtement type qui sont utilisées pour dimension-ner un projet. L'innovation Lumiroute consiste à prendre en compte les propriétés de réflexion de chacun des revêtements mis en œuvre pour dimensionner l'éclairage associé afin d'optimiser les performances nocturnes globales de l'infrastructure à un moindre coût énergétique.

Mesure de la photométrie des revêtements : goniophotomètre et Coluroute

Les propriétés réfléchissantes des surfaces routières sont décrites par le coefficient de luminance q , défini comme le quotient de la luminance L en un point de la chaussée par l'éclairement horizontal E produit en ce même point par un foyer lumineux : $q = \frac{L}{E}$

Ce coefficient de luminance est exprimé en $\text{cd.m}^{-2}.\text{lux}^{-1}$ et est déterminé pour un angle d'observation de 1° , ce qui correspond à la perception d'une chaussée éclairée à 100 m par un conducteur de véhicule léger.

La specularité (ou brillance), notée $S1$, traduit le pouvoir de la chaussée à réfléchir la lumière dans une direction bien définie et sa réflectivité totale, notée $Q0$, est une caractéristique de sa clarté. Selon les valeurs du couple ($S1$, $Q0$), les revêtements peuvent être classés par type (R1, R2, R3 ou R4). R1 est un revêtement réfléchissant la lumière uniformément dans toutes les directions et R4 un revêtement très spéculaire.

La photométrie des revêtements est généralement mesurée à partir de prélèvements en laboratoire (photo 1) à l'aide d'un goniophotomètre (photo 2). Pour s'affranchir de cette contrainte de prélèvement, il est possible d'utiliser un appareil de mesure transportable, appelé Coluroute⁷ (Coefficient de Luminance des ROUTEs – photo 3), qui permet des mesures en plusieurs emplacements et donc une caractérisation plus représentative du revêtement, notamment en termes d'homogénéité.

-Photo 1-
Carottes de revêtements du projet.



-Photo 2-
Goniophotomètre.



-Photo 3-
Coluroute.



Le surdimensionnement important du niveau lumineux des sections 3 et 4 n'est pas compensé par une gradation, ce qui a un impact notoire sur la différence entre les sections témoins et Lumiroute.

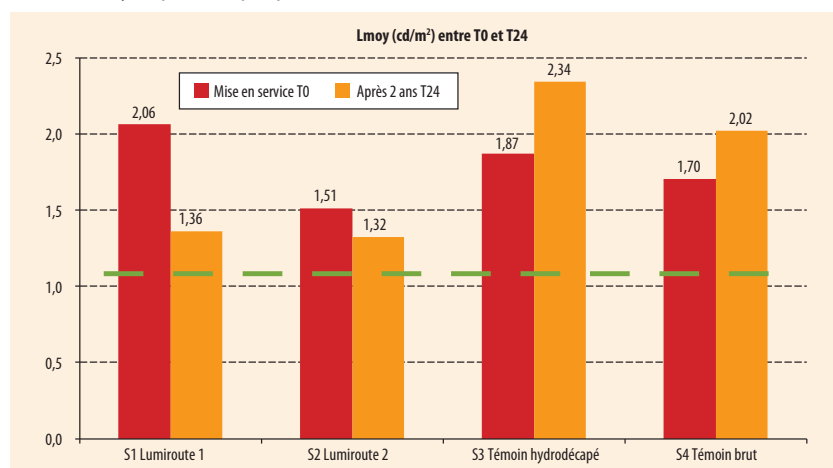
Les consommations annuelles calculées en tenant compte des réductions de puissance (8 h par nuit) (tableau 2) démontrent un volume d'économie d'énergie important sur les sections Lumiroute au regard des sections témoins.

-Tableau 2-
Consommations d'énergie annuelles.

		Sections témoins 3 et 4	Lumiroute 1	Lumiroute 2
T0	Consommation énergétique	4 383* kWh	1 497 kWh	1 967 kWh
	Réduction énergétique		- 65,8 %	- 55,1 %
T24	Consommation énergétique	3 316 kWh	974 kWh	1 252 kWh
	Réduction énergétique		- 70,6 %	- 62,2 %

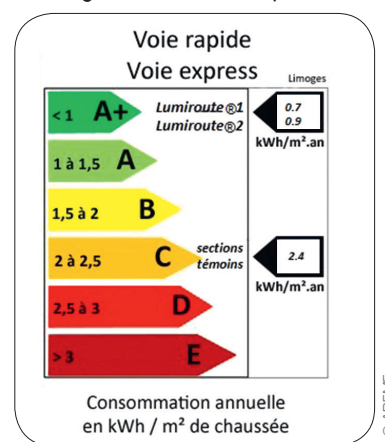
* Cette valeur des sections témoins est plus élevée à T0 du fait du non-fonctionnement à T0 du dispositif d'abaissement de puissance, devenu opérationnel à partir de T + 6 mois.

-Figure 7-
Comparaison des mesures de luminance moyenne entre T0 et T24.
(En vert, l'objectif normatif déprécié.)



L'étiquette énergie attribuée la note A+ aux sections Lumiroute (figure 6). Les consommations obtenues par les sections témoins correspondent à la note C.

-Figure 6-
Étiquette énergie des 4 sections expérimentées.



Évaluation de la qualité de l'éclairage perçu

Il s'agit d'évaluer le niveau de service de l'installation d'éclairage par rapport aux exigences normatives⁴ selon l'évolution dans le temps des propriétés de réflexion des revêtements routiers. Cette évaluation a été réalisée en statique et en dynamique avec le système Cyclope sur les grandeurs normalisées : Lmoy (figure 7), U0 et UI, pour toutes les sections, sur toute leur longueur.

- Section Lumiroute 1 : une baisse notable de la luminance moyenne est observée, due au réajustement du courant d'alimentation des Styled et à l'évolution des propriétés optiques du revêtement Lumiroute 1.
- Section Lumiroute 2 : une légère baisse de la luminance moyenne est constatée, également due à la baisse des courants d'alimentation et à

l'évolution des propriétés de surface du revêtement Lumiroute 2. L'écart plus réduit entre la luminance moyenne initiale et celle à 2 ans s'explique par une meilleure stabilité dans le temps du fait de l'hydrodépavage.

- Sections témoins 3 et 4 : la luminance moyenne des sections augmente depuis la mise en service en raison de l'éclaircissement progressif des revêtements et de l'impossibilité d'ajuster la puissance des lampes à décharge. La différence de performance entre S3 et S4 s'explique par l'hydrodépavage de la section 3.

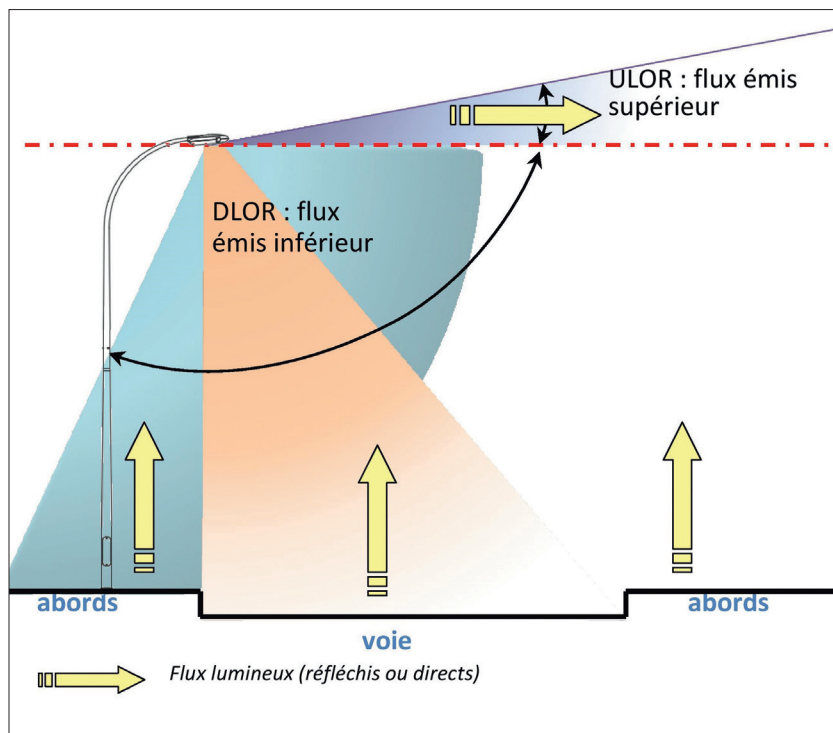
Sur les 4 sections, l'objectif de 1 cd/m² (candela par mètre carré) déprécié reste atteint au bout de 2 ans. Concernant U0 et UI, l'ensemble des sections présente un niveau optimal de service aux usagers avec des valeurs respectant les objectifs normatifs. Seule la section Lumiroute 1 présente quelques valeurs légèrement inférieures aux objectifs fixés, qui s'inscrivent dans la marge d'erreur correspondant à la prise en compte de l'environnement extérieur lors des mesures (aléas de la météo ou humidité relative à la surface des revêtements).

NUISANCES LUMINEUSES

Il s'agit de qualifier les installations d'éclairage du projet Lumiroute par rapport à la lumière non utile, voire nuisible (figure 8). Cette évaluation se fait sous forme de bilan de flux pouvant être appliqué aux installations d'éclairage différenciées. Elle traduit notamment le débordement de la lumière au-delà des limites de la surface volontairement éclairée.

—Figure 8—

Représentation des flux perdus par une installation d'éclairage.



Le flux maximum (UPFmax) des installations potentiellement perdu (direct et réfléchi), exprimé en lumens, a été déterminé conformément à la norme XP X 90-013⁸ à partir de l'évolution des caractéristiques de chaque section (flux sortant, coefficient de réflexion de la chaussée, éclairage moyen). Tous les luminaires installés présentent un ULOR = 0.

Cyclope : l'œil électronique embarqué

L'outil Cyclope est un appareil de mesure innovant développé par le Cerema⁹, qui effectue, dans le cadre métrologique explicité dans la norme NF EN 13201, des diagnostics de performance photométrique d'installations d'éclairage.

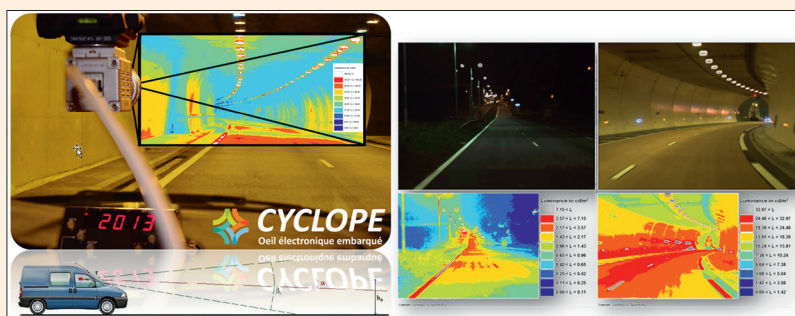
Contrairement aux mesures classiques effectuées en statique avec un luminancemètre ponctuel, les relevés de luminance sont ici réalisés en continu et en dynamique par véhicule instrumenté. Cette méthodologie minimise considérablement le temps de mesure et les contraintes d'exploitation

pour le maître d'ouvrage. Elle autorise donc un diagnostic exhaustif en luminance sur des linéaires de plusieurs kilomètres. Toutes les mesures produites sont géoréférencées et peuvent être intégrées dans le système d'information géographique (SIG) du gestionnaire.

Plus concrètement, le système Cyclope (figure 9) est constitué d'une caméra calibrée (en luminance et en couleur) et embarquée dans un véhicule dédié. Les images enregistrées par la caméra portent les distributions de luminance de la scène routière et le maillage normalisé de mesure est projeté dans chaque image acquise. Les calculs usuels de luminance moyenne (Lmoy) et d'uniformités (générale U0 et longitudinale UI) sont alors menés classiquement à partir des 60 points de mesure composant le maillage projeté. La cadence d'acquisition d'images du système offre un parfait recouvrement entre 2 mesures successives.

—Figure 9—

Appareil Cyclope du Cerema.

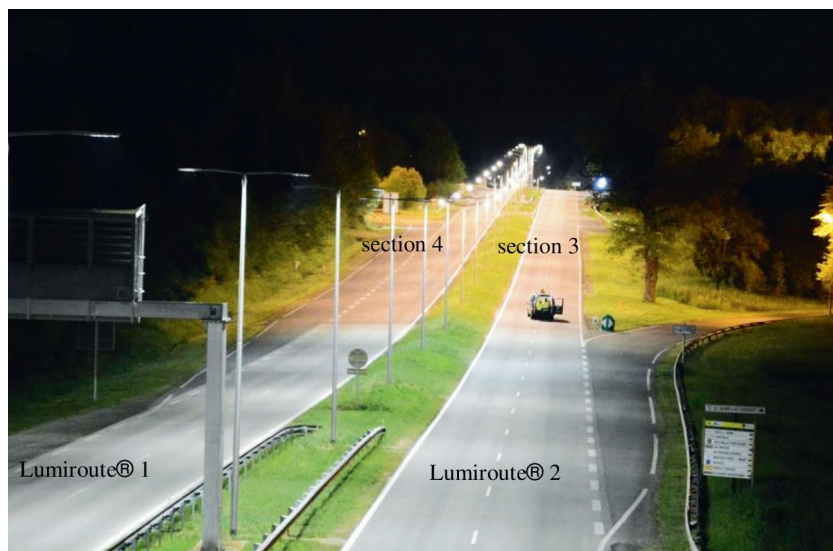


Les valeurs issues des calculs confirment les constatations visuelles :

- Sur les sections Lumiroute, les flux lumineux sont mieux maîtrisés, ce qui se traduit sur la **photo 4** par une limitation de la lumière émise au-delà de l'emprise de la chaussée.
- Sur les sections 3 et 4 témoins, la déperdition latérale est plus forte au-delà de la chaussée.

-Photo 4-

Illustration de la limitation des flux perdus sur les sections Lumiroute par rapport aux sections témoins.



© LIMOGES MÉTROPOLE

- Sur la section Lumiroute 1, le comité de suivi mesure 70 % d'économie d'énergie par rapport à la section témoin traditionnelle, pour un objectif initial de 60 %.
- Sur la section Lumiroute 2, le comité de suivi évalue à plus de 60 % l'économie d'énergie réalisée par rapport à la section témoin traditionnelle, pour un objectif initial de 40 %.

Ces observations résultent à la fois :

- des propriétés des matériaux (revêtements et installations d'éclairage) et de leur évolution au cours de ces 2 ans ;
- des conditions de gestion de l'installation sur les différentes sections ;
- des possibles défaillances techniques des éléments du projet ;
- et enfin des conditions extérieures (trafic, météorologie) inhérentes à toute expérimentation en situation réelle.

Les résultats sont propres à cette configuration pour laquelle des revêtements clairs ont été associés à des lanternes innovantes, ce qui explique les très bons résultats observés. L'expérience se poursuit et un bilan complet sera réalisé après 3 ans.

Malgré ces bons résultats, le mode de dévolution séparé des marchés de voirie et d'éclairage est, à ce jour, un frein au développement du procédé Lumiroute ; pour autant, plusieurs collectivités ont compris l'intérêt de passer un marché global dans le but d'optimiser ce couple enrobé/éclairage et de réduire les consommations. C'est également dans cette optique que le groupe Revêtements et lumière de l'Idrri¹⁰ mène son action, avec pour objectif de proposer un catalogue de photométries de revêtements urbains. ■

CONCLUSION

Le premier bilan à 2 ans confirme les ambitions initiales des différents acteurs ayant participé à ce projet, porteur d'importantes économies d'énergie :

Remerciements

Les auteurs de cet article tiennent à remercier le président de Limoges Métropole, Gérard Vandenbroucke, ainsi que Gilles Bégout, vice-président chargé des Transports, des Déplacements urbains et de la Voirie, Carole Cheucle, Philippe Chausse, Guillaume Bassard, Cyril Chain, Philippe Carle, Jean-François Vargas, Fabrice Fournela, Alexandre Taron, Alain Béghin, Marc Jakubowski, Jacques Lecocq, Jean-Paul Rami, l'ADEME, Shell.

RÉFÉRENCES

1. CIE & AIPCR, *Surfaces routières et éclairage*, 1984.
2. C. Chain, F. Lopez, P. Verny, « Impact of real road photometry on public lighting installation », CIE international symposium on road surface photometric characteristics, Turin (Italie), 2008.
3. O. Dubost, « Lumiroute®, Pleine lune toutes les nuits », RGRA n° 924, janvier 2015, p. 53.
4. NF EN 13201 « Éclairage public », 2016.
5. Circulaire n° 2002-39 du 16 mai 2002 relative à l'adhérence des couches de roulement neuves et au contrôle de la macrotexture.
6. « Photométrie des chaussées et éclairage public », ER LPC, CR 45, sous la direction d'Éric Dumont, mars 2007.
7. V. Muzet, J.-L. Paumier, Y. Guillard, « Coluroute: a mobile gonio-reflectometer to characterize the road surface photometry », CIE international symposium on road surface photometric characteristics, Turin (Italie), 2008.
8. XP X 90-013 « Nuisances lumineuses extérieures : Méthodes de calcul et de contrôle », mars 2011.
9. F. Greffier, P. Charbonnier, J.-P. Tarel, V. Boucher, F. Fournela, « An automatic system for measuring road and tunnel lighting performance », Proceedings of the 28th session of the CIE, Manchester, 2015.
10. J.-L. Perrot, J.-P. Christory, M. Perret, « Démarche innovante Revêtement et Lumière », RGRA n° 871, novembre 2008, p. 57.