

SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE EN TUNNEL ROUTIER

*Équipements d'exploitation
et de sécurité*



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème 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 du document ne saurait être engagée.

SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE EN TUNNEL ROUTIER

*Équipements d'exploitation
et de sécurité*

décembre 2023

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

69500 BRON – France

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

1 LES TUNNELS ROUTIERS DANS LE PLAN DE SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE NATIONAL	7
2 DES FONCTIONS DE SÉCURITÉ À MAINTENIR	8
2.1 Éclairage	8
2.1.1 Principes de sécurité et textes de référence	8
2.1.2 Postes de consommation	8
2.2 Ventilation	11
2.2.1 Principes de sécurité et textes de référence	11
2.2.2 Postes de consommation	11
2.3 Autres équipements	12
3 MESURES DE RÉDUCTION PAR FAMILLE D'ÉQUIPEMENTS	13
3.1 Mesures de réduction possibles pour l'éclairage	13
3.1.1 Vérification du fonctionnement correct de l'installation	13
3.1.2 Ajustement des niveaux aux valeurs minimales nécessaires	14
3.1.3 Optimisation du pilotage de l'éclairage de la section courante (hors régime de sécurité)	14
3.1.4 Ajustement des niveaux à la vitesse de référence	14
3.1.5 Optimisation de l'éclairage des issues de secours et des abris	15
3.1.6 Optimisation des opérations de maintenance	15
3.1.7 Actions sur l'environnement de l'ouvrage	15
3.1.8 Installation d'un nouveau système d'éclairage	16
3.1.9 Rénovation de l'installation d'éclairage	18
3.1.10 Exemples de valeurs de réduction de la consommation électrique de l'éclairage	18
3.2 Mesures de réduction possibles pour la ventilation	20
3.2.1 Maîtrise de la chaîne complète de contrôle-commande de la ventilation sanitaire	20
3.2.2 Ajustement du régime de fonctionnement des accélérateurs	20
3.2.3 Limitation de la congestion	21
3.2.4 Optimisation de la fréquence des essais de ventilation de désenfumage	21
3.2.5 Adaptation de la ventilation des issues de secours aux besoins réels	22
3.2.6 Optimisation du système de désenfumage pour réduire la puissance des installations de ventilation (en phase de recherche)	22
3.2.7 Exemples de valeurs de réduction de la consommation électrique de la ventilation	23
3.3 Mesures de réduction possibles pour les autres équipements	24
3.3.1 Transformateurs et onduleurs	24
3.3.2 Panneaux de signalisation	24
3.3.3 Serveurs et automates	25
4 PROPOSITION D'UNE DÉMARCHE GÉNÉRALE DE SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE EN TUNNEL	26
4.1 Évaluation de la situation initiale	26
4.2 Définition des mesures de réduction à mettre en œuvre	26
4.3 Mise en œuvre des mesures de réduction	27
4.4 Suivi et évaluation des mesures	27
4.5 Formation et sensibilisation	27
4.6 Veille technologique et innovation	27
5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	28
BIBLIOGRAPHIE	29

INDEX DES ILLUSTRATIONS ET TABLEAUX

Illustration 1 :	Tête sud du tunnel de la Grand'Mare (crédit photo : DIR Nord-Ouest)	7
Illustration 2 :	Accélérateurs et luminaires en voûte (crédit photo : CETU)	7
Illustration 3 :	Niche de sécurité (crédit photo : Laurent Mignaux / Terra)	8
Illustration 4 :	Plots de balisage lumineux orange et bleu installés sur les piédroits (crédit photo : CETU)	9
Illustration 5 :	Éclairage d'une galerie d'évacuation (crédit photo : CETU)	10
Illustration 6 :	Éclairage de la porte d'une issue de secours (crédit photo : CETU)	10
Illustration 7 :	Usine de ventilation (crédit photo : CETU)	11
Illustration 8 :	Ventilation d'une issue de secours (crédit photo : Laurent Mignaux / Terra)	12
Illustration 9 :	Équipements de transformation et de distribution de l'énergie électrique (crédit photo : Laurent Mignaux / Terra)	12
Illustration 10 :	Position du luminancemètre - Schéma de principe	13
Illustration 11 :	Luminancemètre (crédit photo : CETU)	13
Illustration 12 :	Mesures photométriques (crédit photo : CETU)	14
Illustration 13 :	Site expérimental DELTA dans le tunnel d'Antony (crédit photo : CETU)	15
Illustration 14 :	Champ de vision du conducteur situé à la distance d'arrêt de l'entrée du tunnel - Schéma de principe	16
Illustration 15 :	Renouvellement de l'éclairage de la tranchée couverte de Noailles À gauche : avant renouvellement, luminaires sodium basse pression À droite : après renouvellement, luminaires LED (crédit photo : CETU)	16
Illustration 16 :	Exemple d'économie d'énergie obtenue pour l'éclairage de renforcement grâce au remplacement de l'installation avec luminaires SHP par une installation avec luminaires LED	17
Illustration 17 :	Opacimètre (en haut), appareil de mesure du dioxyde d'azote (en bas à droite) et du monoxyde de carbone (en bas à gauche) (crédit photo : CETU)	20
Illustration 18 :	Poste de contrôle trafic et tunnels (crédit photo : Terra)	20
Illustration 19 :	Bouteille de gaz titré afin de vérifier les performances des capteurs de pollution (crédit photo : CETU)	21
Illustration 20 :	Batterie d'accélérateurs (crédit photo : Laurent Mignaux / Terra)	21
Illustration 21 :	Ventilateur (crédit photo : CETU)	22
Illustration 22 :	Trappe dans un plénum de ventilation (crédit photo : CETU)	23
Illustration 23 :	Transformateur (crédit photo : CETU)	24
Illustration 24 :	Panneau lumineux pour limitation de vitesse dans un tunnel (crédit photo : CETU)	25
Tableau 1 :	Éclairage : exemples de réduction des consommations	19
Tableau 2 :	Ventilation : exemples de réduction des consommations	23



LES TUNNELS ROUTIERS DANS LE PLAN DE SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE NATIONAL

Le plan de sobriété énergétique présenté le 2 octobre 2022 par la Première ministre fixe un objectif de réduction de 10 % de la consommation d'énergie en France entre 2019 et 2024.

Pour relever ce défi, la contribution de tous les acteurs des transports routiers, dont les exploitants de tunnels, est essentielle.

Plus précisément, pour ce qui concerne les tunnels routiers français – qui totalisent près de 400¹ kilomètres de longueur cumulée –, on peut estimer que leur consommation électrique annuelle se situe entre 75 et 374 GWh². Cette consommation équivaut à celle de la totalité des ménages d'une ville de 30 000 à 150 000 habitants, pour une année également.



Illustration 1 : Tête sud du tunnel de la Grand'Mare (crédit photo : DIR Nord-Ouest)

Cette consommation d'énergie a un fort impact environnemental, mais aussi des conséquences financières significatives pour les exploitants, encore aggravées par les augmentations récentes du prix de l'électricité.

L'éclairage et la ventilation sont les postes de consommation énergétique les plus importants (Illustrations 1 et 2). Bien que les autres équipements représentent une consommation individuelle plus faible, leur cumul peut être significatif. Par conséquent, une évaluation complète et la plus précise possible des postes de consommation par famille d'équipements est un moyen d'identifier tous les leviers d'actions pouvant mener à des économies.



Illustration 2 : Accélérateurs et luminaires en voûte (crédit photo : CETU)

Ainsi, ce document propose une liste de mesures de réduction de la consommation énergétique pour l'éclairage et la ventilation, mais aussi des pistes de réduction pour d'autres équipements dont la consommation n'est pas négligeable. L'objectif est de donner aux exploitants les moyens d'engager à court terme des actions permettant de minimiser l'impact environnemental de l'exploitation des tunnels, tout en leur faisant réaliser des économies, à niveaux de sécurité et de fonctionnalités équivalents.

Pour aller plus loin, le document propose une démarche générale à suivre pour engager à moyen ou long terme un processus complet de réduction de la consommation d'énergie d'un tunnel. Une telle démarche demande une analyse préalable permettant d'identifier les postes de consommation à enjeux afin de prioriser les actions à mettre en œuvre. Cette vision d'ensemble des postes à enjeux est indispensable afin d'anticiper autant que possible les mesures à engager pour minimiser les consommations énergétiques et ainsi conduire sur le long terme une véritable politique de sobriété énergétique.

Ce document s'adresse principalement aux exploitants de tunnels routiers, mais il peut également servir de référence aux maîtres d'ouvrage et bureaux d'études chargés de la conception de tunnels neufs ou de l'étude de grosses opérations de renouvellement des équipements.

1. Addition des longueurs de tous les tubes, soit 374 km pour les tunnels éclairés et/ou ventilés (source : base DICOS du CETU au 27/09/2023).
2. D'après le ratio au kilomètre de la consommation électrique d'une trentaine de tunnels routiers français entre 2014 et 2016 ; la fourchette est large car la consommation électrique d'un tunnel dépend de nombreux facteurs et peut varier considérablement d'un tunnel à l'autre, elle dépend notamment du type d'éclairage (LED, fluorescent...), des besoins en ventilation (trafic, pente...), du nombre de voies, etc.

DES FONCTIONS DE SÉCURITÉ À MAINTENIR

La sécurité des tunnels routiers repose sur des systèmes techniques, humains et organisationnels complexes³. Chacun des équipements de sécurité dont sont dotés les tunnels concourt à une ou plusieurs fonctions de sécurité. Ce chapitre traite

principalement de l'éclairage et de la ventilation. Ces deux familles d'équipements sont examinées en détail, en commençant par les principes de sécurité et les textes de référence qui les régissent, puis en explorant les différents postes de consommation associés.

2.1 ÉCLAIRAGE

Les tunnels routiers nécessitent un éclairage de jour comme de nuit.

Cet éclairage est conçu afin que l'automobiliste, tout au long de son parcours, soit capable de distinguer un obstacle sur la chaussée suffisamment loin devant lui, pour qu'il puisse s'arrêter en toute sécurité. Il joue un rôle important en tunnel, milieu confiné, pour prévenir au maximum les risques d'accident et de sur-accident, car leurs conséquences peuvent y être beaucoup plus graves qu'à l'air libre.

De jour, l'éclairage doit être renforcé en entrée – et parfois en sortie – afin d'assurer une transition progressive pour l'œil des conducteurs, qui passe d'un milieu à forte luminosité à un environnement plus sombre.

2.1.1 Principes de sécurité et textes de référence

L'éclairage joue un rôle pour le confort de conduite mais aussi et surtout pour la sécurité, comme l'indique la note d'information n°23 du CETU.

L'éclairage contribue en premier lieu à assurer la sécurité de conduite, en permettant au conducteur de distinguer un obstacle à la distance d'arrêt, et en évitant l'effet de trou noir en entrée de tunnel, zone où les phares des véhicules sont insuffisants pour compenser la différence de luminosité entre l'extérieur et l'intérieur.

Au-delà de la pure distinction d'un obstacle sur la chaussée à la distance d'arrêt, l'éclairage des tunnels permet à l'automobiliste d'identifier des situations anormales très variées (présence de piétons ou de cyclistes, animaux errants, véhicules en panne, accidents, etc.) et contribue ainsi à prévenir les accidents.

L'éclairage joue aussi un rôle indirect, mais essentiel, pour la surveillance, la détection et la qualification des incidents, car la majorité des systèmes vidéo requière pour être efficace un niveau d'éclairage qui doit être suffisamment élevé.

En situation courante, certains équipements d'éclairage jouent également un rôle d'information et de pédagogie auprès des automobilistes, car il souligne l'existence et la position des équipements de sécurité disponibles pour eux le jour où ils en auront besoin : niches de sécurité et issues de secours en particulier, qui disposent de leur propre éclairage pour les mettre en valeur (Illustration 3).



Illustration 3 : Niche de sécurité
(crédit photo : Laurent Mignaux / Terra)

3. Note d'information du CETU n°23 : Définition des fonctions de sécurité.

En cas d'urgence, l'éclairage facilite l'évacuation des usagers grâce à l'éclairage de sécurité, aux plots de jalonnement, et à l'éclairage des issues de secours et des cheminements d'évacuation.

Si des mesures de réduction de la consommation électrique de l'éclairage peuvent être envisagées, elles ne doivent en aucun cas ramener le niveau de sécurité pour les usagers et les intervenants en tunnel en deçà du niveau fixé par la réglementation et les règles de l'art.

Trois textes réglementaires ou normatifs fixent les dispositions de sécurité minimales que doit remplir l'installation d'éclairage. Les dispositions que l'on retrouve dans ces trois textes sont étroitement alignées et constituent un socle auquel il ne peut être dérogé.

Le premier des trois textes est l'**Instruction Technique relative à la sécurité dans les tunnels routiers du 25 août 2000** [1], qui est de niveau réglementaire. Elle traite de l'éclairage dans son article 3.3. Si l'Instruction Technique est strictement applicable aux seuls tunnels neufs du réseau routier national de plus de 300 m, elle est devenue la référence en France pour la définition du niveau de sécurité nominal de l'ensemble des tunnels routiers, niveau qui ne doit pas être dégradé dans une démarche de réduction de la consommation d'énergie.

L'Instruction Technique [1] impose en premier lieu la présence d'un éclairage de sécurité devant assurer un éclairage minimal de 10 lux en moyenne et 2 lux en tout point, même en cas de panne de l'alimentation électrique⁴.

Ce même niveau d'éclairage minimal est également requis par l'Instruction Technique en ce qui concerne les aménagements pour l'évacuation des usagers et l'accès des secours. Les abris, lorsqu'ils sont utilisés, doivent pour leur part être dotés d'un éclairage de confort de 150 lux, accompagné d'un balisage lumineux pour les accès de secours.



Illustration 4 : Plots de balisage lumineux orange et bleu installés sur les piédroits (crédit photo : CETU)

L'Instruction Technique prescrit aussi la présence, sur chaque piédroit, de plots de balisage lumineux allumés en permanence (Illustration 4), placés à 1 mètre de hauteur et espacés de 10 mètres environ. L'une de leurs fonctions est de suppléer l'éclairage de base de sécurité du tunnel dont les luminaires, positionnés en hauteur, peuvent être masqués par la fumée en cas d'incendie, ou de constituer un éclairage de sécurité proprement dit dans les tunnels à faible trafic ne disposant pas d'un éclairage de base de sécurité.

Le second texte, également de niveau réglementaire, est la Directive européenne 2004/54/CE (article 2.8), applicable aux tunnels du réseau trans-européen. Celle-ci exige qu'« un éclairage normal assure aux conducteurs une visibilité appropriée de jour comme de nuit dans la zone d'entrée ainsi qu'à l'intérieur », et reprend les notions d'éclairage de sécurité et de jalonnement que l'on trouve dans l'Instruction Technique [1]. À la différence de l'Instruction Technique, la Directive Euro-péenne n'impose toutefois pas de valeur minimale chiffrée pour les niveaux d'éclairement à atteindre.

Le troisième texte est la norme européenne NF EN 16276, applicable aux tunnels de plus de 500 m ayant un trafic moyen journalier annuel (TMJA) supérieur à 500 véhicules par jour. Cette norme n'est pas d'application obligatoire. Elle reprend elle aussi, dans son article 4.2.1, la notion d'éclairage secouru (en renvoyant pour cette fonction à l'article 7 du CEN/CR 14380:2003 ou aux normes et recommandations nationales) et, dans son article 4.3.2, la nécessité d'installer des plots de jalonnement lumineux pour les itinéraires d'évacuation.

Ainsi, toute étude de réduction de la consommation énergétique de l'éclairage ne pourra être menée qu'en respectant au moins les trois conditions suivantes, que l'on retrouve dans les trois textes précités :

- la présence d'un éclairage de sécurité assurant un niveau minimal d'éclairement sur la chaussée et les trottoirs de 10 lux en moyenne, et de 2 lux en tout point ;
- la présence de plots de balisage lumineux placés à 1 m de hauteur environ sur chaque piédroit tous les 10 m environ ;
- un éclairage assurant à l'utilisateur une visibilité adéquate, de jour comme de nuit.

En complément, plusieurs guides techniques sont disponibles pour donner des règles de dimensionnement des installations d'éclairage d'entrée et de section courante de tunnel :

- CIE, *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses*, 2004 ;
- FD CEN/CR 14380, *Éclairage des tunnels*, 2003 ;
- CETU, *Dossier Pilote Éclairage*, 2000.

4. Cette disposition n'est toutefois pas requise dans les tunnels à faible trafic.

Les méthodes de dimensionnement de l'éclairage de renforcement en entrée proposées par la CIE et le CETU donnent des résultats différents. Ceci s'explique par le fait que la méthode CETU prend en compte les spécificités de l'ouvrage considéré, ce qui conduit à des valeurs en moyenne inférieures de 20 % à la méthode CIE, et même de 60 % dans les cas les plus favorables.

Dans une démarche de réduction de la consommation d'énergie liée à l'éclairage, l'usage de la méthode CETU est donc recommandé.

2.1.2 Postes de consommation

Comme cela a été dit plus haut, l'éclairage est le plus souvent le premier poste en matière de consommation énergétique dans un tunnel routier.

L'installation d'éclairage comporte plusieurs composantes qu'il convient d'examiner individuellement pour engager une démarche de réduction de consommation. Ces composantes sont les suivantes :

- un éclairage de sécurité assurant un niveau minimal d'éclairement sur la chaussée et les trottoirs, fonctionnant 24h/24 ;
- un éclairage de renforcement en entrée de tunnel – et parfois en sortie – fonctionnant la journée ;
- un éclairage de la section courante fonctionnant 24h/24 ;
- des plots de jalonnement lumineux sur les piédroits situés à un mètre de hauteur et répartis tous les 10 mètres, allumés en permanence ;
- un éclairage des itinéraires d'évacuation (issues, galeries, abris) (Illustration 5) ;



Illustration 5 : Éclairage d'une galerie d'évacuation (crédit photo : CETU)

- un éclairage des niches de sécurité et un sur-éclairage des portes d'issues allumés en permanence (Illustration 6).

Le dimensionnement d'une installation d'éclairage est réalisé sur la base d'études photométriques qui ont pour objectif de définir les niveaux d'éclairage à atteindre pour assurer une bonne visibilité. Ce dimensionnement dépend des caractéristiques de la chaussée et de celles des luminaires, y compris leur positionnement (à contreflux ou symétrique, mono-file ou double file, centré ou latéral, en haut de piédroit ou en voûte).

Le dimensionnement et les consommations énergétiques de l'éclairage de renforcement sont globalement très dépendants des conditions d'entrée dans l'ouvrage – vitesse pratiquée, caractéristiques des têtes (géométrie, orientation, niveau de voile) – et de l'installation d'éclairage elle-même. On distingue deux types d'installations d'éclairage de renforcement : à contre-flux ou symétrique.

Plus encore que pour les tunnels longs, l'éclairage des tunnels courts est un problème spécifique à chaque ouvrage, dans lequel la géométrie du tunnel, ses conditions d'approche, son environnement, la nature et l'intensité du trafic jouent un rôle primordial. Il y a lieu, dans chaque cas, de procéder à une étude spécifique. Les arbres de décision figurant au chapitre 3 du dossier pilote éclairage [2] permettent de guider les bureaux d'études dans l'approche du problème en fonction des caractéristiques de l'ouvrage.

Finalement, on pourra retenir que, dans les tunnels courts, l'éclairage de renforcement, bien que ne fonctionnant qu'en journée, représente généralement les consommations électriques les plus importantes, supérieures à celles de l'éclairage de base, alors que c'est l'inverse dans les tunnels longs.



Illustration 6 : Éclairage de la porte d'une issue de secours (crédit photo : CETU)

2.2 VENTILATION

La ventilation des tunnels routiers permet de réduire le niveau de pollution dû à la circulation des véhicules, afin de garantir un air respirable sans danger pour la santé des usagers qui l'empruntent. Elle assure également le contrôle des fumées afin de garantir la sécurité des personnes présentes en cas de départ de feu dans le tunnel.

2.2.1 Principes de sécurité et textes de référence

Plusieurs textes fixent les niveaux de polluants admissibles dans les tunnels routiers.

La principale référence est la circulaire n°99-329 du 8 juin 1999 du ministère de la Santé [3]. Elle impose de respecter, pour le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde d'azote (NO₂), les critères fixés par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) dans son avis du 14 décembre 1998 :

- la teneur moyenne en CO sur toute la longueur de l'ouvrage ne doit pas dépasser 90 ppm (100 µg/m³) sur toute période de 15 minutes ;
- la teneur moyenne en NO₂ sur toute la longueur de l'ouvrage ne doit pas dépasser 0,4 ppm (800 µg/m³) sur toute période de 15 minutes.

Le dossier pilote « Ventilation » du CETU [4], pour sa part, fixe une valeur à ne pas dépasser en opacité (5.10⁻³ m⁻¹ en tout point et à tout instant), ce qui est un moyen indirect de réguler les niveaux en particules fines (PM).

L'Instruction Technique relative à la sécurité dans les tunnels routiers [1] fixe quant à elle des seuils à ne pas dépasser en situation exceptionnelle. Ces seuils concernent le CO et l'opacité, et sont plus élevés que les seuils précités.

Afin de pouvoir contrôler les niveaux de polluants conformément aux prescriptions exposées ci-dessus, des capteurs de NO₂, CO et d'opacité sont installés dans les tunnels.⁵

2.2.2 Postes de consommation

En matière de ventilation (Illustration 7), il existe principalement trois sources de consommation électrique :

- la ventilation sanitaire du tunnel ;
- le désenfumage du tunnel (incendies et tests) ;
- la ventilation des issues de secours.



Illustration 7 : Usine de ventilation
(crédit photo : CETU)

La part liée à la ventilation de désenfumage est marginale, limitée aux incendies extrêmement rares et à des tests de bon fonctionnement, un peu plus fréquents, mais qui restent ponctuels.

La part liée à la ventilation sanitaire est très variable : dans certains cas, elle est également marginale, en comparaison notamment des besoins en énergie pour le fonctionnement de l'éclairage ; dans d'autres cas, elle peut être élevée, du même ordre que celle nécessaire à l'éclairage.

Ainsi, dans un tunnel à deux tubes unidirectionnels de longueur modérée sans congestion, le courant d'air provoqué par le pistonnement des véhicules suffit à renouveler l'air pour maintenir de bonnes conditions. L'activation de la ventilation sanitaire est alors inutile. Dans d'autres cas, en particulier ceux des tunnels bidirectionnels, le fonctionnement de la ventilation sanitaire est régulier, au moins quotidien durant les heures de pointe, voire continu tout au long de la journée. La consommation d'énergie induite peut alors être conséquente.

On peut retenir que les besoins en ventilation sanitaire augmentent avec le niveau de trafic, le taux de poids lourds, le niveau éventuel de congestion, la pente et la longueur du tunnel. En outre, le type de ventilation – courant d'air longitudinal créé par des accélérateurs, ou soufflage d'air frais, ou encore extraction d'air vicié – peut être plus ou moins efficace et induire des consommations énergétiques plus ou moins élevées.

5. Depuis la parution de la réglementation, les émissions unitaires des véhicules ont fortement régressé, avec pour conséquence une baisse des niveaux de pollution de l'air en tunnel. Désormais, les concentrations en CO sont usuellement de l'ordre de quelques ppm, au plus de 10 à 20 ppm, et les niveaux d'opacité ont aussi fortement diminué. Ils sont en général inférieurs à 2.10⁻³ m⁻¹.

Le polluant potentiellement le plus problématique est le NO₂ dont les niveaux ont moins diminué avec, couramment, des concentrations comprises entre 0,2 et 0,4 ppm dans des tunnels urbains à un fort trafic, lorsque la circulation est fluide. En situation de trafic congestionné, ces concentrations peuvent augmenter et atteindre 1 à 2 ppm dans certains ouvrages, et parfois plus, si la ventilation sanitaire n'est pas activée.

La consommation d'énergie pour la ventilation sanitaire est donc potentiellement élevée, mais comme elle dépend de nombreux paramètres propres à chaque tunnel, il est difficile de l'estimer a priori, et par conséquent d'estimer le potentiel de réduction existant. Ainsi, il convient que chaque exploitant, avant de lancer une démarche de réduction de la consommation électrique liée à la ventilation dans un tunnel donné, procède à un diagnostic permettant d'estimer quelle est la consommation de ce poste.

Outre la ventilation du tunnel proprement dit, les issues de secours disposent d'un système de ventilation spécifique (Illustration 8), souvent doté de deux régimes :

- un régime sanitaire ou de confort, destiné à simplement renouveler l'air dans l'issue ;
- un régime « incendie », destiné quant à lui à éviter l'entrée des fumées dans le cheminement d'évacuation en cas d'incendie dans le tunnel.



Illustration 8 : Ventilation d'une issue de secours (crédit photo : Laurent Mignaux / Terra)

Sauf cas particulier, la consommation de la ventilation des issues est très inférieure à celle de la ventilation du tunnel.

2.3 AUTRES ÉQUIPEMENTS

Outre la ventilation et l'éclairage, identifiés comme les principaux postes de consommation, d'autres équipements peuvent entraîner des consommations non négligeables, surtout lorsqu'elles sont cumulées. Il peut s'agir, par exemple, des consommations liées aux pertes des équipements de transformation et de distribution de l'énergie électrique⁶ (Illustration 9), à la signalisation ou aux consommations des systèmes de relevage.



Illustration 9 : Équipements de transformation et de distribution de l'énergie électrique (crédit photo : Laurent Mignaux / Terra)

La consommation précise des différents systèmes d'équipements présents en tunnel est toutefois très mal connue, en l'absence de systèmes de sous-comptage des consommations. Cette connaissance est pourtant indispensable pour identifier les postes les plus consommateurs afin de définir des mesures de réduction, puis d'en évaluer l'efficacité une fois mises en œuvre.

Pour cette raison, avec l'appui d'un exploitant, le CETU a engagé une action ayant pour objectif d'accéder aux consommations précises des différentes familles d'équipements d'un tunnel réel (tunnel du Siaix, exploité par la DIR Centre-Est), doté de toutes les familles courantes d'équipements de sécurité, y compris la ventilation.

Cette opération, en cours à la date d'écriture de ce document consiste en l'installation de centrales de mesures au niveau des départs des équipements situés dans les TGBT⁷. Elle doit permettre notamment d'obtenir des comptages précis pour les équipements autres que l'éclairage et la ventilation, et d'évaluer les enjeux que représentent ces équipements en matière de consommation énergétique.

En fonction des résultats obtenus, de nouvelles pistes pourraient ainsi être explorées pour la définition de mesures de réduction complémentaires.

6. Pertes d'énergie par dissipation de chaleur.

7. Tableau Général Basse Tension.

MESURES DE RÉDUCTION PAR FAMILLE D'ÉQUIPEMENTS

3.1 MESURES DE RÉDUCTION POSSIBLES POUR L'ÉCLAIRAGE

Plusieurs types de mesures ou pistes de réduction possibles concernant l'éclairage sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

3.1.1 Vérification du fonctionnement correct de l'installation

Tout d'abord, certaines installations surconsomment du fait de dysfonctionnements ou de mauvais réglages.

En premier lieu, il est donc recommandé **de vérifier le bon fonctionnement du pilotage des installations d'éclairage et les paramètres enregistrés dans la GTC⁸, et si besoin d'engager les mesures correctives nécessaires.**

Pour les systèmes commandés sur le principe d'allumage-extinction, il est possible de s'appuyer sur la fiche d'action n°2 du CETU, qui donne des procédures pratiques pour faire ces vérifications. Cette fiche peut être téléchargée depuis le lien suivant : https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/fiche-action_2.pdf

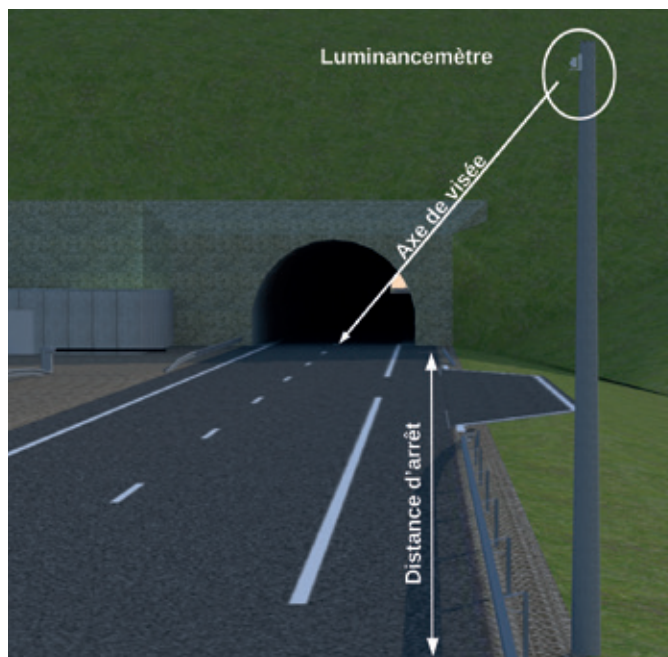


Illustration 10 : Position du luminancemètre – Schéma de principe

Une grande partie des principes décrits s'appliquent aussi aux installations récentes constituées de luminaires LED gradables.

Il est également recommandé **de vérifier le bon fonctionnement et positionnement des capteurs**, en particulier les luminancemètres, suivant la fiche d'action n°1 du CETU (Illustrations 10 et 11). Cette fiche peut être téléchargée depuis le lien ci-dessous :

https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/cetu_ci_eq_fa_luminancemetre_v0.6_internet.pdf



Illustration 11 : Luminancemètre (crédit photo : CETU)

8. Gestion Technique Centralisée.

3.1.2 Ajustement des niveaux aux valeurs minimales nécessaires

Niveaux de l'éclairage de renforcement

Pour tout ouvrage, l'un des contrôles possibles est, dans un premier temps, **d'analyser dans la GTC les valeurs remontées par les luminancemètres pour les confronter aux valeurs de voile utilisées pour le dimensionnement.**

Dans le cas particulier des tunnels courts, il convient de vérifier que les niveaux sont bien dimensionnés, et en particulier de se référer aux arbres de décision figurant au chapitre 3 du *Dossier Pilote Éclairage* [2]. Ils permettent de guider le concepteur dans l'approche du problème.

Niveaux de l'éclairage de la section courante

Il est utile de faire **réaliser des vérifications des niveaux réels de luminance en complément des mesures d'éclairement** (Illustration 12), **pour adapter le niveau d'éclairage au besoin in situ** et ce, pour tous les régimes d'exploitation utilisés (jour, nuit, nuit réduit), d'autant plus pour les tunnels de grande longueur⁹.

Il est important de noter que, pour les tunnels longs, il est possible de réduire le niveau de luminance à 2 cd/m² après 30 secondes de trajet¹⁰.



Illustration 12 : Mesures photométriques (crédit photo : CETU)

Niveaux de l'éclairage des issues de secours et des niches de sécurité

Concernant l'éclairage des issues de secours et des niches de sécurité, il est conseillé de vérifier leurs niveaux réels et de les ramener au niveau recommandé par les normes en vigueur en cas de dépassement.

3.1.3 Optimisation du pilotage de l'éclairage de la section courante (hors régime de sécurité)

Le pilotage de l'éclairage de la section courante peut être optimisé afin de réduire les consommations.

Il faut d'abord s'assurer qu'un éclairage réduit est appliqué durant la nuit quand le trafic le permet. Par exemple, un niveau de l'ordre de 1 à 2 cd/m² peut être admis¹¹ durant les plages horaires de faible trafic (généralement entre 23h00 et 5h00).

Il faut également s'assurer de l'utilisation de cellules photo-électriques pour le basculement jour/nuit, plutôt que d'un pilotage horodaté, qui ne traduit pas le niveau de luminance de fond réel du ciel. Le pilotage horodaté pourra être conservé uniquement en mode dégradé, en cas de défaut des capteurs.

Enfin, une piste de réduction est en cours d'expérimentation. Il s'agirait, dans les tunnels à faible trafic, de maintenir par défaut le régime de base au régime minimal de l'installation, et d'activer le niveau requis (jour, nuit réduit) uniquement sur détection de véhicule. Cette piste nécessite toutefois d'être encore confortée. Elle doit être assortie de fortes précautions de mise en œuvre.

3.1.4 Ajustement des niveaux à la vitesse de référence

La vitesse de référence impacte fortement le dimensionnement, et donc les consommations d'éclairage.

Le plus souvent, la vitesse de référence correspond à la vitesse réglementaire, mais dans certains cas, les spécificités de l'itinéraire peuvent conduire à choisir une vitesse de référence inférieure à la vitesse réglementaire (présence d'un péage, virage prononcé...).

L'abaissement de la vitesse de référence est un levier d'économie, et le gain potentiel est d'autant plus important que la vitesse initiale est élevée.

Choix au stade de la conception (ouvrage neuf ou rénovation)

Au stade de la conception, le choix de la vitesse de référence doit être fait en pesant ses conséquences sur les consommations énergétiques de l'installation d'éclairage de renforcement.

9. Luminance : grandeur qui traduit la luminosité d'une petite surface regardée dans une direction donnée et qui dépend à la fois des conditions d'éclairement de cette surface, de ses caractéristiques propres de réflexion et du point d'observation – Unité : candela par m² (cd/m²). Cette valeur est représentative de ce que perçoit l'utilisateur.

Éclairement : quotient du flux lumineux reçu sur un élément de surface par l'aire de cet élément – Unité lux (lx). Cette valeur est représentative de ce qui est émis par l'installation d'éclairage..

10. Chapitre 2.1.4 – Tunnels très longs du *Dossier Pilote Éclairage*.

11. Cf. *Dossier Pilote des Tunnels* – 2.1.5 Éclairages réduits de nuit.

Il s'agira donc d'étudier plusieurs scénarios avec différentes vitesses de référence, en vue de retenir le meilleur compromis en matière de sécurité, de service rendu à l'utilisateur et de consommation énergétique, en cohérence avec le reste de l'itinéraire.

Adaptation éventuelle pour un ouvrage en exploitation

Dans le cas d'un ouvrage déjà en exploitation, il convient d'abord de vérifier que la vitesse de référence est bien celle pratiquée en approche du tunnel ou qu'il n'y a pas eu d'évolution de la vitesse réglementaire depuis la conception de l'installation d'éclairage. Dans le cas contraire, il faut vérifier que les niveaux d'éclairage ont bien été réduits en conséquence.

Dans le cadre de démarches volontaristes, la vitesse de référence peut être abaissée afin de réduire les consommations. Une adaptation de l'installation d'éclairage est alors nécessaire pour obtenir le gain attendu. Elle dépend de la chaîne d'équipements déjà installés dans l'ouvrage et de son système de pilotage. Une étude précise doit donc être menée dans ce cas pour définir les modifications à apporter.

Asservissement du niveau de renforcement en fonction de la vitesse pratiquée (ouvrage neuf ou rénovation), au stade de la recherche

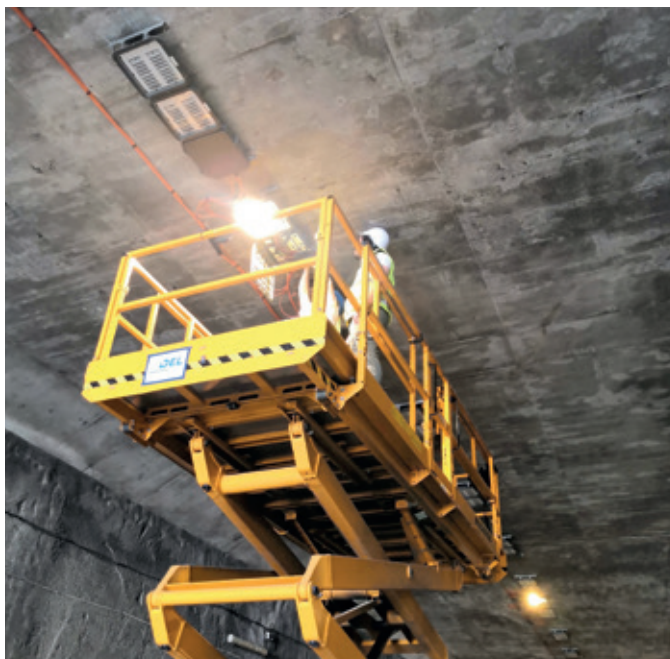


Illustration 13 : Site expérimental DELTA dans le tunnel d'Antony (crédit photo : CETU)

Pour le cas particulier des ouvrages fréquemment congestionnés, des études sont en cours pour étudier les possibilités que pourrait offrir une commande des niveaux d'éclairage en fonction de la vitesse pratiquée, mesurée en temps réel. Des travaux de thèse sur le sujet ont confirmé l'intérêt de poursuivre cette piste, avec des gains estimés à 35 % sur le cas modélisé [5].

Ces travaux de recherche se poursuivent au travers d'un partenariat de recherche DELTA (Démonstrateur éclairage LED du tunnel d'Antony) (Illustration 13).

3.1.5 Optimisation de l'éclairage des issues de secours et des abris

Une piste de réduction est actuellement explorée concernant l'éclairage des issues de secours et des abris. Il s'agirait, pour ces ouvrages, de faire varier le niveau d'éclairage en fonction de la présence ou non d'utilisateurs. Cela suppose toutefois de garantir une bonne fiabilité de la détection, ce qui nécessiterait dans ce cas de devoir prendre de fortes précautions pour une bonne mise en œuvre.

3.1.6 Optimisation des opérations de maintenance

Mise en œuvre d'un suivi des consommations électriques

Dans certains cas, le recueil des données de la GTC peut permettre de déceler des surconsommations liées à des dysfonctionnements de l'installation d'éclairage. Néanmoins, ce recueil de données et leur analyse peuvent s'avérer fastidieux.

Pour cette raison, l'installation de centrales de mesure des consommations électriques sur les départs des circuits d'éclairage est préférable pour suivre les consommations à distance, détecter rapidement la présence d'une dérive et agir en conséquence. Ce type de dispositif peut généralement être mis en œuvre sans perturber le fonctionnement normal de l'installation.

Renforcement de la maintenance préventive

Une source ou un luminaire défectueux est un facteur de surconsommation énergétique. Le renforcement de la maintenance préventive est donc un facteur d'économie.

Il s'agit de mettre en place **un plan de maintenance préétabli de remplacement des sources ou des luminaires avant la survenue de défauts.**

Pour mener à bien cette politique de maintenance, des stocks suffisants de sources et de luminaires doivent être constitués et renouvelés.

3.1.7 Actions sur l'environnement de l'ouvrage

Il est possible de réduire les besoins d'éclairage en entrée d'ouvrage par la mise en œuvre de dispositifs spécifiques agissant sur la perception de l'environnement extérieur du tunnel par l'utilisateur.

Un traitement des têtes et des abords peut être envisagé pour réduire le niveau de voile. Les traitements possibles sont par exemple l'assombrissement des constructions présentes dans le champ de vision du conducteur en approche (Illustration 14) par végétalisation (murs de soutènement) ou application de peintures plus sombres (murs de soutènement, bâtiments), ou encore par diminution de la zone de ciel visible (plantation d'arbres).

Afin de limiter le besoin en éclairage de renforcement en entrée de tunnel, une chaussée sombre doit impérativement être retenue à l'extérieur aux abords de l'ouvrage.

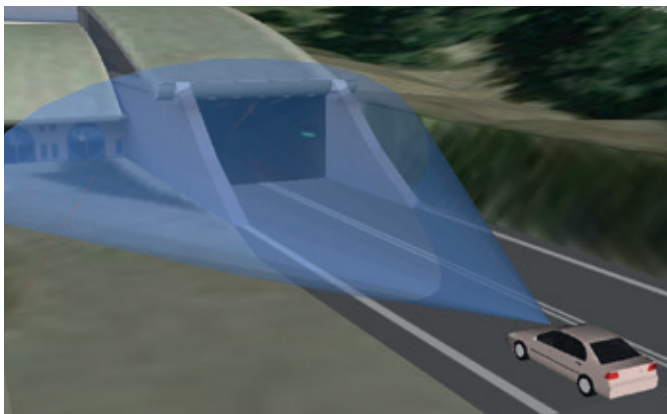


Illustration 14 : Champ de vision du conducteur situé à la distance d'arrêt de l'entrée du tunnel – Schéma de principe

3.1.8 Installation d'un nouveau système d'éclairage

L'amélioration des performances énergétiques des systèmes d'éclairage actuels et leur capacité de gradation, notamment grâce aux possibilités offertes par la technologie LED, peuvent justifier le renouvellement complet d'une installation.

Principes généraux pour le dimensionnement d'une nouvelle installation

Les principes généraux qui sont donnés ici s'appliquent à une installation dans un ouvrage neuf ou au renouvellement complet d'une installation dans un ouvrage existant.

La première étape du dimensionnement consiste à calculer les niveaux de luminance nécessaires en tout point du tunnel de façon à assurer la vision d'un obstacle type situé sur la chaussée en avant du conducteur, à une distance égale à la distance d'arrêt du véhicule.

Cette première étape de calcul du niveau de luminance nécessaire en tout point de l'ouvrage (courbe de besoin) doit être réalisée avec soin par un bureau d'études spécialisé, en s'appuyant sur des mesures in situ et/ou des calculs de simulation.

Lors du renouvellement complet d'une installation d'éclairage, la première opération à mener est de vérifier que les niveaux d'éclairage pris en compte pour le dimensionnement initial respectent rigoureusement la réglementation et les guides en vigueur. Sinon, il convient de les recalculer.

L'étape suivante, généralement réalisée par les intégrateurs, est d'optimiser le nombre et le calepinage des luminaires selon la courbe des besoins fixée, via une étude photométrique.

Quand le gabarit le permet, il faut privilégier des lignes d'éclairage positionnées en sommital, centrées au-dessus des voies pour une meilleure répartition et donc une optimisation du flux lumineux. Les luminaires LED étant plus compacts, il est parfois possible, dans le cadre d'une rénovation de tunnel avec un éclairage latéral, de modifier l'implantation des luminaires pour passer en sommital, sans engager les revanches du gabarit.

Dans les ouvrages unidirectionnels dont l'éclairage est situé en sommital et pour lesquels la vitesse de référence est supérieure à 70 km/h, une réduction des consommations peut être obtenue en installant – si ce n'est pas encore le cas – des luminaires de renforcement de type contre-flux.

Une optimisation est également possible dans le choix de la température de couleurs. En effet, selon des études psychovisuelles [5], il a été montré que la température de couleur idéale – c'est-à-dire celle qui offre le meilleur compromis entre consommation d'énergie et confort visuel – se situe autour de 4000 K, température qui pourra donc être prescrite dans le cahier des charges.

Du point de vue contractuel, le marché d'installation du nouvel éclairage doit prévoir une planche d'essais pour la validation du modèle de luminaire, et des mesures in situ lors des opérations préalables à la réception, afin de contrôler l'obtention des niveaux requis (Illustration 15).



Illustration 15 : Renouvellement de l'éclairage de la tranchée couverte de Noailles
À gauche : avant renouvellement, luminaires sodium basse pression
À droite : après renouvellement, luminaires LED
(crédit photo : CETU)

Bonnes pratiques de dimensionnement de l'éclairage de renforcement

Pour l'étude de dimensionnement de l'éclairage de renforcement, l'appréciation du niveau de voile – qui permet de dimensionner la courbe de besoin en luminance – est une étape importante, qui doit être réalisée rigoureusement par un bureau d'études spécialisé, en appréciant ce que voit le conducteur situé à la distance d'arrêt de l'entrée du tunnel (Illustration 14).

L'éclairage de renforcement doit être dimensionné sur la base de valeurs de luminances extérieures mesurées sur site durant une période de référence suffisamment longue, afin qu'elle soit représentative, plutôt qu'à partir d'une appréciation qualitative qui peut conduire à un surdimensionnement.

Pour effectuer sur site une campagne de mesure des conditions photométriques extérieures en entrée de tunnel, il est possible de se rapprocher du CETU, qui a développé une centrale autonome de mesures « terrain ». Cet équipement, dénommé CAMEL, permet le recueil de données à distance pendant des périodes allant de trois à douze mois.

Bonnes pratiques de dimensionnement de l'éclairage de la section courante

Concernant l'étude de dimensionnement de l'éclairage de la section courante, il conviendra de prévoir les régimes indiqués au chapitre 5.7.2.4 du *Dossier Pilote Éclairage* du CETU. Les valeurs indiquées dépendent des caractéristiques de l'ouvrage (urbain ou non, niveau de trafic). Il est à noter que, **pour les tunnels de grande longueur, il est possible d'abaisser le niveau de l'éclairage de base après un parcours de 30 secondes**. De même, il est possible, en fonction du trafic, d'abaisser le niveau de l'éclairage de nuit lors des périodes creuses, au régime appelé nuit réduit.

On cherchera à réduire autant que possible le nombre de luminaires en optimisant l'espacement inter-luminaire, tout en veillant à conserver un niveau d'uniformité correct. Avec des luminaires LED, et pour des tunnels de hauteur courante, une inter-distance de l'ordre de 10 m paraît constituer un bon équilibre entre efficacité et nombre de luminaires.

Contrôle des niveaux de luminance (base et renforcement) par des mesures lors de la réception de l'installation

Lors de la réception d'une nouvelle installation d'éclairage, des mesures d'éclairage doivent être réalisées afin de vérifier que les niveaux contractuels sont bien atteints. Il est également utile de faire réaliser des mesures de luminance et de les comparer aux niveaux des besoins identifiés lors du dimensionnement (courbe de besoin).

La réalisation de ces mesures, qui demande du matériel spécialisé, peut conduire à abaisser les niveaux de gradation de l'installation, et donc à des économies substantielles en matière de consommation.

Mise au point d'un pilotage de l'installation adapté

Les anciennes installations constituées de technologies traditionnelles non gradables (sources fluorescentes, sodium) étaient dimensionnées par la méthode des paliers et fonctionnaient en « allumage / extinction ». Cette architecture ne permettait pas de suivre précisément la courbe des besoins.

Aujourd'hui, les niveaux d'intensité des luminaires à sources de type LED peuvent faire l'objet d'une gradation, qui permet d'optimiser la puissance utilisée. Lors du renouvellement d'une installation, l'ancien mode de pilotage ne doit donc pas être conservé. Un nouveau mode de pilotage tenant compte de la possibilité de gradation doit être développé, afin de disposer d'un pilotage beaucoup plus fin de l'installation d'éclairage.

Plus précisément, le mode de pilotage utilisera les possibilités offertes par les nouvelles installations à sources LED, qui sont gradables de 20 à 100 %.

Comparativement aux installations utilisant les technologies classiques, **celles utilisant la technologie LED permettent d'optimiser les consommations en ajustant les niveaux au besoin exact**, dimensionné en phase de conception.

La courbe verte représente le pilotage de l'installation de renforcement avec les paliers à 50 % et 100 % tandis que la courbe bleue représente un pilotage par pas de 10 %. La surface en jaune illustre le gain en termes de pilotage pour une même technologie, qui se traduit par des économies d'énergie.

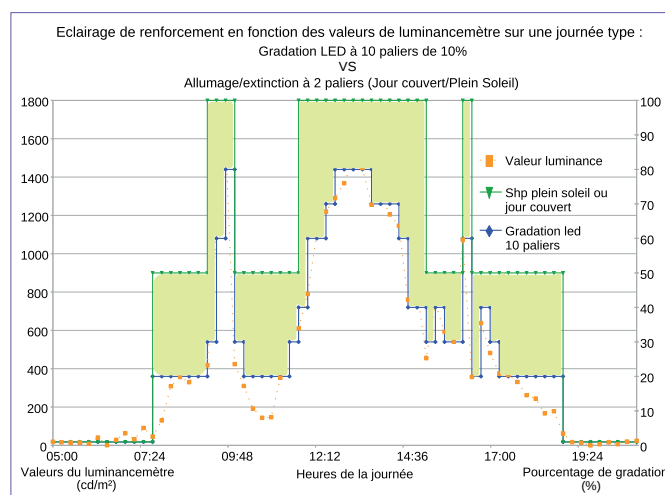


Illustration 16 : Exemple d'économie d'énergie obtenue pour l'éclairage de renforcement grâce au remplacement de l'installation avec luminaires SHP par une installation avec luminaires LED

Choix d'une technologie performante

Au-delà des possibilités de gradation qu'elles offrent et des réductions de consommation qui en découlent (voir paragraphe précédent), les sources de type LED permettent des réductions significatives de la consommation grâce à leur meilleur rendement en lumens par watt (lm/w) que les sources traditionnelles. Cette baisse de consommation a pu être vérifiée par le retour d'expérience. Pour une optimisation complète de l'installation, le choix des sources les plus performantes au sein de la technologie LED doit aussi être conduit.

Choix d'une chaussée performante d'un point de vue photométrique

Le but de l'installation d'éclairage étant d'assurer un contraste suffisant entre les luminances respectives de l'obstacle et de la chaussée, la luminance de chaussée a un rôle primordial. Le revêtement de chaussée se comporte comme un réflecteur qui renvoie vers le conducteur une part plus ou moins importante de la lumière qu'il reçoit. C'est pourquoi il est nécessaire de porter une attention particulière aux caractéristiques photométriques de la chaussée : spécularité et clarté.

Pour optimiser le dimensionnement de l'installation d'éclairage, le type de revêtement doit être déterminé (ouvrage neuf) ou connu (rénovation ou renouvellement) au moment des études.

La clarté du revêtement influence fortement les niveaux d'éclairement à atteindre. Pour réduire le besoin en éclairage, il est possible de mettre en œuvre **une chaussée éclaircie (granulats clairs) dans le tunnel**, plutôt qu'une chaussée sombre, dont l'usage est fortement déconseillé.

Concernant les chaussées claires (enrobé réalisé avec un liant synthétique clair et des granulats blancs), une maintenance fréquente est nécessaire pour conserver leurs propriétés photométriques, ce qui peut constituer une contrainte forte pour l'exploitant.

3.1.9 Rénovation de l'installation d'éclairage

À défaut du renouvellement complet de l'installation existante (traité dans le chapitre précédent), la simple rénovation des luminaires peut procurer des gains de consommation d'énergie.

La rénovation consistera à remplacer les luminaires complets **en prescrivant dans le cahier des charges un rendement lumineux minimal à respecter (exprimé en lm/w)**. Cette précision est indispensable, car il existe des écarts significatifs entre les produits des différents fabricants présents sur le marché.

Il convient de s'assurer que l'installation électrique est compatible avec les nouveaux équipements (appel de puissance, protections...) et que les propriétés photométriques

sont conformes à la réglementation. Pour s'en assurer, il est nécessaire de faire réaliser une nouvelle étude photométrique par un bureau d'études spécialisé. Les performances obtenues peuvent être vérifiées par un banc d'essai sur site.

Lorsque les carcasses des luminaires sont encore en bon état, un rétrofit peut être envisagé : les sources des luminaires peuvent être substituées par des sources LED. Outre les précautions précédentes, il y a lieu, au préalable, de caractériser les propriétés photométriques du luminaire rétrofité.

À noter que les solutions évoquées ci-avant ne permettent pas toujours d'obtenir des installations gradables. Dans ce cas, les économies d'énergies potentielles sont induites uniquement par le gain sur le rendement des sources (avant/après rénovation). Quelques retours d'expériences ont montré qu'un gain de l'ordre de 30 % peut être obtenu.

3.1.10 Exemples de valeurs de réduction de la consommation électrique de l'éclairage

Des valeurs de réduction des consommations électriques pour une installation d'éclairage sont indiquées à titre d'exemple dans le Tableau 1.

Il faut noter que certaines mesures de réduction peuvent conduire à d'importantes économies d'énergie, abaissant la consommation électrique de 60 à 80 %.

On peut distinguer deux types de mesures de réduction.

1) Les mesures concernant le pilotage de l'installation :

- vérification du fonctionnement correct de l'installation (cf. § 3.1.1) ;
- ajustement des niveaux aux valeurs minimales nécessaires – niveaux de l'éclairage de la section courante (cf. § 3.1.2) ;
- ajustement des niveaux à la vitesse de référence – asservissement du niveau de renforcement en fonction de la vitesse pratiquée (ouvrage neuf ou rénovation), au stade de la recherche (cf. § 3.1.4) ;
- installation d'un nouveau système d'éclairage – contrôle des niveaux de luminance (base et renforcement) par des mesures lors de la réception de l'installation (cf. § 3.1.8).

2) Les mesures concernant la technologie :

- installation d'un nouveau système d'éclairage – choix d'une technologie performante (cf. § 3.1.8) ;
- rénovation de l'installation d'éclairage (cf. § 3.1.9).

Le tableau fourni ci-contre montre les économies potentielles pour ces différentes mesures. L'adoption de ces mesures peut contribuer à réduire significativement l'empreinte énergétique des tunnels.

Mesures		Exemple		MWh par an	Estimation de réduction	Équivalent habitant en matière de consommation électrique *
3.1.1	Vérification du fonctionnement correct de l'installation	Les défauts de fonctionnement des cellules jour/nuit et luminancemètres peuvent conduire à un fonctionnement à 100 % du renforcement 24h/24. Une surconsommation annuelle a été calculée sur un ouvrage dont le renforcement est constitué de 62 luminaires de 460 W.	Anomalie : un fonctionnement à 100 % du renforcement 24h/24	250	- 80 %	100
			Normale : les hypothèses prises en compte pour les durées de fonctionnement par palier sont [% - durée en h] : 100 - 188 / 90 - 218 / 80 - 245 / 70 - 265 / 60 - 303 / 50 - 237 / 40 - 235 / 30 - 327 / 20 - 2368	49		20
3.1.2	Ajustement des niveaux aux valeurs minimales nécessaires – niveaux de l'éclairage de la section courante	Mesures effectuées en 2017 sur l'éclairage de base du tunnel Maurice Lemaire (tube de 6,95 km).	Anomalie : niveaux de luminances trop élevés	871	- 45 %	348
			Après optimisation : niveaux conformes aux niveaux requis	482		193
3.1.4	Ajustement des niveaux à la vitesse de référence – asservissement du niveau de renforcement en fonction de la vitesse pratiquée (ouvrage neuf ou rénovation), au stade de la recherche	Estimation de la réduction déterminée dans le cadre de la thèse intitulée <i>Étude de l'influence de la luminance et de la température de couleur sur la visibilité, modélisation de scénarios d'éclairage adaptatif économes en énergie asservis aux conditions environnementales et au trafic</i> [5].	Sans asservissement à la vitesse de trafic	120	- 35 %	48
			Avec asservissement à la vitesse de trafic	79		31
3.1.7	Installation d'un nouveau système d'éclairage – contrôle des niveaux de luminance (base et renforcement) par des mesures lors de la réception de l'installation	À l'occasion de mesures de réception effectuées au tunnel de Noailles (bitube de 314 m), il a été constaté que les niveaux de luminances des éclairages de renforcement et de base étaient trop élevés. L'ajustement des valeurs de consignes pour les commandes des circuits a permis de diviser par deux les consommations électriques.	Avant ajustement	147	- 41 %	59
			Après ajustement	86		34
3.1.7	Installation d'un nouveau système d'éclairage – choix d'une technologie performante	Exemple de l'éclairage de base d'un tube de 1000 m.	Luminaires LED espacés de 6 m (rendement de 80 lm/W)	65	- 60 %	26
			Luminaires LED espacés de 10 m (rendement de 140 lm/W)	26		10
3.1.8	Rénovation de l'installation d'éclairage	Exemple du tunnel du Pas de l'Escalette (bitube de 880 m).	Avant rénovation : luminaires SHP en renforcement et luminaires SBP en section courante	111	- 24 %	44
			Après rénovation : luminaires LED	84		34

* La consommation électrique moyenne annuelle par habitant est de 2,5 MWh.

Tableau 1 : Éclairage : exemples de réduction des consommations en phase d'exploitation normale

3.2 MESURES DE RÉDUCTION POSSIBLES POUR LA VENTILATION

Les mesures de réduction détaillées dans cette partie concernent la ventilation sanitaire du tunnel (3.2.1 à 3.2.3), le désenfumage (3.2.4 et 3.2.6) et la ventilation des issues de secours (3.2.5).

3.2.1 Maîtrise de la chaîne complète de contrôle-commande de la ventilation sanitaire

La ventilation sanitaire repose sur une chaîne complète de contrôle-commande qui va du capteur de pollution aux ventilateurs, en passant par l'ensemble du système d'acquisition et de traitement des données utiles au fonctionnement du système. Les éléments de cette chaîne sont les suivants :

- les capteurs de pollution en tunnel (Illustration 17) ;
- les coffrets locaux d'acquisition des données remontées par les capteurs ;
- le réseau de télétransmission montant pour la transmission des données vers le système de Gestion Technique Centralisée (GTC) du tunnel ;
- le logiciel de traitement des données reposant sur un algorithme conditionnel d'activation du système, intégré à la GTC ;
- le réseau de télétransmission descendant de la GTC vers les équipements de ventilation ;
- les équipements du système de ventilation (accélérateurs, ventilateurs de soufflage, ventilateurs d'extraction, etc.) ;
- l'interface homme-machine permettant de contrôler et surveiller l'ensemble du système de ventilation (Illustration 18), et notamment les niveaux de pollution dans le tunnel et l'état d'activation de la ventilation.



Illustration 17 : Opacimètre (en haut), appareil de mesure du dioxyde d'azote (en bas à droite) et du monoxyde de carbone (en bas à gauche) (crédit photo : CETU)

La maîtrise de tous ces éléments est indispensable afin d'adapter le fonctionnement de la ventilation sanitaire aux besoins réels. Le retour d'expérience montre qu'il existe régulièrement, dans cette longue chaîne, des défauts qui sont à l'origine d'un fonctionnement inutile de la ventilation, et donc d'une surconsommation d'énergie.



Illustration 18 : Poste de contrôle trafic et tunnels (crédit photo : Terra)

Quelques-uns des défauts les plus souvent relevés sont :

- un choix de capteurs inadaptés (principalement concernant le NO_2) ;
- des capteurs mal maintenus (mauvais étalonnage, filtres ou cellules non remplacés...) qui surestiment les niveaux de pollution ;
- une mauvaise remontée des mesures ;
- une mauvaise conception de l'algorithme proprement dit (activation de la ventilation trop tardive, lorsque les niveaux de pollution sont déjà très hauts ; activation insuffisamment progressive ; recours à l'extraction d'air vicié ; non-utilisation d'accélérateurs, alors que le tunnel en est doté, au profit de ventilateurs de soufflage, etc.) ;
- un mauvais traitement des données remontées par les capteurs (utilisation de valeurs instantanées au lieu de valeurs moyennes sur 15 minutes, utilisation de la valeur la plus forte remontée par un capteur au lieu de la moyenne de tous les capteurs, erreur dans le choix des seuils, etc.), souvent dû à une mauvaise programmation logicielle de l'algorithme de contrôle-commande, non conforme à l'analyse fonctionnelle.

Dans une démarche de réduction des consommations électriques inutiles, un diagnostic complet de la chaîne de contrôle-commande de la ventilation sanitaire doit donc être effectué, avec de possibles gains sur la consommation d'énergie.

Dans tous les cas, la maîtrise de la consommation de ce poste passe par une maintenance régulière de l'installation par un technicien compétent, portant une attention particulière aux capteurs, qui sont des matériels très sensibles (Illustration 19), pour lesquels la maintenance doit être en tout point conforme aux prescriptions des fabricants et aux recommandations de la note d'information n°26 du CETU [6].



Illustration 19 : Bouteille de gaz titré afin de vérifier les performances des capteurs de pollution (crédit photo : CETU)

On notera que si l'amélioration de la chaîne de contrôle-commande peut bien sûr permettre de réduire la consommation électrique dans les tunnels où les niveaux de pollution sont surestimés, elle peut également augmenter la consommation électrique dans ceux où ils seraient sous-estimés.

3.2.2 Ajustement du régime de fonctionnement des accélérateurs

Le système de ventilation sanitaire le plus courant est le système longitudinal par accélérateurs. Le nombre d'accélérateurs installés dans un tube est variable d'un tunnel à l'autre et peut être assez élevé, leur nombre étant le plus souvent déterminé pour les besoins du désenfumage (Illustration 20). Ainsi, **le fonctionnement de la totalité des accélérateurs en mode sanitaire n'est quasiment jamais nécessaire, et il est donc possible de n'utiliser – pour le sanitaire – qu'un petit nombre d'accélérateurs à leur régime maximal, ou alors, si l'installation le permet (accélérateurs dotés de variateurs), un nombre un peu plus important d'accélérateurs à un régime réduit.**

Ce dernier mode d'activation est intéressant, car étant donné que la poussée et la puissance n'évoluent pas de manière linéaire, il existe un rendement qui optimise la consommation électrique pour une poussée donnée, ce qui peut permettre, si l'on privilégie un fonctionnement à ce régime, une réduction de la consommation électrique (cf. Tableau 2).



Illustration 20 : Batterie d'accélérateurs (crédit photo : Laurent Mignaux / Terra)

3.2.3 Limitation de la congestion

Afin de limiter les besoins en ventilation sanitaire et la consommation d'énergie associée, toutes les mesures de réduction des émissions polluantes à la source applicables à l'air libre peuvent être envisagées en tunnel.

Un levier efficace pour réduire les émissions est la limitation de la congestion. Cette limitation est doublement efficace en tunnel, car outre des émissions plus faibles, elle permet dans les tunnels unidirectionnels de maintenir l'effet de pistonement de l'air provoqué par les véhicules, effet qui procure une ventilation sanitaire « gratuite ».

Parmi les moyens permettant d'éviter la congestion, on peut citer la réduction de la vitesse autorisée, la régulation d'accès ou encore les possibilités offertes, à moyen terme, par les systèmes de transports intelligents.

3.2.4 Optimisation de la fréquence des essais de ventilation de désenfumage

Afin de vérifier la disponibilité des systèmes de ventilation de désenfumage, très rarement sollicités sur événement réel, des essais d'activation réguliers doivent être menés. L'annexe C du fascicule 40 [7] indique que les accélérateurs et les ventilateurs (Illustration 21) doivent être activés au minimum une fois par mois.

Les cas de figure étant très différents d'un tunnel à l'autre, il **conviendra de définir pour chaque tunnel les modalités exactes d'essai qui répondent aux impératifs de sécurité tout en minimisant la consommation énergétique, modalités qui pourront donc être sensiblement variables d'un tunnel à l'autre. Il pourrait être envisagé de faire les tests en période nocturne (période plus favorable en matière de consommation énergétique), sous réserve de ne pas créer de nuisances sonores pour le voisinage.**



Illustration 21 : Ventilateur (crédit photo : CETU)

Lorsque ce sont les mêmes équipements qui remplissent la double fonction sanitaire et désenfumage, et que la ventilation sanitaire est activée régulièrement, cette activation pourra valoir test de bon fonctionnement sous réserve de bien vérifier que toutes les machines sont sollicitées à tour de rôle. À l'inverse, lorsque les équipements de désenfumage sont spécifiques, il conviendra de les tester de façon particulière.

Pour l'élaboration d'un programme de tests de bon fonctionnement, il convient également de prendre en compte les préconisations des fabricants de motoventilateurs qui indiquent généralement qu'un fonctionnement mensuel est un minimum, et qu'il doit être d'une durée suffisamment longue (15 à 20 minutes) pour assurer une bonne lubrification des roulements et l'évacuation de l'humidité du moteur (bobinages en particulier).

3.2.5 Adaptation de la ventilation des issues de secours aux besoins réels

La ventilation des issues de secours répond à deux objectifs :

- en exploitation normale, renouveler suffisamment l'air afin de protéger les personnels intervenant au titre de la réglementation du travail ainsi que l'ouvrage (génie civil et équipements) de taux d'humidité trop forts,

de températures trop fortes ou encore de concentrations en polluants trop élevées ;

- en cas d'incendie dans le tunnel, empêcher la pénétration des fumées dans le cheminement d'évacuation.

La ventilation en cas d'incendie est une disposition rarement mise en œuvre, elle n'est donc pas, en principe, à l'origine d'une consommation notable d'énergie.

Si la ventilation sanitaire est activée en permanence, ou tout au moins très régulièrement, elle peut, pour sa part, conduire à des consommations importantes. Afin de les limiter, quelques règles peuvent être rappelées. Tout d'abord, il n'y a aucune obligation à ventiler de façon permanente les issues. Une règle souvent retenue est d'assurer trois renouvellements horaires du volume à ventiler¹². Se fixer un tel objectif peut conduire à une consommation d'énergie non négligeable, aussi, plutôt que de se fixer une telle règle a priori, on pourra privilégier une obligation de résultat. La fréquence et la durée de fonctionnement de la ventilation pourront ainsi être calées de façon très pragmatique. Si un fonctionnement à trois renouvellements horaires montre un résultat très satisfaisant, la durée de fonctionnement pourra être réduite si l'air dans l'issue reste sain. Dans certains cas favorables (absence d'humidité naturelle, tunnel peu circulé n'apportant pas de pollution sensible dans l'issue, issue bien aérée grâce à des portes ajourées ou des ouvertures permanentes), on pourra même se dispenser totalement de ventilation sanitaire.

En matière de ventilation des issues de secours, il n'est donc pas nécessaire de ventiler en permanence, mais il faut adapter la fréquence et la durée de fonctionnement de la ventilation à la simple atteinte des objectifs qui lui sont assignés.

3.2.6 Optimisation du système de désenfumage pour réduire la puissance des installations de ventilation (en phase de recherche)

L'optimisation du système de désenfumage représente un levier d'action majeur pour réduire la puissance des installations de ventilation dans les tunnels routiers. Plusieurs pistes sont actuellement en phase de recherche.

Parmi celles explorées, des expérimentations récentes ont montré que des écrans de cantonnement placés en plafond pouvaient avoir une efficacité intéressante pour améliorer le maintien de la stratification des fumées [8] [9]. Ainsi, il est possible de minimiser le débit d'air nécessaire à leur évacuation, ce qui peut permettre une réduction significative de la puissance requise pour la ventilation. Ce procédé pourrait être une option intéressante à considérer lors du dimensionnement d'installations nouvelles ou lors de rénovations de systèmes existants.

12. Cette règle est inspirée de l'instruction technique du 25 août 2000 au sujet des abris dans les tunnels neufs du réseau routier national. Ces abris sont conçus pour permettre un séjour assez prolongé en cas d'incendie, ce qui implique des enjeux de qualité de l'air plus importants que dans les autres types d'issues.

Dans le cas de la ventilation transversale, un autre paramètre d'optimisation identifié est la géométrie des trappes d'extraction (Illustration 22). L'adaptation de leur forme et de leur taille peut avoir un impact significatif sur le débit d'air nécessaire pour atteindre les objectifs fixés en matière de contrôle des fumées. Ce facteur pourrait donc être ajusté pour optimiser la performance de l'installation de ventilation.



Illustration 22 : Trappe dans un plénum de ventilation (crédit photo : CETU)

3.2.7 Exemples de valeurs de réduction de la consommation électrique de la ventilation

Une indication sur les valeurs de réduction de la consommation électrique pouvant être atteintes par les mesures présentées dans les paragraphes précédents est donnée dans ce paragraphe. Pour cela, un tunnel fictif, de type bi-tube urbain a été pris en compte.

Description du tunnel fictif :

- longueur : 1 500 m ;
- profil en travers : 2 voies par tube ;
- ventilation : longitudinale, avec 2 extractions massives ;
- présence de 6 intertubes ventilés.

Caractéristiques des intertubes :

- volume : 150 m³ (25*2.5*2.5) par intertube ;
- puissance du ventilateur de chaque inter-tube : 1,5 kW ;
- débit du ventilateur : 1 m³/s.

Caractéristiques de la ventilation sanitaire :

- 20 accélérateurs de poussée 1000 N (22 kW) répartis dans les deux tubes ;
- 2 extractions massives ayant un débit de 445 m³/s, une perte de charge totale de 2000 Pa et un rendement moteur de 0,8.

Pour un tunnel de ce type, plusieurs mesures peuvent être imaginées pour optimiser la consommation électrique. Parmi elles :

- la régulation de la fréquence des essais de ventilation de désenfumage (cf. § 3.2.6) ;
- la réduction de la fréquence et de la durée de fonctionnement de la ventilation des issues de secours (cf. § 3.2.7).

D'autres mesures, non spécifiques au cas du tunnel fictif, sont :

- l'amélioration de la chaîne de contrôle commande (cf. § 3.2.1) ;
- l'ajustement du régime des accélérateurs (cf. § 3.2.2).

Le tableau 2 montre les économies potentielles pour ces différentes mesures. Leur adoption peut contribuer significativement à réduire l'empreinte énergétique des tunnels.

Phase	Mesures	Exemple	MWh par an	Estimation de réduction	Équivalent habitant en matière de consommation électrique *	
Exploitation normale	3.2.1	Amélioration de la chaîne de contrôle commande	Anomalie : fonctionnement d'un accélérateur (22 kW) dans chaque tube pendant 10 h/j	161	- 80 %	64,2
			Normale : fonctionnement d'un accélérateur (22 kW) dans chaque tube pendant 2 h/j	32		12,8
Exploitation normale	3.2.2	Ajustement du régime des accélérateurs	<ul style="list-style-type: none"> • 30 % de réduction si utilisation de 2 accélérateurs à régime réduit au lieu d'un à pleine puissance • 50 % de réduction si utilisation de 4 accélérateurs à régime réduit au lieu d'un à pleine puissance 			Dépend du nombre d'accélérateurs utilisés
Essais ventilation	3.2.6	Changement de la fréquence des essais de ventilation de désenfumage	Fonctionnement des 20 accélérateurs et des ventilateurs des 2 extractions massives pendant 20 minutes chaque mois dans le cas du tunnel fictif	11	Sans objet	4,3
Exploitation normale	3.2.7	Réduction de la fréquence et de la durée de fonctionnement de la ventilation des issues de secours	Anomalie : fonctionnement permanent (24 h / 24) d'un ventilateur dans les 6 issues de secours du tunnel fictif	79	- 96 %	31,5
			Normale : consommation de 3 renouvellements d'air par heure dans les 6 issues de secours du tunnel fictif	3		1,3

* La consommation électrique moyenne annuelle par habitant est de 2,5 MWh.

Tableau 2 : Ventilation : exemples de réduction des consommations

3.3 MESURES DE RÉDUCTION POSSIBLES POUR LES AUTRES ÉQUIPEMENTS

D'après les estimations disponibles, une fois les équipements d'éclairage et de ventilation pris en compte, les transformateurs, onduleurs, panneaux de signalisation, serveurs et automates figurent parmi les systèmes les plus énergivores.

Pour identifier de manière précise les équipements les plus énergivores, des campagnes de suivi de la consommation doivent être menées, par exemple selon le dispositif présenté au paragraphe 2.2. Ce suivi est un moyen d'identifier les postes les plus consommateurs et donc de prioriser les actions à mener et d'optimiser l'efficacité des mesures prises pour réduire la consommation d'énergie.

Pour ces autres équipements, l'idée à retenir est que chaque mesure, même minime, prise pour réduire la consommation d'énergie s'additionne aux autres pour créer un effet cumulatif plus important sur l'efficacité énergétique globale.

À titre indicatif, quelques mesures de réduction de la consommation d'énergie sont présentées pour certains de ces équipements.

3.3.1 Transformateurs et onduleurs



Illustration 23 : Transformateur (crédit photo : CETU)

La performance d'un transformateur (Illustration 23) ou d'un onduleur peut varier en fonction de la charge à laquelle il opère. Chaque appareil a une plage de charge optimale pour laquelle il est conçu afin de minimiser les pertes. Il est donc généralement préférable de le faire fonctionner à l'intérieur de cette plage, plutôt qu'à sa charge maximale ou minimale. Des facteurs tels que la température ambiante et l'état de maintenance de l'appareil peuvent aussi influencer son efficacité.

Dans un tunnel routier, la charge des équipements d'alimentation dépend généralement de plusieurs facteurs, notamment le type et le nombre d'équipements électriques raccordés et leur sollicitation. Par conséquent, un transformateur ou un onduleur dans un tunnel routier peut ne pas fonctionner constamment à sa charge optimale. Pendant les périodes de faible trafic, par exemple la nuit, la demande d'énergie est faible, et donc les équipements d'alimentation pourraient fonctionner à une charge inférieure à leur optimum. Pendant les heures de pointe, à l'inverse, la demande d'énergie peut être plus élevée, ce qui pourrait conduire à les solliciter davantage.

Pour optimiser l'utilisation des transformateurs et onduleurs, en particulier lorsque plusieurs sont disponibles, une gestion intelligente de la charge peut être mise en place. Cela implique de répartir la charge entre les différents équipements pour s'assurer que chacun fonctionne au plus près possible de sa charge optimale. Cette optimisation peut être réalisée grâce à une surveillance constante de la charge et à un ajustement en temps réel de la répartition de la charge entre les équipements.

Faire fonctionner ces équipements en dehors de leur plage de charge optimale peut réduire leur durée de vie, il est donc généralement préférable de les dimensionner correctement pour qu'ils fonctionnent le plus souvent possible à leur charge optimale. En ce sens, il est recommandé de consulter le manuel de l'utilisateur ou le fabricant pour obtenir des informations spécifiques sur la charge optimale de chaque appareil.

En résumé, il est essentiel d'ajuster la charge des transformateurs et des onduleurs en fonction de leur plage de charge optimale, afin de maximiser leur efficacité. Cela nécessite une gestion intelligente de la charge, qui prend en compte les variations de la demande d'énergie tout au long de la journée.

3.3.2 Panneaux de signalisation

La consommation unitaire d'un panneau de signalisation est relativement peu élevée. Le nombre d'équipements de ce type installés en tunnel (Illustration 24) peut cependant être élevé, avec un fonctionnement permanent pour la plupart. La consommation électrique de leur ensemble peut ainsi représenter un volume non marginal.



Illustration 24 : Panneau lumineux pour limitation de vitesse dans un tunnel (crédit photo : CETU)

Pour cette raison, le remplacement des panneaux existants par des panneaux à LED à faible consommation d'énergie peut permettre de réaliser des économies sensibles.

3.3.3 Serveurs et automates

Les serveurs et les automates sont des équipements qui fonctionnent en permanence à un niveau de sollicitation en général élevé.

L'adoption de serveurs et d'automates à faible consommation peut ainsi contribuer à une diminution non négligeable de la consommation d'énergie.

4

PROPOSITION D'UNE DÉMARCHE GÉNÉRALE DE SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE EN TUNNEL

Les mesures proposées dans les chapitres précédents permettent à tout exploitant de tunnel routier qui le souhaite de disposer d'une première liste d'actions susceptibles de réduire sa consommation électrique, et d'un cadre pour les mettre en œuvre.

Pour les exploitants qui souhaitent aller au-delà et s'engager dans un véritable processus de sobriété énergétique à plus long terme, afin d'obtenir des gains supplémentaires de consommation d'énergie, ce chapitre propose une démarche d'action complète. Cet engagement nécessite en effet une approche rigoureuse, afin de concilier économie d'énergie, sécurité et efficacité.

La démarche repose sur plusieurs étapes, dont une évaluation de la situation initiale afin de détecter les postes de réduction possibles, puis une étape d'étude de définition des mesures de réduction, une étape de mise en œuvre de ces mesures, et enfin une étape de suivi et d'évaluation de leur efficacité.

Au-delà de ces cinq étapes, la formation et la sensibilisation des personnels permettront de consolider la démarche, qui doit s'accompagner d'une veille permanente en matière d'innovations technologiques.

4.1 ÉVALUATION DE LA SITUATION INITIALE

Une démarche globale de sobriété énergétique commence par une évaluation approfondie de la situation initiale.

Il est en effet primordial de réaliser un diagnostic préalable afin d'identifier les postes de consommation les plus gourmands en énergie.

Le diagnostic complet permet de définir, pour un tunnel donné, les équipements à traiter en priorité. Pour les exploitants gestionnaires de plusieurs tunnels, la confrontation des diagnostics de chacun de leurs tunnels permet d'orienter les actions vers les tunnels dotés des plus forts enjeux.

Ce diagnostic doit être particulièrement complet pour le système d'éclairage, avec des mesures des niveaux d'éclairage complétées par des mesures de luminance, afin de vérifier les performances du système par rapport au dimensionnement initial.

À ce stade, aucune famille d'équipements ne devra toutefois être négligée. Si chaque famille ne dispose pas de compteur d'énergie individuel, les données de la GTC peuvent éventuellement

permettre de fournir des informations sur leur consommation. Lorsque la GTC n'a pas été conçue pour offrir cette fonctionnalité, le travail risque toutefois d'être long, car nécessitant une analyse plus ou moins complexe des données enregistrées. Il peut ainsi s'avérer pertinent de s'appuyer sur des bureaux d'études spécialisés ou sur les prestataires des marchés de maintenance des équipements. Dans tous les cas, la méthode la plus précise pour évaluer les consommations électriques de chaque famille d'équipements consiste à équiper de centrales de mesure et d'acquisition – soit pour une durée limitée, soit de façon permanente – les sorties des TGBT (Tableaux Généraux Basse Tension) de chaque famille d'équipements¹³.

En complément des mesures, la phase de diagnostic n'exclut pas l'observation directe du fonctionnement de l'ouvrage, qui peut facilement révéler certaines anomalies de fonctionnement. Par exemple, les durées et périodes de fonctionnement des équipements de ventilation peuvent alerter sur une consommation anormale (ventilation sanitaire en dehors des périodes de pointe par exemple).

4.2 DÉFINITION DES MESURES DE RÉDUCTION À METTRE EN ŒUVRE

En s'appuyant sur le diagnostic, des études doivent être menées pour la définition des mesures de réduction retenues par l'exploitation, qu'il s'agisse des mesures proposées dans ce document au chapitre précédent, qu'il faudra adapter à chaque cas précis, ou bien d'autres mesures plus spécifiques identifiées grâce au diagnostic, dont le contenu devra être entièrement défini.

Dans un cas comme dans l'autre, toute mesure envisagée doit faire l'objet d'une étude technique complète, réalisée par un technicien compétent, car, comme cela a été montré,

des calculs de dimensionnement peuvent être nécessaires et il est indispensable de définir avec précision les modifications à apporter aux installations, les caractéristiques précises des nouveaux équipements à installer le cas échéant, et les modes de pilotage associés lorsque cela est nécessaire.

La définition des mesures de réduction doit respecter scrupuleusement la réglementation et les règles de l'art, et ne doit en aucun cas conduire à engager la sécurité des usagers et des personnels intervenant en tunnel en dessous des niveaux requis.

13. En 2022, à titre indicatif, le budget à prévoir (hors installation) pour un système complet comprenant des centrales de mesures et des unités de stockage pour l'acquisition et l'enregistrement des données sur une vingtaine de dépôts et sur une période d'un an était estimé entre 8 000 et 10 000 €.

4.3 MISE EN ŒUVRE DES MESURES DE RÉDUCTION

La mise en œuvre des mesures de réduction doit faire l'objet du même soin que celui à apporter à tous les travaux d'équipements de sécurité des tunnels.

La qualité des matériels fournis et leur conformité au cahier des charges doivent être vérifiées. La bonne exécution de leur installation, ainsi que leur bonne intégration dans les systèmes existants doivent également être contrôlées.

Toute modification effectuée doit faire l'objet d'essais et de contrôles, incluant des tests de non-régression, et d'une réception formelle.

Une marche à blanc pourra être nécessaire, et selon les modalités de contractualisation et la nature des travaux, les modalités de garantie et de vérification de service régulier devront être définies.

4.4 SUIVI ET ÉVALUATION DES MESURES

Une fois les mesures de réduction mises en œuvre, il est essentiel de mettre en place un dispositif de suivi pour évaluer l'impact des modifications apportées aux systèmes. Les résultats collectés fourniront des informations précieuses sur l'efficacité des actions engagées et guideront les ajustements futurs.

En complément, des calculs simples de consommations d'énergie à effectuer de façon analogue à ceux présentés aux paragraphes 3.1.10 et 3.2.7 pourront aider à affiner la stratégie d'optimisation dans le cadre d'une démarche d'amélioration continue.

4.5 FORMATION ET SENSIBILISATION

La sensibilisation et la formation du personnel sont cruciales pour pérenniser les efforts déployés. Il est donc nécessaire de prévoir des actions en ce sens, afin d'informer et de

former sur les bonnes pratiques en matière d'économie d'énergie et sur les techniques innovantes adoptées le cas échéant.

4.6 VEILLE TECHNOLOGIQUE ET INNOVATION

Il est enfin fortement recommandé de suivre de près les évolutions technologiques et les meilleures pratiques dans le

domaine de l'économie d'énergie. Cette veille active peut ouvrir d'autres opportunités conduisant à plus de sobriété.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les mesures présentées dans ce document constituent une base sur laquelle chaque exploitant de tunnel routier peut s'appuyer afin de bâtir un plan d'actions lui permettant de s'engager rapidement dans une démarche de réduction de la consommation énergétique de son ou ses ouvrages.

Pour que cette démarche soit efficace, il est important de réaliser un diagnostic initial afin que les actions soient engagées sur des postes procurant des gains significatifs, et qu'en aucun cas les moyens engagés ne soient disproportionnés par rapport aux gains attendus. Des calculs – même simples, comme ceux montrés dans les tableaux 1 et 2 –, sont conseillés, afin d'estimer le potentiel de réduction.

Au-delà de la mise en œuvre de premières mesures de réduction de la consommation, une méthode destinée à aider les exploitants à s'engager dans une démarche de sobriété énergétique à plus long terme est également proposée. Elle repose sur plusieurs étapes allant d'un diagnostic initial complet à une évaluation de l'efficacité des mesures engagées.

Certaines des mesures présentées dans ce document sont applicables immédiatement, et d'autres en sont encore au stade de la recherche. Ces dernières sont toutefois mentionnées, au moins à titre informatif, car elles peuvent orienter les exploitants qui souhaiteraient s'engager dans l'expérimentation de nouvelles dispositions techniques.

Le développement, l'adoption et l'intégration d'innovations technologiques sont un moteur essentiel d'amélioration de la performance énergétique. Plusieurs de ces innovations sont présentées dans ce document, et le CETU contribue lui-même au développement de certaines solutions, dans le cadre de son programme de recherche.

En matière d'éclairage, le CETU pilote par exemple le projet DELTA qui a pour objectif d'évaluer les gains que peuvent

apporter les sources de type LED. Cette expérimentation, qui a lieu dans un tunnel existant, non exploité, de la DIR Île-de-France, et associée de nombreux partenaires, devrait permettre de faire avancer collectivement le sujet et de consolider la doctrine de l'éclairage des tunnels routiers.

Il est également prévu de réaliser une étude d'évaluation des impacts économiques et environnementaux du choix du type de chaussée – sombre, éclaircie ou claire – à travers l'influence de ce choix sur le dimensionnement de l'éclairage. Il existe en effet une forte attente de la part des maîtres d'ouvrage et exploitants quant à l'intérêt d'une chaussée claire dans le cas d'un éclairage LED.

Le CETU réalise aussi actuellement des tests sur la fiabilité de la détection des véhicules dans les tunnels, afin de vérifier la faisabilité technique de l'activation d'une installation d'éclairage uniquement en cas de présence d'usagers. Cette disposition pourrait être appliquée uniquement dans les tunnels à très faible trafic.

Dans le domaine de la ventilation, le CETU poursuit l'étude de l'efficacité des écrans de cantonnement en plafond de tunnels pour améliorer la stratification des fumées, car ils pourraient conduire à une réduction importante de la puissance requise pour le désenfumage, offrant ainsi une option intéressante pour les nouvelles installations ou les rénovations de systèmes existants.

Enfin, pour aller au-delà du seul sujet de la consommation énergétique en phase d'exploitation, plusieurs travaux de recherche sont actuellement menés afin de mieux évaluer, en vue de les réduire, les impacts environnementaux de la construction et l'exploitation des tunnels. Ces travaux en cours s'appuient sur des indicateurs tels que la pollution, la consommation d'eau ou l'épuisement des ressources, les impacts liés à la phase de fabrication et ceux liés à la fin de vie des équipements.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ministère de l'Intérieur et ministère de l'Équipement, Annexe 2 de la circulaire interministérielle n°2000-63 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national, 25 août 2000.
- [2] CETU, *Dossier Pilote Éclairage*, 2000.
- [3] DGS/VS3, Circulaire n°99-329 relative aux recommandations du Conseil supérieur d'hygiène publique de France, section milieux de vie, sur la qualité de l'air dans les ouvrages souterrains ou couverts, 8 juin 1999.
- [4] CETU, *Les dossiers pilotes du Cetu – Fascicule Ventilation*, 2003.
- [5] D. Talon, CETU, *Éclairage à LED des tunnels routiers : étude de l'influence de la luminance et de la température de couleur sur la visibilité, modélisation de scénarios d'éclairage adaptatif économes en énergie asservis aux conditions environnementales et au trafic*, Thèse de doctorat, 2022.
- [6] CETU, *La détection et le contrôle du dioxyde d'azote dans les tunnels routiers*, 2017.
- [7] CETU, Annexe C du *Guide de l'application de l'ITSEOA – Fascicule 40*, 2012.
- [8] F. Chaabat, M. Creyssels, A. Mos, J. Wingrave, H. Correia, M. Marro, P. Salizzoni, *The effects of solid barriers and blocks on the propagation of smoke within longitudinally ventilated tunnels*, Build. & Environ. 160, août 2019.
- [9] F. Chaabat, P. Salizzoni, M. Creyssels, A. Mos, J. Wingrave, H. Correia, M. Marro, *Smoke control in tunnel with a transverse ventilation system : An experimental study*, Build. & Environ. 167, janvier 2020.

PILOTAGE DE LA RÉDACTION

Marouane YAGHZAR

CONTRIBUTEURS

Julien AUDRAIN, Séverine BESSON, Jean-François BURKHART, Éric CHARLES, Antoine MOS, Bruno VIDAL et Marouane YAGHZAR ont participé à l'élaboration de ce document.

Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand
69500 BRON - FRANCE
Tél. +33 (0)4 72 14 34 00
Fax. +33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

