

L'éclairage des tunnels par LED



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



L'éclairage des tunnels par LED

La recherche d'économies d'énergie, de réductions de coûts et des déchets suscite un intérêt croissant dans un contexte de développement durable. Dans cette perspective, l'éclairage par des diodes électroluminescentes (DEL, ou le plus souvent LED pour Light-Emitting Diode) est régulièrement abordé dans les revues spécialisées mais également grand public.

Dans les tunnels, les LED sont couramment utilisées pour la signalisation dynamique et les plots de jalonnement. Des réalisations expérimentales de l'éclairage de l'espace circulé ont également été faites ou sont projetées sur des sections d'essai dans quelques tunnels : Diano Calderina – Autostrada dei Fiori Italie, Prado-Carénage – SMTPC Marseille, Puymorens – ASF, L'Épine – AREA,...

L'objet de cette note d'information est de faire un point technique sur l'usage des LED en éclairage des tunnels routiers. Seront d'abord présentées les différentes sources utilisées en tunnel. Dans une deuxième partie, les paramètres pertinents en terme d'éclairage seront rappelés et comparés pour ce qui concerne, d'une part les sources utilisées traditionnellement en tunnel, et d'autre part les LED. En annexe est présenté le retour d'expérience du tunnel Diano Calderina sur l'Autostrada dei Fiori en Italie où des luminaires avec des LED ont été installés.

Table des matières

1. Les différentes sources utilisées en tunnel	3
1.1 Les LED	3
1.2 Les lampes à vapeur de sodium haute pression (SHP)	3
1.3 Les tubes fluorescents (fluo)	3
2. Comparaison des paramètres pertinents en éclairage de tunnel	4
2.1 Flux lumineux	4
2.2 Efficacité lumineuse	4
2.3 Indice de rendu de couleur	4
2.4 Durée de vie	4
2.5 Variation du flux lumineux	5
2.6 Fonctionnement optique et intégration dans les luminaires	5
3. Conclusion	5
3.1 Les LED aujourd'hui	5
3.2 Les LED demain	6
Annexe : Retour d'expérience du tunnel Diano Calderina Autostrada dei Fiori, Italie	7

Avertissement : les notes d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème précis, qui est nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs de la note ne saurait être engagée en raison de l'éventuelle inexactitude ou imprécision des informations données.

1 Les différentes sources utilisées en tunnel

1.1 Les LED

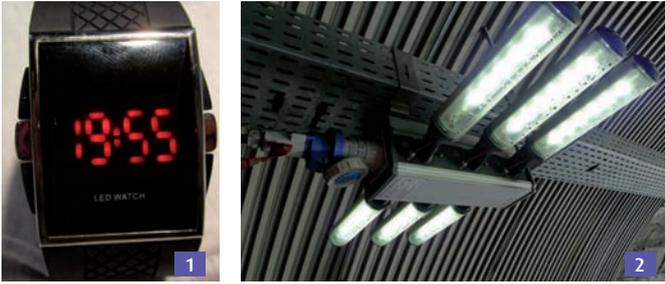


Photo 1 : les premières LED dans des applications grand public dans les années 1970

Photo 2 : détail du luminaire LED équipant le tunnel Diano Calderina sur l'autostrada dei Fiori à Impéria en Italie

Photo 3 : vue d'ensemble des luminaires LED du tunnel Diano Calderina sur l'autostrada dei Fiori à Impéria

Les LED sont des composants électroniques qui transforment de l'électricité en lumière.

Inventées en 1962, elles sont apparues dans les foyers domestiques en 1975 avec de très petites puissances et apparaissent pour la première fois en tunnel en 2008.

1.2 Les lampes à vapeur de sodium haute pression (SHP)



Photo 4 : lampes à vapeur de sodium haute pression équipant le tunnel des Monts

Photo 5 : lampe à vapeur de sodium

Les lampes à vapeur de sodium se composent d'un tube à décharge rempli de gaz dans lequel du mercure provoque une vaporisation de sodium et l'émission de photons.

Utilisées dès les années 1950 en tunnel, elles émettent une lumière caractéristique jaune orangée. Les lampes à vapeur de sodium haute pression remplacent aujourd'hui les lampes à vapeur de sodium basse pression qui émettent une lumière mono chromatique.

Elles équipent la plupart des tunnels en éclairage de renforcement et de nombreux tunnels en éclairage de section courante.

1.3 Les tubes fluorescents (fluo)



Photo 6 : tubes fluorescents équipant le tunnel du Lioran

Photo 7 : tubes fluorescents

Les tubes fluorescents se composent d'un tube à décharge rempli de gaz dans lesquels la décharge émet de la lumière dans l'ultraviolet. Celle-ci excite une couche de phosphore déposée sur la surface du tube qui transforme l'ultraviolet en lumière blanche.

Apparues dès les années 1900, les tubes fluorescents sont utilisés en tunnel en éclairage de section courante.

Les lampes à induction utilisent un principe similaire. Elles ne sont que très peu utilisées dans les tunnels français.

2 Comparaison des paramètres pertinents en éclairage de tunnel

2.1 Flux lumineux

Le flux lumineux d'une source exprimé en lumen (lm) mesure la puissance lumineuse émise par une source. Il se distingue du flux énergétique en Watt par un facteur multiplicatif appelé courbe de sensibilité de l'œil. La sensibilité maximale est obtenue pour la longueur d'onde correspondant à la couleur verte.

Le tableau ci-dessous récapitule les flux lumineux moyens des différentes sources.

Sources	Flux lumineux	Puissance	Usage
Diode seule	100 lm	LED 1,2 W	Non utilisée en tunnel
LED	5 000 lm	Lampe à 54 LED 1,2 W	Section courante
SHP	6 600 lm	Lampe 70 W	Section courante
SHP	57 000 lm	Lampe 400 W	Renforcement
Fluo	7 000 lm	Lampe 80 W T5	Section courante

Aujourd'hui, les LED ont donc un flux suffisant pour l'éclairage d'un tunnel en section courante mais pas encore pour l'utilisation en éclairage de renforcement. Cependant, le flux des LED a doublé tous les 24 mois depuis 30 ans. On peut donc espérer dans quelques années pouvoir les utiliser en éclairage de renforcement.

2.2 Efficacité lumineuse

L'efficacité lumineuse d'une source exprimée en lumen / watt mesure le rapport entre le flux lumineux rayonné par une source et la puissance électrique fournie à cette source équipée de ses accessoires (alimentation et appareillage). Elle est fournie par les fabricants de sources.

Le tableau ci-dessous récapitule les efficacités lumineuses moyennes des différentes sources.

Sources	Efficacité lumineuse moyenne
Diode seule	135 lm/W
LED blanches	70 lm/W
SHP	106 lm/W
Fluo	75 lm/W

Une diode seule affiche une efficacité très élevée dans des conditions idéales de laboratoire. La baisse de rendement entre diode seule et LED est liée à la chaleur produite par les diodes accolées dans la lampe.

Aujourd'hui les LED ont donc une efficacité lumineuse qui se rapproche de celles des sources fluo mais elles ne peuvent rivaliser avec les SHP.

2.3 Indice de rendu de couleur

L'indice de rendu des couleurs (IRC) mesure la capacité d'une source à restituer les couleurs du spectre visible sans modifier les teintes. L'indice maximum Ra = 100 correspond à une lumière blanche de même spectre que la lumière solaire.

Le tableau ci-dessous récapitule les IRC moyens des différentes sources.

Sources	IRC
LED	80
SHP	25
Sodium basse pression	< 10
Fluo	80

Les SHP et les lampes à vapeur de sodium basse pression affichent un IRC de niveau très bas caractéristique de la lumière jaune orangée émise.

Tout comme pour l'efficacité lumineuse, les LED ont un IRC comparable aux sources fluo.

Cependant, l'IRC n'a que peu d'impact dans l'éclairage des tunnels même s'il améliore le confort visuel des usagers. Des recherches physiologiques seraient nécessaires pour déterminer si un meilleur rendu des couleurs pourrait améliorer la sécurité.

2.4 Durée de vie

Le tableau ci-dessous récapitule les durées de vie moyennes des sources, c'est à dire les durées à l'issue desquelles 70 % du flux initial est encore disponible.

Sources	Durée de vie
LED annoncée par les fabricants	50 000 h
SHP constatée en tunnel	16 000 h
Fluo constatée en tunnel	24 000 h

La durée de vie des LED est très importante en comparaison de celle des SHP et fluo.

Cependant, le maintien de ces performances dépend fortement de la qualité des composants et de la température de fonctionnement. Or, la température atteinte sur les quelques millimètres carrés de leur support est très élevée. Ainsi, dans la conception d'un éclairage à LED, les critères thermiques sont cruciaux : une température excessive réduit la quantité de lumière émise, modifie la longueur d'onde et affecte la durée de vie. Par exemple, une élévation de 10°C de la température réduit de moitié la durée de vie pour les LED. La plupart des constructeurs mettent donc en place des ailettes de refroidissement sur les luminaires des LED.

D'autre part, même si les LED ont une importante durée de vie annoncée, il est nécessaire de nettoyer régulièrement les sources afin de maintenir leur performance.

2.5 Variation du flux lumineux

Il peut être intéressant pour un exploitant de tunnel de pouvoir faire varier le flux lumineux en fonction des besoins dans le tunnel.

Mais cette variation de flux n'est bien entendu possible que dans une certaine plage et elle diminue l'efficacité lumineuse.

Le tableau ci-dessous récapitule les possibilités de variation de flux suivant les sources et les efficacités lumineuses moyennes correspondantes.

Sources	Efficacité lumineuse moyenne		
	Flux lumineux nominal	Variation du flux lumineux de -80 %	Variation du flux lumineux de -95 %
LED	70 lm/W	59 lm/W	56 lm/W
SHP	106 lm/W	60 lm/W	impossible
Fluo	75 lm/W	45 lm/W	impossible

Le flux lumineux des LED peut varier jusqu'à -95 % du flux nominal alors que les autres sources décrochent en dessous de -80 %. Les LED présentent donc de réelles qualités tant en termes de variation conséquente du flux lumineux que de faible dégradation de l'efficacité lumineuse.

De plus, l'allumage et l'extinction sont instantanés et ne diminuent pas leur durée de vie.

Sur ces paramètres, les sources fluo et SHP ne peuvent pas rivaliser avec les LED.

2.6 Fonctionnement optique et intégration dans les luminaires

Pour les LED, la source de lumière est quasi ponctuelle puisque la lumière est émise dans une direction très précise. Il est ainsi possible de supprimer tout ou partie des faisceaux lumineux perdus en dehors des surfaces à éclairer et d'obtenir un gain énergétique supplémentaire par rapport aux solutions traditionnelles.

Cependant, cela nécessite de maîtriser la direction de la lumière émise et l'angle d'ouverture du faisceau.

Les constructeurs utilisent ainsi trois techniques de manière conjointe ou non : le positionnement 3D des différentes LED dans le luminaire, la maîtrise du faisceau lumineux par des lentilles et l'intégration de réflecteurs autour de chaque LED.

Ceci vise à répondre aussi au besoin photométrique d'uniformité et de non éblouissement.

Pour les luminaires SHP et fluo, le châssis assure seulement la protection physique de la source et du réflecteur.

Dans la conception des luminaires LED, il faut également assurer dans le temps l'évacuation de la chaleur générée par les LED, maintenir la connexion électrique des LED et ainsi garantir la durée de vie annoncée.

Pour toutes ces raisons, les luminaires LED sont pour la plupart aujourd'hui monoblocs. En cas de panne, il est en général nécessaire de changer le luminaire entier sans possibilité de changer seulement la source comme cela est possible pour les luminaires SHP et fluo.

Pour l'instant, des progrès restent donc à réaliser pour rattraper les quelques 40 ans d'expérience des luminaires traditionnels abritant les sources fluo et SHP.

3.1 Les LED aujourd'hui

En l'état actuel des avancées techniques, les solutions de luminaires équipés de LED sont quasi équivalentes, en termes de consommation et de la plupart des caractéristiques techniques, aux solutions avec des sources SHP ou fluo. La durée de vie annoncée est 2 à 3 fois plus importante que pour les SHP et fluo.

Cependant, les faibles puissances des luminaires LED ne permettent de les implanter que sur l'éclairage des sections courantes des tunnels.

En outre, le coût des LED de qualité est beaucoup plus élevé que celui des appareils SHP et fluo.

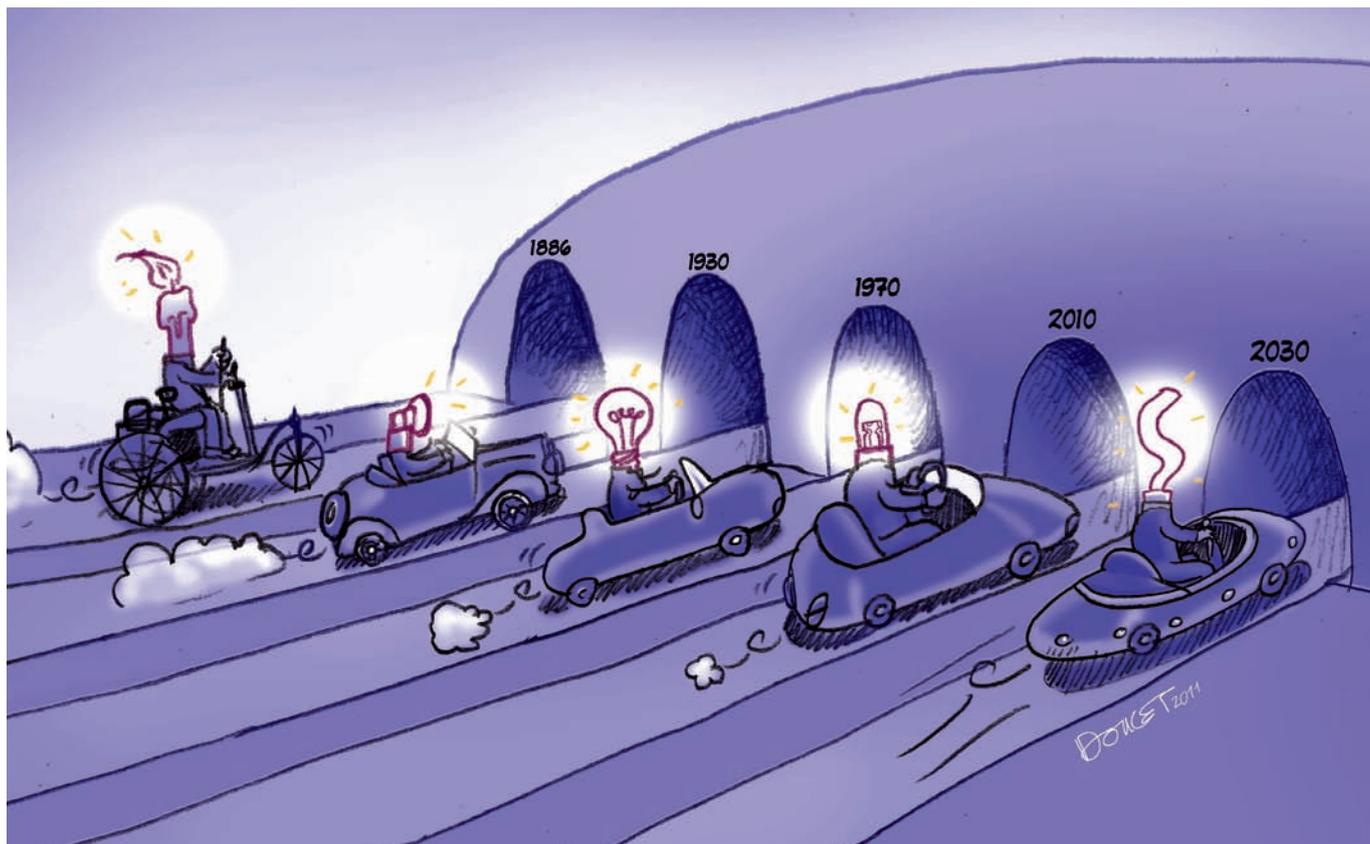
Il n'est donc pas possible de recommander aujourd'hui sans réserve les LED. Cela risquerait en outre de compromettre leur développement futur.

3.2 Les LED demain

Les progrès techniques devraient permettre d'augmenter le flux. Le travail des constructeurs améliorera sans doute les optiques des luminaires, la dissipation de la chaleur et autorisera le remplacement rapide des sources sans changer le luminaire.

Il pourrait donc être possible d'installer dans quelques années des luminaires LED en éclairage de section courante des tunnels, mais aussi en éclairage de renforcement où leurs qualités d'allumage - extinction instantanés et de variation importante du flux lumineux sans risque sur la durée de vie seraient tout à fait adaptées. Il serait ainsi possible de commander le niveau de l'éclairage de renforcement de façon continue en fonction de la luminance extérieure mesurée.

Il est donc important, en collaboration avec exploitants et constructeurs, d'observer la fiabilité et l'évolution dans le temps des caractéristiques des luminaires équipés de LED. On ne peut donc qu'encourager la réalisation de sections d'essai en tunnel.



Retour d'expérience du tunnel Diano Calderina Autostrada dei Fiori, Italie

1. Autostrada dei Fiori

L'Autostrada dei Fiori, d'une longueur de 113 km, relie Gênes à la frontière Italie / France. Sur cet itinéraire, on trouve 32 km de tunnels et 28 km de viaducs. Une campagne de rénovation des anciennes installations d'éclairage de tunnel sodium basse pression a été lancée.



Photo 8 : autostrada dei Fiori

2. Le tunnel Diano Calderina

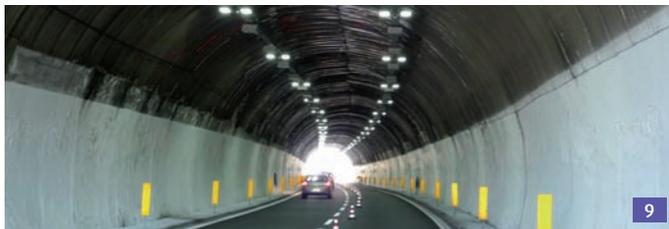


Photo 9 : tunnel Diano Calderina, tube sens Italie France équipé de LED

Construits en 1974, les 2 tubes unidirectionnels du tunnel Diano Calderina ont une longueur de 251 m chacun, 2 voies de circulation, pas de bande d'arrêt d'urgence, une pente de 4,5 % et une légère courbe.

12 000 véhicules empruntent chaque jour chaque sens dont 15 % de poids lourds avec une vitesse limitée à 130 km/h. Nous sommes dans le cas de tunnels interurbains, à trafic non faible et à vitesse élevée.

En mars 2009 l'éclairage a été rénové avec des luminaires de la société Grechi Illuminazione.



Photo 10 : luminaire LED en éclairage de section courante dans le tunnel Diano Calderina sens France Italie



Photo 11 : luminaire SHP en éclairage de section courante dans le tunnel Diano Calderina sens Italie France

Le tube « sens France Italie » a été équipé de luminaires SHP en éclairage de renforcement et d'appareils LED en section courante. Les luminaires LED de section courante sont installés tous les 10,5 m au-dessus de chacune des 2 voies de circulation.

Le tube « sens Italie France » a été équipé de luminaires SHP en éclairage de renforcement et en section courante. Les luminaires SHP de section courante sont installés tous les 21 m au-dessus de chacune des 2 voies de circulation avec une puissance installée totale légèrement supérieure à celle de l'autre tube.

La durée de vie des blocs lumineux LED (avec leurs sources) annoncée par le constructeur est de 12 ans, tandis que celles des luminaires SHP (mais bien sûr pas des sources) est supérieure à 20 ans.

Les blocs lumineux LED (avec leurs sources) ne demandent pas d'intervention électrique pendant 12 ans, mais ils doivent être nettoyés tous les 18 mois. Les luminaires SHP nécessitent un nettoyage et les sources sont remplacées tous les 18 mois.

La technologie des luminaires SHP permet de réaliser sur le terrain toutes les opérations d'entretien électrique (changement de source, fusible, ballast...) tandis que pour les blocs lumineux LED actuels, seul le remplacement complet est possible.

Les consommations ont été calculées sur la base d'un fonctionnement de 16 h par jour pour la section courante et 8 h pour le renfort.

Le tableau ci-dessous résume le calcul économique comparatif de l'éclairage de 2 tubes.

Sources section courante – section renforcement	Coût d'installation		Coût de maintenance sections courante et renforcement pour 12 ans	Puissance		Consommation pour 12 ans		Coût sections courante et renforcement pour 12 ans
	Section courante	Section renforcement		Section courante	Section renforcement	Section courante	Section renforcement	
LED - SHP	27 006 €	33 241 €	28 709 €	3,3 kW	33,7 kW	24 189 €	153 328 €	266 473 €
SHP - SHP	5 796 €	33 241 €	31 693 €	3,8 kW	33,7 kW	26 306 €	153 328 €	250 364 €
Différence	21 210 €	0	- 2 984 €			- 2 117 €	0	16 109 €

A la lecture du tableau, on peut donc conclure que le coût d'achat bien supérieur des blocs lumineux LED comparé à celui des luminaires SHP ne peut être amorti sur la durée de vie estimée des luminaires LED de 12 ans.

De plus, au bout de 12 années, les blocs lumineux LED ont atteint leur fin de vie. Pour les luminaires SHP, il suffit de changer les sources tous les 18 mois pour tenir encore 8 années de plus.

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

Centre d'études des Tunnels
25, avenue François Mitterrand
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

