



Informations actuelles sur les routes en béton  
et l'infrastructure routière | Édition novembre 2016

# update 46

## **TunnelHELL – Impact des revêtements en béton dans les tunnels : accroître la sécurité tout en écono- misant de l'énergie**

---

Le recours à des revêtements en béton dans les tunnels améliore l'éclairage et la visibilité de la surface du revêtement ainsi que des parois des tunnels. Les excellentes qualités photométriques du béton permettent, en particulier si l'on y a ajouté de l'oxyde de titane éclaircissant, renforçant ainsi la luminosité du revêtement et de la paroi du tunnel, d'accroître le sentiment subjectif de sécurité et de réduire le coût énergétique de l'éclairage.

# TunnelHELL – Impact des revêtements en béton dans les tunnels : accroître la sécurité tout en économisant de l'énergie

Gerald Maier ing. dipl., Martin Peyerl ing. dipl., Stefan Krispel ing. dipl. (Smart Minerals GmbH, Vienne)

## 1 Introduction : problématique et objectifs

Tunnels et voies souterraines sont, en particulier dans les régions montagneuses, indispensables à l'infrastructure et constituent par conséquent des ouvrages importants du trafic routier. S'ils présentent des avantages tels que la réduction du temps du trajet et de la distance, les tunnels posent cependant des exigences techniques de sécurité élevées à l'organisme chargé d'en assurer la maintenance ou à l'exploitant de tunnels. Parmi ces exigences, la plus importante est un éclairage et une visibilité adaptés de la voie de circulation, que ce soit pour la sécurité des individus ou pour les coûts d'exploitation du tunnel. La luminosité et la distribution de la lumière dans les tunnels ne sont pas seulement influencées par le type ou la puissance de l'éclairage, mais aussi en grande partie par les propriétés optiques de la surface du revêtement et de la paroi du tunnel (luminosité, réflectance et degré d'encrassement). C'est pourquoi il est essentiel de sélectionner les matériaux de construction en fonction de la luminosité de leur surface et de leur réflectance.

Financé par l'Agence autrichienne de promotion de la recherche (FFG), le projet TunnelHELL s'est fixé pour objectif d'analyser l'impact de différents matériaux pour revêtement routier (asphalte, revêtement en béton, revêtement en béton éclairci) et pour paroi de tunnel (peintures présentant différents degrés d'encrassement, béton projeté gris et blanc) sur la qualité de l'éclairage et la consommation d'énergie des tunnels. Afin d'obtenir des résultats comparables, les analyses ont été menées dans des conditions constantes dans un tunnel d'essai existant, ce qui a permis d'exclure des effets provoqués par des paramètres spécifiques au tunnel comme la géométrie et le système d'éclairage sur le résultat. Les effets du choix optimal de surface ont également été représentés visuellement. Il sera dès lors possible aux concepteurs de futurs tunnels de créer un éclairage amélioré dans les tunnels et les voies souterraines, contribuant ainsi à renforcer le sentiment subjectif de sécurité des usagers.

## 2 Réalisation du projet

Pour simuler différents états d'encrassement des parois de tunnel, les facteurs de luminance ont été mesurés dans divers tunnels ouverts à la circulation. Pour cela, trois ouvrages encrassés d'époque différente ont été sélectionnés, et les qualités photométriques ont été relevées avant et après le lessivage du tunnel. Le relevé a eu lieu à 5 emplacements représentatifs en procédant respectivement à 10 mesures distinctes. L'illustration 1 montre bien le relevé, au moyen d'un spectrophotomètre, des facteurs de luminance sur une surface de tunnel encrassée.

Le calcul des propriétés de luminosité sert ensuite de base à l'attribution de facteurs de luminance ou de qualités photométriques aux peintures présentant des qualités similaires en laboratoire. Il a ainsi été possible de simuler différents états d'encrassement (état à réception, encrassement léger, fort encrassement et nettoyage) en teintant dans la masse la coque intérieure du tunnel d'essai. Qui plus est, des revêtements de coque alternatifs réalisés par projection de mortiers gris et blancs ont été utilisés pour les analyses.



Illustration 1 : mesure des facteurs de luminance à 5 emplacements différents avant et après le lessivage du tunnel (source : SMG)



Illustration 2 : tunnel d'essai initial (source : VÖZFI)

### 2.1 Conditions d'essai et saisie des mesures

L'illustration 2 montre dans son état initial le tunnel d'essai d'environ 6 m de diamètre et de près de 20 m de long. Après l'avoir aménagé, on a appliqué les différents systèmes de surface sur la paroi intérieure.

L'illustration 3 montre des exemples typiques de revêtement de tunnel présentant un degré d'encrassement d'une intensité différente, avec application d'un mortier projeté blanc.

Pour le revêtement, le choix s'est porté sur l'asphalte, sur un béton lavé traditionnel et sur un béton lavé très clair. Au total, la combinaison entre les revêtements routiers, les systèmes de peintures de tunnel et le degré d'encrassement (propre/sale) a généré 36 évaluations différentes.



L'évaluation de chaque état a été réalisée au moyen de trois types de lampes utilisées pour l'éclairage des ouvrages routiers : des lampes aux halogénures métalliques (lampes HQI), des lampes à vapeur de sodium (lampes NVA) et des lampes à diode électroluminescente (lampes LED). Les lampes de dimensions différentes ont été positionnées au milieu du tunnel d'essai pour être déplacées afin de les fixer précisément à la même position (verticale et horizontale). Un luminancemètre a été installé à 60 m de distance de l'éclairage et à une hauteur de 1,5 m afin de mesurer la luminance du revêtement. La première mesure d'étalement a été effectuée de nuit. Puis les autres mesures ont été prises dans le tunnel même, près des portails obscurcis à faible distance aussi de l'éclairage.

La prise en compte de la luminance de la paroi est également importante. Un certain nombre de règlements européens considèrent aujourd'hui le rapport entre la « luminance du revêtement » et la « luminance de la paroi ». Le niveau d'éclairage peut, par exemple, être réduit pour une luminance plus élevée de la paroi<sup>[1][2]</sup>. La réglementation autrichienne ne comporte aucune proposition concrète à ce sujet<sup>[3]</sup>.

Les différents types de lampes ont été contrôlés via une armoire de commande spécialement adaptée, qui a permis de réguler l'intensité lumineuse des appareils d'éclairage afin d'obtenir une luminance constante à un point défini de la surface de la chaussée. On a en outre calculé l'énergie nécessaire à niveau d'éclairage réduit dans l'armoire de commande. Le capteur de luminance utilisé (société Electric Special) permet de comparer plusieurs luminances (p. ex. de la paroi du tunnel et de la chaussée) et d'en donner une évaluation statistique. L'illustration 4 montre bien les distributions de la luminance mesurées dans les tunnels ayant une surface de paroi de qualité différente.

Grâce à la géométrie de surface exactement identique du tunnel d'essai, il est possible de comparer directement tous les résultats et de tirer des conclusions solides sur les qualités surfaciques et leur effet.

Illustration 3 : exemple de systèmes de peintures de tunnels présentant un encrassement variable (à g. et au milieu) ainsi qu'un mortier projeté blanc (à dr.) (source : VÖZFI)



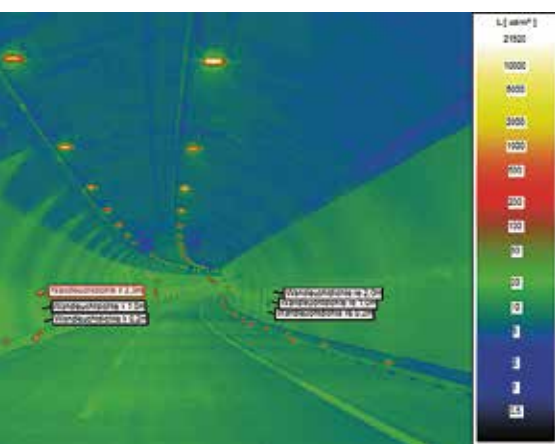
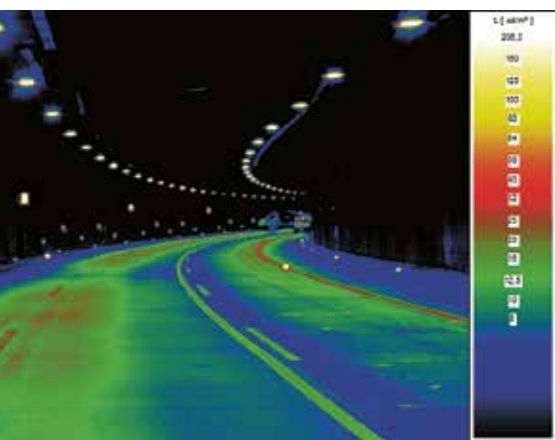


Illustration 4 : exemples d'éclairage avec des valeurs de luminance très faibles (à g.) et des valeurs élevées (à dr.) sur la paroi (source : Broll lighting systems)

Tableau 1 Valeurs caractéristiques du béton frais du revêtement mis en œuvre

Évaluation de la coque intérieure	Parois latérales	État de la surface	Voûte du tunnel
1	Peinture du tunnel	État à réception	Encrassée
2	Peinture du tunnel	État à réception	Nettoyée
3	Peinture du tunnel	Légèrement encrassée	Encrassée
4	Peinture du tunnel	Légèrement encrassée	Nettoyée
5	Peinture du tunnel	Nettoyée	Encrassée
6	Peinture du tunnel	Nettoyée	Nettoyée
7	Mortier projeté gris	État à réception	Encrassée
8	Mortier projeté gris	État à réception	Nettoyée
9	Mortier projeté blanc	État à réception	Encrassée
10	Mortier projeté blanc	État à réception	Nettoyée
11	Peinture du tunnel	Fortement encrassée	Encrassée
12	Peinture du tunnel	Fortement encrassée	Nettoyée
État d'évaluation du revêtement routier	Revêtement	État de la surface	Voûte du tunnel
1	Asphalte	État à réception <sup>1)</sup>	–
2	Béton lavé normal	État à réception	–
3	Béton lavé clair	État à réception	–

<sup>1)</sup> L'asphalte a été sablé afin de simuler un état de surface au bout d'environ un an de service (léger éclaircissement des granulats de la surface par abrasion du bitume).



a



b



c



d



e



f



Illustration 5 : mise en œuvre de la surface en béton pour le tunnel d'essai

- a. Préparation du coffrage auxiliaire (3,2 × 23,4 m)
- b. Mise en œuvre du béton lavé normal (MV101 – béton supérieur F52 GK8 CEMII/B-S 32,5R (DZ) sans oxyde de titane)
- c. Mise en œuvre du béton lavé clair (MV102 – béton supérieur F52 GK8 CEMII/B-S 32,5R (DZ) avec oxyde de titane) et application de l'agent de cure
- d. Découpage des dalles en béton aux dimensions des palettes (1,2 × 0,8 m)
- e. Stockage des dalles
- f. Surface en béton lavé achevée (source : SMG)

## 2.2 Mise en œuvre du revêtement en béton

La surface du revêtement en béton prévu pour le tunnel d'essai devait être interchangeable et transportable afin de pouvoir, dans le cadre de l'essai, remplacer les revêtements pour l'évaluation des différents états. La surface en béton a été mise en œuvre conformément aux exigences de la directive autrichienne RVS 08.17.02<sup>[4]</sup> sous forme de béton supérieur selon la technique du béton lavé. Outre le revêtement en béton classique (MV101), un revêtement en béton avec pigments d'oxyde de titane au pouvoir éclaircissant (MV102) a également été réalisé. Le revêtement a été fabriqué dans un coffrage auxiliaire sur dalles XPS (2 cm) de 8 cm d'épaisseur. La surface du revêtement à construire était de près de 45 m<sup>2</sup>. Puis on a procédé au brossage de la pâte de ciment et au découpage du revêtement en béton en 72 dalles de 80 × 130 cm, stockées individuellement sur des palettes (80 × 130 cm) (voir illustration 5).

Les formulations des mélanges MV101 et MV102 et les résultats du contrôle du béton frais selon la norme autrichienne ONR 23303:2010<sup>[5]</sup> figurent au tableau 2.

**Tableau 2 Valeurs caractéristiques du béton frais du revêtement mis en œuvre**

	Béton lavé traditionnel (MV 101)	Béton lavé clair (MV 102)
Teneur en ciment Lafarge Mannersdorf, CEM II/B-S 42,5 N, DZ	470 kg/m <sup>3</sup>	470 kg/m <sup>3</sup>
Teneur en air selon analyse du béton frais	12 %	8 %
Valeur eau / béton selon analyse du béton frais	0,39	0,39
Granulat rond RK 0/1 béton prêt à l'emploi Schönkirchen	500 kg/m <sup>3</sup>	500 kg/m <sup>3</sup>
Granulats KK 4/8 Alas Solosnica	1200 kg/m <sup>3</sup>	1200 kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant 1 : fabr. technique de béton Duriment LP 100	4 kg/m <sup>3</sup>	2,1 kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant 2 : fabr. technique de béton Duriment LZF	4,2 kg/m <sup>3</sup>	4,2 kg/m <sup>3</sup>
Étalement, consistance (selon analyse du béton frais)	58 cm	48 cm
Masse volumique apparente du béton frais (selon analyse du béton frais)	2119 kg/m <sup>3</sup>	2257 kg/m <sup>3</sup>
Adjonction d'oxyde de titane oui/non	Non	Oui – 3 % de la pâte de ciment = 14,1 kg/m <sup>3</sup>

### 2.3 Aménagement du tunnel d'essai

Un tunnel d'essai existant fourni par la société Junger (voir illustration 6a à 6f) a été aménagé afin de mener les essais dans des conditions constantes : asphaltage du sol et fermeture étanche à la lumière des portails du tunnel par élévation de cloisons ou fermeture par coffrage en bois ainsi qu'une peinture noire.

En fonction de l'état d'évaluation, l'un des deux revêtements en béton a été posé ou la surface d'asphalte laissée telle quelle, l'éclairage mis à disposition par l'entreprise Broll installé et équipé de la commande requise, tout cela, pour les mesures. La société Electric Special a, quant à elle, effectué le montage de deux capteurs permettant de calculer la luminance sur la paroi de la coque intérieure du tunnel et sur la surface du revêtement. L'armoire de commande et la technique de régulation ont été testées avec les 3 types de lampes (LED, NAV, HQI) dans le cadre de l'essai de fonctionnement. L'installation a été réalisée de manière à obtenir en principe une luminance de  $10 \text{ cd/m}^2$  sur la surface du revêtement pour les trois types de lampes.

L'illustration 7 représente le déroulement des opérations de préparation pour les mesures des combinaisons de peinture de la voûte, de la paroi du tunnel et de la surface du revêtement.

Illustration 6 : tunnel d'essai

- a. État initial du tunnel d'essai de la société Junger
- b. Vue extérieure du tunnel d'essai aménagé pour le projet de recherche avec portail fermé et entreposage du revêtement en béton devant le tunnel
- c. Tunnel d'essai aménagé avec portail noir et revêtement en béton
- d. Tunnel d'essai avec revêtement en asphalte, peinture à réception et voûte peinte « encrassée »
- e/f. Mesure de l'éclairage par l'organisme d'essai, de contrôle et de certification de la ville de Vienne MA 39 (source : SMG)



a



c



e



b



d



f





a



b



c



d

Illustration 7 : mise en place des états d'évaluation dans le tunnel d'essai aménagé

- a. Pose du revêtement en béton
- b. Pose des dalles de bordure
- c. Installation des lampes
- d. Peinture de la coque intérieure du tunnel avec peinture de la voûte (source : SMG)



a



b



c



d

## 2.4 Prise des mesures

Les différents états d'évaluation (voir tableau 1) ont été analysés dans le cadre des mesures. La première étape de travail a consisté à mettre en place les surfaces respectives sur les parois du tunnel en appliquant peintures et matériaux. Puis la surface du revêtement routier et la voûte du tunnel ont été adaptées à l'état d'évaluation à mesurer. L'illustration 8 présente le déroulement du travail. Après avoir achevé la mise en place d'un état d'évaluation selon le tableau 1, les techniciens ont installé un des types d'éclairage analysés.

La prise de mesures même a été effectuée dans le tunnel étanche à la lumière. Les lampes ont été réglées afin d'obtenir une luminance de  $10 \text{ cd/m}^2$  à la surface du revêtement. La luminance de la paroi de la coque a également été mesurée. Après avoir constaté un fonctionnement constant, la mesure a été close et la lampe changée à chaque essai.

Illustration 8 : phases de travail dans le tunnel d'essai à Irdning

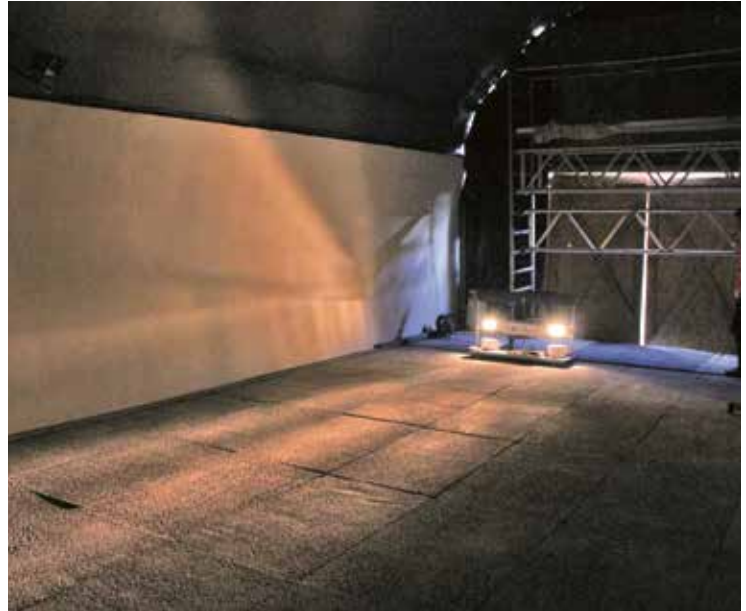
- a. Tunnel préparé pour une mesure
- b. Lampe NAV
- c. Armoire de commande pour le contrôle de l'éclairage
- d. Dispositif de mesure (source : SMG)



a

Illustration 9 : mesure de l'analyse de la visibilité d'objets dans le tunnel grâce à différentes surfaces

- a. Voiture factice
  - b. Prise de vues dans le tunnel obscurci
- (source : SMG)



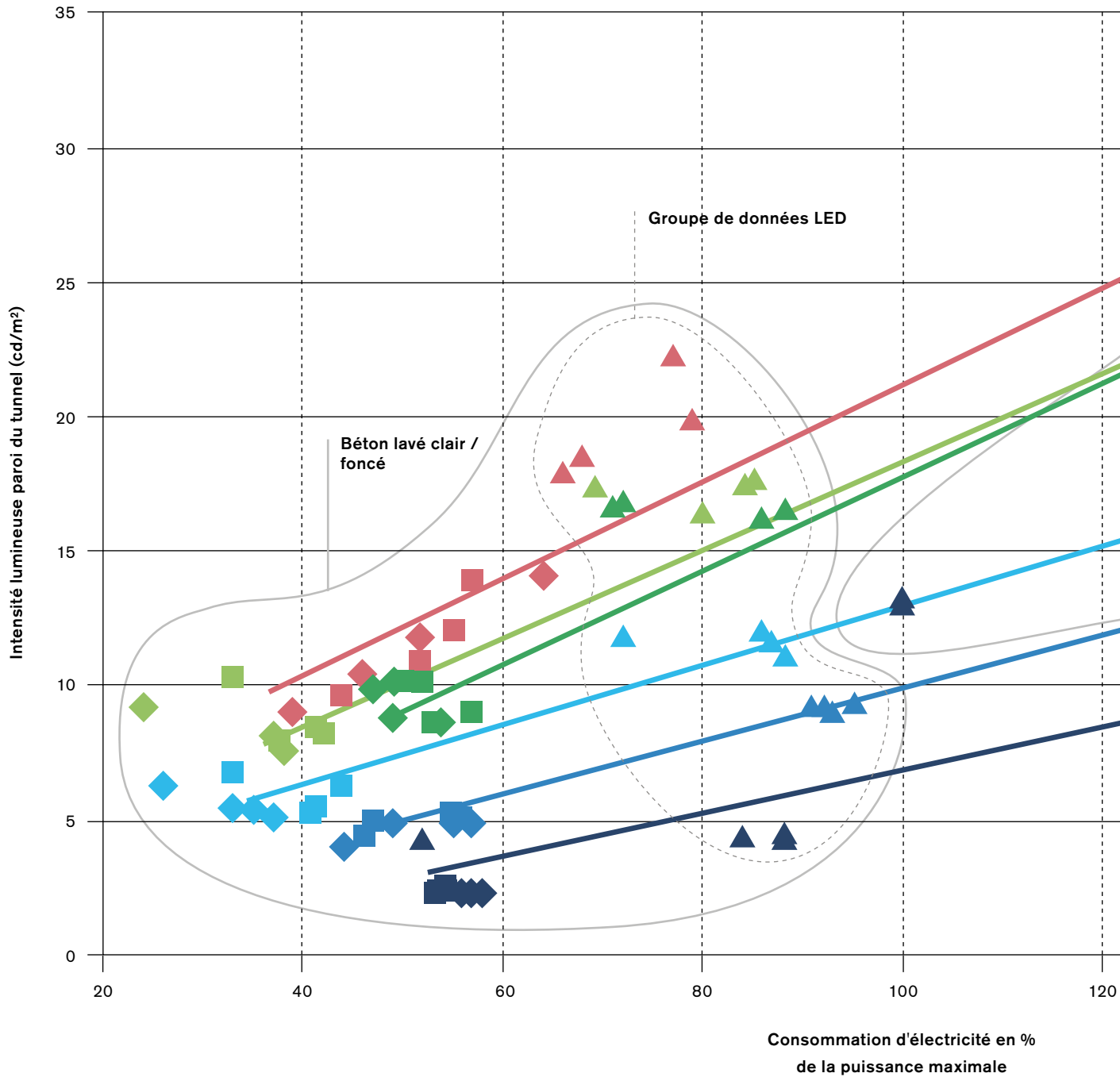
b

En plus de la quantification technique de la luminosité, la modification des conditions d'éclairage et de visibilité dans le tunnel a été documentée par des photos pour les combinaisons sélectionnées de peintures, de paroi et de type d'éclairage. Une voiture factice a été placée au même emplacement dans le tunnel pour la détection visuelle. Le dimensionnement (distance des feux) de la voiture factice a été adapté aux dimensions réduites du tunnel. Pour pouvoir établir des comparaisons, les prises de vues ont eu lieu à obturateur constant (4,5), zoom constant (18 mm) et réglage ISO défini (3200). À chaque fois, des photos différentes, avec ou sans sujets, sur le revêtement ont été réalisées pour des réglages de lumière enregistrés. L'illustration 9 montre la voiture factice utilisée ainsi que les prises de vues dans le tunnel obscurci.

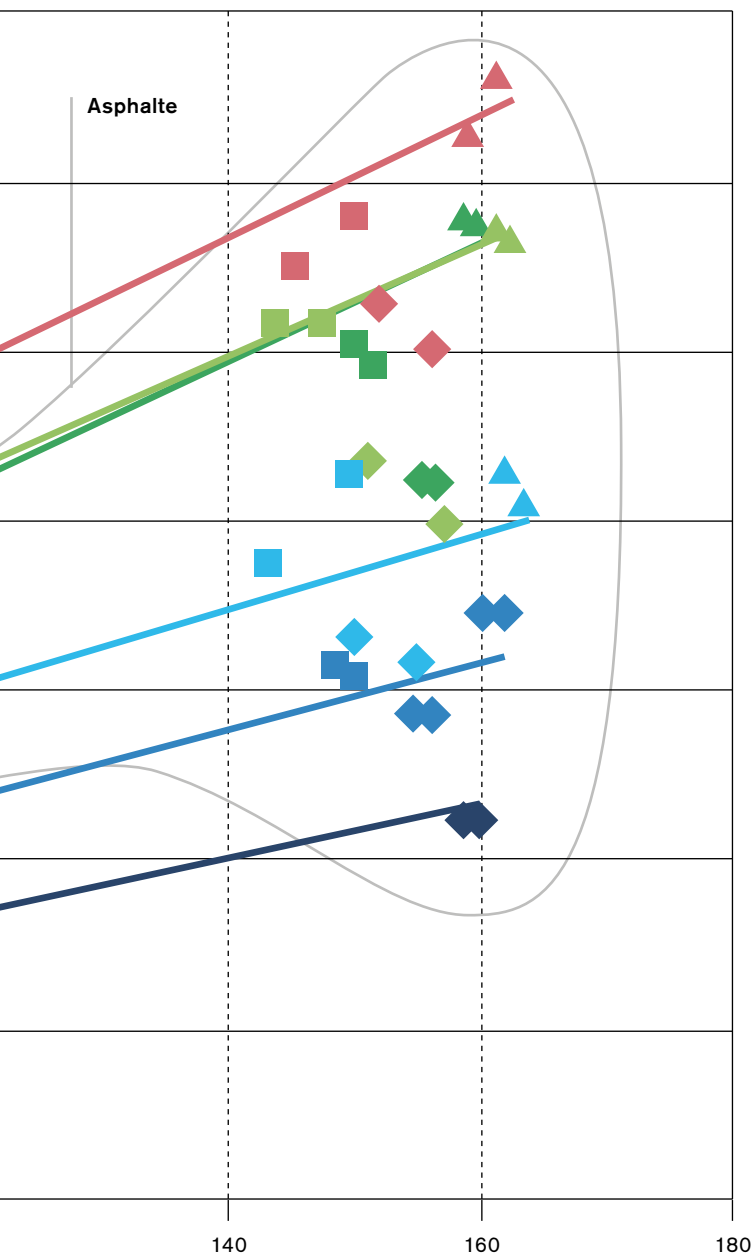
### 3 Résultats

Dans le cadre du projet de recherche, 36 états d'évaluation ont été mis en place et analysés dans le tunnel d'essai. Les résultats des mesures et les évaluations associées sont présentés sous forme de diagrammes. Les puissances des trois types de lampes HQI, NAV et LED sont comparables à 100, 100 et 105 W. Nous avons dû extrapoler les données de puissance des lampes pour le revêtement d'asphalte, car aucune d'elles n'atteignait l'intensité lumineuse du revêtement nécessaire à la comparaison de 10 cd/m<sup>2</sup>, même à 100 % de leur puissance.

L'illustration 10 montre la luminance de la paroi du tunnel en fonction de la puissance des lampes pour une luminance de 10 cd/m<sup>2</sup> à la surface du revêtement. Les points de données sont fournis approximativement par des fonctions linéaires. Les différents systèmes de peinture peuvent être ainsi classés d'après leur intensité lumineuse, indépendamment de la surface du revêtement et du système d'éclairage.



- |  |  |
|--|--|
| <span style="color: red;">—</span> Mortier projeté blanc                       | <span style="color: green;">◆</span> HQI Peinture du tunnel à réception            |
| <span style="color: lightgreen;">—</span> Peinture du tunnel nettoyée          | <span style="color: blue;">◆</span> HQI Peinture du tunnel légèrement encrassée    |
| <span style="color: green;">—</span> Peinture du tunnel à réception            | <span style="color: darkblue;">◆</span> HQI Peinture du tunnel fortement encrassée |
| <span style="color: cyan;">—</span> Béton projeté gris                         | <span style="color: lightgreen;">◆</span> HQI Peinture du tunnel nettoyée          |
| <span style="color: blue;">—</span> Peinture du tunnel légèrement encrassée    | <span style="color: cyan;">◆</span> HQI Béton projeté gris                         |
| <span style="color: darkblue;">—</span> Peinture du tunnel fortement encrassée | <span style="color: red;">◆</span> HQI Peinture du tunnel mortier projeté blanc    |



- |  |  |
|--|--|
| ■ NAV Peinture du tunnel à réception           | ▲ LED Peinture du tunnel à réception           |
| ■ NAV Peinture du tunnel légèrement encrassée  | ▲ LED Peinture du tunnel légèrement encrassée  |
| ■ NAV Peinture du tunnel fortement encrassée   | ▲ LED Peinture du tunnel fortement encrassée   |
| ■ NAV Peinture du tunnel nettoyée              | ▲ LED Peinture du tunnel nettoyée              |
| ■ NAV Béton projeté gris                       | ▲ LED Béton projeté gris                       |
| ■ NAV Peinture du tunnel mortier projeté blanc | ▲ LED Peinture du tunnel mortier projeté blanc |

Illustration 10 : vue d'ensemble des valeurs mesurées, teinture dans la masse après revêtement de la paroi du tunnel. Le béton projeté blanc émet les intensités lumineuses les plus élevées sur la paroi du tunnel.

### 3.1 Impact du revêtement

Les valeurs mesurées peuvent être tout d'abord réparties en deux groupes. Les valeurs « Revêtement d'asphalte » constituent le groupe de données affichant la plus forte consommation d'électricité extrapolée, entre 140 et 165 % de la puissance maximale. Les puissances élevées des lampes aboutissent forcément à des intensités relativement élevées sur la paroi du tunnel.

Le second nuage de données contient les valeurs mesurées des surfaces « Béton lavé traditionnel » et « Béton lavé clair ». Ici, l'affectation claire des points de données n'a pas permis d'établir une distinction générale entre les deux surfaces de revêtement. Par exemple, les 4 points de données « LED, peinture du tunnel légèrement encrassée » sont plus ou moins alignés et ne révèlent que de légers écarts de consommation d'électricité. De manière générale, les lampes LED peuvent cependant être circonscrites dans ce nuage de données (voir illustration 10, ligne en pointillé). Elles fournissent les luminances les plus élevées sur la paroi du tunnel pour des consommations globalement moyennes.

### 3.2 Impact de la paroi du tunnel

Conformément aux attentes, le mortier projeté blanc obtient les meilleurs résultats. Indépendamment du revêtement et du type de lampe, il émet les intensités lumineuses les plus élevées sur la paroi du tunnel. En comparant le mortier projeté blanc sous un éclairage NAV et un éclairage HQI avec les autres types de peinture, on constate qu'il a certes les meilleures performances, mais que son intensité lumineuse est comparable à celle de la peinture « à réception » et « nettoyée ». Les différences sont, en l'occurrence, très minimes.

Les peintures « à réception » et « nettoyée » montrent, à l'illustration 10, des tracés tout à fait semblables. Le béton projeté gris fournit de meilleurs résultats que la peinture légèrement ou fortement encrassée. Celle-ci affiche les valeurs les plus faibles avec 2,5–10 cd/m<sup>2</sup> et 5–15 cd/m<sup>2</sup>.

En règle générale, l'impact d'une peinture de paroi nettoyée ou neuve sur la consommation électrique nécessaire à l'éclairage et à la visibilité d'une surface du revêtement de 10 cd/m<sup>2</sup> est faible. L'analyse du groupe de données avec les types de lampes HQI et NAV dans la zone inférieure gauche du diagramme de l'illustration 10 le montre clairement. Les états d'évaluation à éclairage NAV et HQI affichent tous des consommations d'électricité similaires dans une plage allant de 40 % à 60 % de la puissance maximale.

On observe toutefois que le lavage de tunnel apporte un avantage net en accroissant la sécurité du trafic. La luminosité de la paroi du tunnel passe, par exemple, de 2,5 cd/m<sup>2</sup> (« fortement encrassée ») à 8–10 cd/m<sup>2</sup> (« nettoyée »), soit une densité d'éclairage de la paroi du tunnel multipliée par trois.

#### Peinture de tunnel à réception – voûte nettoyée

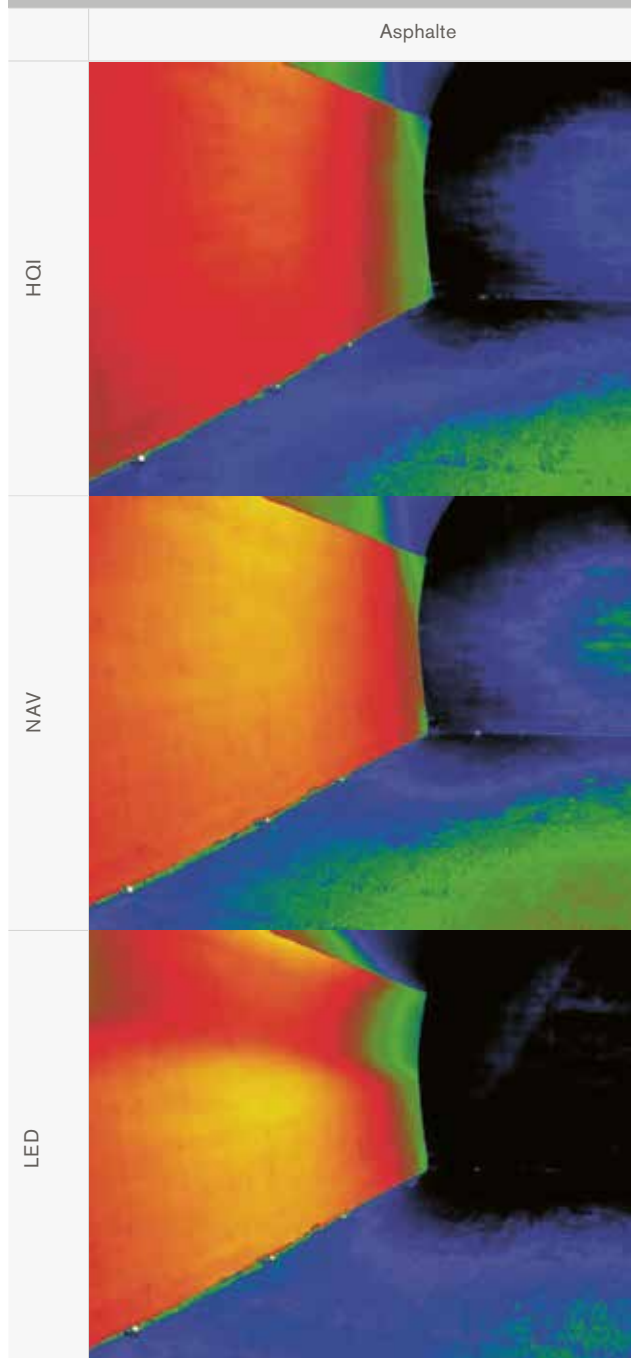
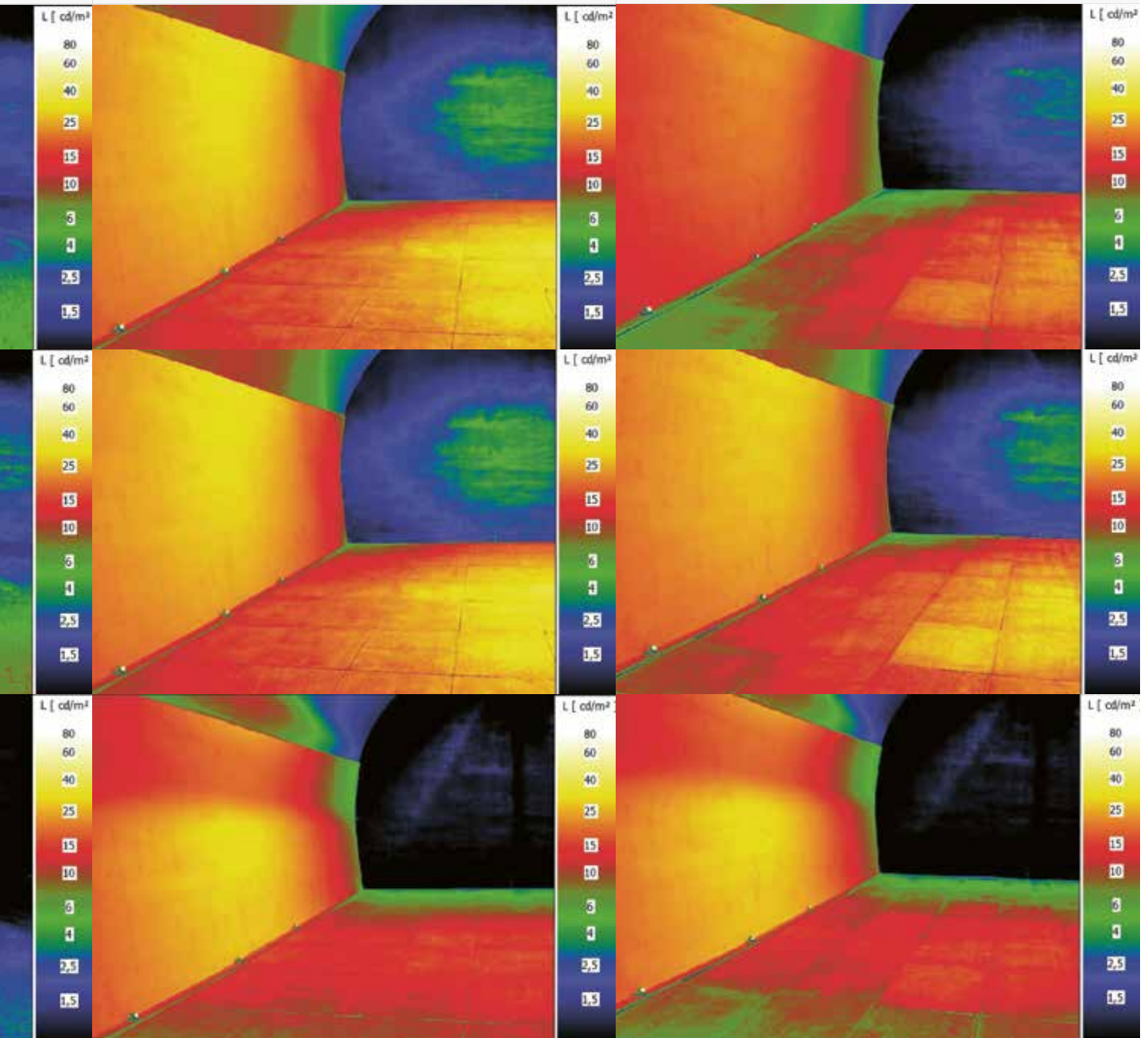


Illustration 11 : images de luminance du tunnel d'essai pour l'asphalte, le béton lavé normal et le béton lavé clair et pour une voûte nettoyée. Peinture du tunnel : paroi à réception (ill. MA 39)

Béton clair

Béton traditionnel



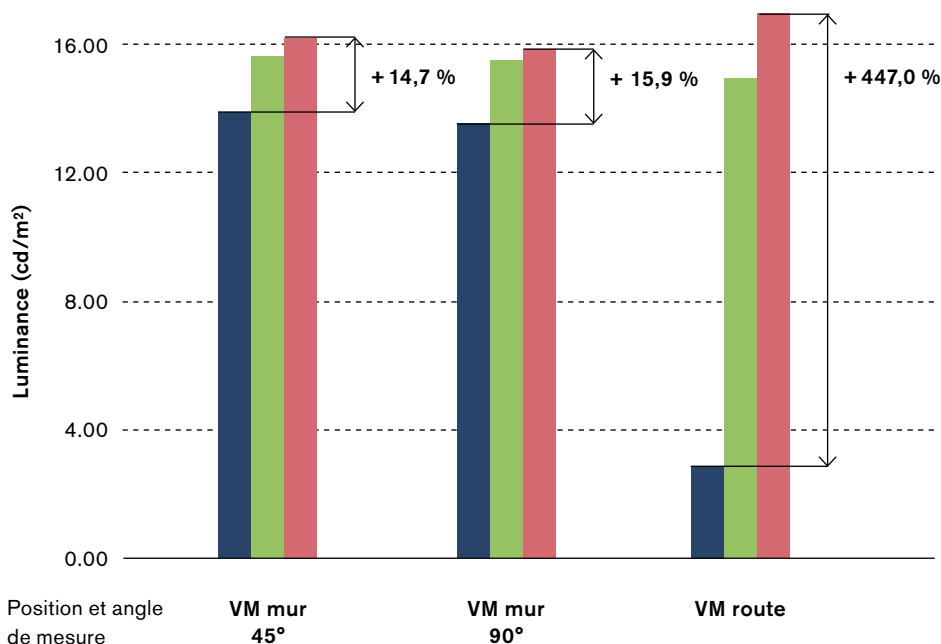


Illustration 12 : luminance de la paroi du tunnel dans le cas de différents revêtements et angles de mesure. L'illustration expose les valeurs moyennes de l'état d'évaluation « Voûte encrassée » et « Voûte nettoyée » et des types de lampes NAV, HQI et LED.

■ Asphalt  
 ■ Béton lavé traditionnel  
 ■ Béton lavé clair

### 3.3 Résultat de la mesure de la luminance par le MA 39

L'organisme d'essai, de contrôle et de certification de la ville de Vienne (département municipal MA 39) a été chargé de réaliser une évaluation technique de la luminance et des données de couleur des surfaces de tunnel pour différents états d'évaluation et une performance de lampe de 100 %. La mesure de ces critères a été réalisée en s'appuyant sur la norme autrichienne ÖNORM EN 13201-4:2005 « Straßenbeleuchtung – Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen<sup>[6]</sup> » (méthodes de mesure de performances photométriques de l'éclairage public) au moyen d'un luminancemètre à résolution spatiale d'une hauteur de mesure de 1,5 m. Un photomètre avec tête de mesure d'éclairage a été utilisé pour ces mesures.

L'illustration 11 ci-dessous présente un extrait des images de luminance établies par le MA 39 pour la peinture de tunnel « Réception ». Les images de luminance montrent clairement la différence entre le revêtement en asphalt (bleu) et le revêtement en béton.

L'illustration 12 expose les valeurs moyennes de luminance (valeur moyenne des types de lampes HQI, NAV, LED) sur toutes les surfaces examinées. Les intensités lumineuses sont plus de cinq fois supérieures dans le cas des revêtements en béton (béton lavé clair : 16,9cd/m², béton lavé normal : 15,0cd/m² et asphalt : 2,9 cd/m²).

L'illustration 13 présente les résultats de mesure de luminance du MA 39 sous forme d'histogramme pour la « Paroi de tunnel à réception ». Afin de permettre une meilleure comparaison, seuls les états de voûtes nettoyées ont été représentés.



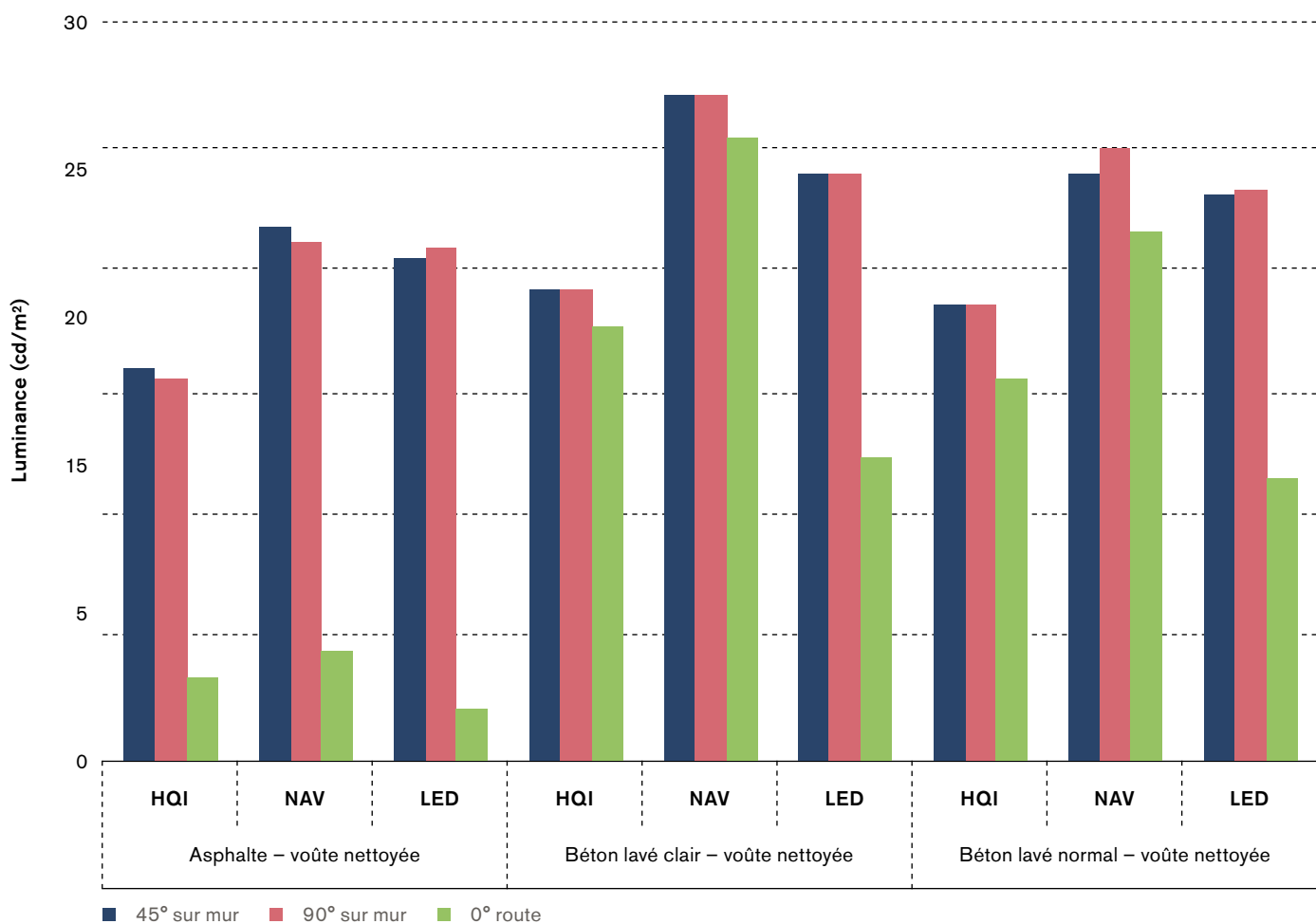


Illustration 13 : luminances de la paroi du tunnel (angle de vue de 45° et 90°) et à la surface du revêtement pour la « Peinture de tunnel à réception », différents revêtements et appareils d'éclairage

Tableau 3 : luminances selon la surface du revêtement

Revêtement	HQI	NAV	LED
Asphalte (cd/m²)	2,6 (HQI)	3,6 (NAV)	1,5 (LED)
Béton lavé clair (cd/m²)	17,7 (HQI)	25,4 (NAV)	12,4 (LED)
Béton lavé normal (cd/m²)	15,5 (HQI)	21,6 (NAV)	11,4 (LED)

Les luminances des parois du tunnel sont nettement accrues en cas de revêtements en béton, les meilleurs résultats étant obtenus par le revêtement en béton clair. Les luminances augmentent en moyenne de 21 % lorsque l'on passe de l'« asphalte » au « béton lavé clair » et de 15 % lorsqu'on passe au béton lavé traditionnel. La différence est, en ce qui concerne la luminance de la surface du revêtement, encore plus nette (voir tableau 3).



a



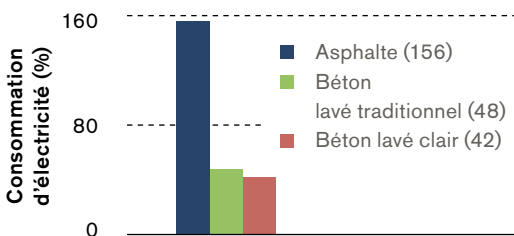
b



c

Illustration 14 : visibilité des surfaces de revêtement dans des situations comparables (paroi légèrement encrassée, plafond nettoyé)

- a. béton traditionnel
- b. béton clair
- c. asphalte



Valeur moyenne de la consommation d'électricité (%) HQI en présence d'une voûte sombre, différents revêtements

Illustration 15 : valeur moyenne de la puissance d'une lampe HQI en watts pour une intensité lumineuse de 10 cd/m<sup>2</sup> pour les surfaces de revêtement contrôlées (valeurs moyennes de toutes les peintures de la paroi)

### 3.4 Visibilité des surfaces de revêtement : présentation de l'accroissement de la sécurité du trafic

En 1987 déjà, McIntosh<sup>[7]</sup> évoquait les effets positifs, en termes de réflectance, des revêtements en béton comparés à ceux en asphalte et de l'amélioration de la luminosité et la visibilité des objets dans le trafic routier. Afin d'illustrer l'accroissement de la sécurité du trafic, des essais ont été, dans le cadre du présent projet de recherche, menés dans le tunnel d'essai à des conditions comparables et des prises de vue photographiques réalisées.

Les analyses ont été effectuées dans le tunnel obscurci avec la voiture factice, feux de route et de croisement éclairés, en utilisant les mêmes paramètres de caméra. L'illustration 14 présentent des prises de vue comparables des conditions de visibilité, sans éclairage.

De manière générale, les revêtements en béton sont plus clairs et mieux éclairés par les feux de croisement. Les différences entre le béton lavé clair et le béton lavé traditionnel peuvent être détectées à la couleur un peu plus sombre et plus douce du cône lumineux de l'illustration 14a, comparé au cône plus blanc de l'illustration 14b. La luminosité plus élevée et la réflectance améliorée du béton permettent d'identifier sensiblement plus tôt et beaucoup mieux les objets comme, par exemple, un piéton. Le revêtement d'asphalte à l'illustration 14c n'est que faiblement éclairé par les feux de croisement : le conducteur n'identifiera les objets sur le revêtement qu'avec retard et aura plus de difficulté à le faire.

On déduira des résultats similaires avec des feux de route. Le béton réfléchit un pourcentage plus élevé de la lumière et garantit une meilleure visibilité de la voie de circulation. Ces différences sont toutefois moins importantes qu'avec des feux de croisement. Les feux de route ont en effet un réglage plus haut et plus centré, si bien que l'apport de lumière sur le revêtement est plus faible et a une réflexion réduite.

### 3.5 Estimation des coûts d'éclairage

La représentation des coûts d'éclairage est basée sur la consommation d'électricité par rapport à la puissance maximale. L'illustration 15 montre la moyenne de la consommation effective d'électricité, en pourcentage de la puissance maximale, d'une lampe HQI pour une intensité lumineuse de 10 cd/m<sup>2</sup> des différents revêtements sur toutes les peintures de la paroi. Pour l'asphalte, on a utilisé les valeurs de puissance extrapolées de l'illustration 10 et on les a comparées à la valeur moyenne des revêtements en béton « Béton lavé clair » et « Béton lavé sombre ».

Le fait marquant est la puissance élevée requise de la lampe pour atteindre une luminance de 10 cd/m<sup>2</sup> dans le cas d'un revêtement d'asphalte, soit en partie 4 fois la consommation d'électricité par rapport à un revêtement en béton. Cette différence notable tient au fait que les données proviennent de mesures prises avec une seule lampe. La caractéristique de la surface en asphalte est que, même à 100 % de leur puissance, les lampes n'atteignent pas les intensités lumineuses requises des revêtements (10 cd/m<sup>2</sup>). Ces puissances ont été ajustées par extrapolation linéaire afin de rétablir la possibilité de comparaison.

L'impact de la peinture de la paroi du tunnel sur l'intensité lumineuse du revêtement et, partant, sur la consommation d'électricité est insignifiant et n'est pas représenté.

#### 4 Synthèse

Dans le cadre du présent projet de recherche, un grand nombre de situations d'éclairage différentes ont été simulées et évaluées à l'intérieur d'un tunnel d'essai soumis à des conditions constantes.

On peut estimer que l'impact positif d'un revêtement en béton sur les qualités d'éclairage d'un tunnel est significatif. Afin d'assurer la luminance requise, les revêtements en béton nécessitent, indépendamment du type de lampe, des puissances d'éclairage nettement inférieures. La puissance d'une lampe peut théoriquement être réduite de deux tiers par rapport aux revêtements d'asphalte. L'impact sur la puissance requise des lampes des différences entre le béton de la couche de roulement traditionnel et celui enrichi d'oxyde de titane est négligeable. De manière générale, l'identification des objets, un piéton par exemple, est nettement anticipée et améliorée par la luminosité accrue et la meilleure réflectance du béton. Celui-ci réfléchit un pourcentage élevé de la lumière et assure une meilleure visibilité indirecte de la voie. Les différences entre le « béton lavé clair » et le « béton lavé sombre » sont difficiles à détecter sur les photos comparatives avec simulation de feux de voiture et piéton. Les images de luminance établies par le MA 39 aident à visualiser les différences de luminance des revêtements et des parois de tunnel et à confirmer cette impression subjective. Même les intensités lumineuses mesurées étayaient ce constat : pour un même éclairage, les luminances sont plus élevées d'environ 450 % dans le cas des revêtements en béton.

#### Bibliographie

- [1] DIN 67 524 : Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen – Teil 1: Allgemeine Gütermerkmale und Richtwerte, juillet 2008
- [2] DIN 67 524 : Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen – Teil 2: Berechnung und Messung, juin 2011
- [3] RVS 09.02.41 : Tunnel. Tunnelausrüstung. Lichttechnik. Beleuchtung. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Vienne, février 2014 (directive autrichienne)
- [4] RVS 08.17.02 : Technische Vertragsbedingungen. Betondecken. Deckenherstellung. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Vienne, 2011 (directive autrichienne)
- [5] ONR 23303: Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe. Austrian Standards Institute, Vienne, 2010
- [6] ÖNORM EN 13201-4 : „Straßenbeleuchtung. Teil 4: Methoden zur Messung der Gütermerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen“, Austria Standards Institute, Vienne, 2005
- [7] McIntosh, B. : Do Concrete Streets really reflect up? Concrete International, juillet 1987

## Groupement d'intérêts des routes en béton

cemsuisse  
Association suisse de l'industrie  
du ciment  
Marktgasse 53  
3011 Berne  
Téléphone 031 327 97 97  
info@cemsuisse.ch  
www.cemsuisse.ch

Ebicon AG  
Breitloostrasse 7  
8154 Oberglatt  
Téléphone 043 411 28 20  
info@ebicon.ch  
www.ebicon.ch

Grisoni-Zaugg SA  
ZI Planchy  
Case postale 2162  
1630 Bulle 2  
Téléphone 026 913 12 55  
info@grisoni-zaugg.ch  
www.groupe-grisoni.ch

Holcim (Schweiz) AG  
Hagenholzstrasse 83  
8050 Zurich  
Téléphone 058 850 68 68  
betonstrassen@holcim.com  
www.holcim.ch

Holcim (Suisse) SA  
1312 Eclépens  
Téléphone 058 850 92 14  
chasseebeton@holcim.com  
www.holcim.ch

Implenia Schweiz AG  
Binzmühlestrasse 11, 8050 Zurich  
Téléphone 058 474 75 00  
daniel.hardegger@implenia.com  
www.implenia.com

Jura-Cement-Fabriken AG  
Talstrasse 13  
5103 Wildegg  
Téléphone 062 887 76 66  
info@juracement.ch  
www.juracement.ch

Juracime SA  
Fabrique de ciment  
2087 Cornaux  
Téléphone 032 758 02 02  
info@juracime.ch  
www.juracement.ch

KIBAG Bauleistungen AG  
Strassen- und Tiefbau  
Müllheimerstrasse 4  
8554 Müllheim-Wigoltingen  
Téléphone 052 762 61 11  
p.althaus@kibag.ch  
www.kibag.ch

Müller Engineering GmbH  
Beratung und Expertisen  
für Verkehrsflächen in Beton  
Kirchstrasse 25  
8564 Wäldi/TG  
Téléphone 079 247 82 49  
gm@müller-engineering.ch  
www.müller-engineering.ch

Sika Schweiz AG  
Tüffenwies 16, 8048 Zurich  
Téléphone 058 436 40 40  
hirschi.thomas@ch.sika.com  
www.sika.ch

Specogna Bau AG  
Steinackerstrasse 55, 8302 Kloten  
Téléphone 044 800 10 60  
info@specogna-bau.ch  
www.specogna-bau.ch

Synaxis AG Zürich  
Thurgauerstrasse 56, 8050 Zurich  
Téléphone 044 316 67 86  
c.bianchi@synaxis.ch  
www.synaxis.ch

Toggenburger AG  
Schlossackerstrasse 20  
Postfach 3019, 8404 Winterthur  
Téléphone 052 244 13 03  
info@toggenburger.ch  
www.toggenburger.ch

Ciments Vigier SA  
Zone industrielle Rondchâtel, 2603 Péry  
Téléphone 032 485 03 00  
info@vigier-ciment.ch  
www.vigier-ciment.ch

Walo Bertschinger Zürich AG  
Postfach 1155, 8021 Zurich  
Téléphone 044 745 23 11  
kurt.glanzmann@walo.ch  
www.walo.ch

**BETONSUISSE**



BETONSUISSE Marketing AG  
Marktgasse 53, CH-3011 Bern  
Téléphone +41 (0)31 327 97 87, fax +41 (0)31 327 97 70  
info@betonsuisse.ch, www.betonsuisse.ch

InformationsZentrum Beton GmbH  
Steinhof 39, D-40699 Erkrath  
Téléphone +49 (0)211 28048-1, fax +49 (0)211 28048-320  
erkath@beton.org, www.beton.org

Verein Betonmarketing Österreich  
Anfragen für den Bereich Betonstraßen an Zement + Beton  
Handels- und Werbeges.m.b.H., Reisnerstraße 53, A-1030 Wien  
Téléphone +43 (0) 1 714 66 85-0  
zement@zement-beton.co.at, www.zement.at