

Ministère
de l'Écologie
du Développement
et de l'Aménagement
durables

direction
des Routes

Centre d'Etudes
des Tunnels

Cetu

CHAUSSÉES BITUMINEUSES CLAIRES ET ÉCLAIRCIES EN TUNNEL

Caractéristiques & Intérêt économique

CETU

25 avenue François
Mitterrand
Case n°1

69674 BRON Cedex

tél. : 04 72 14 34 00

mél.

cetu@equipement.gouv.fr

Jean - Marie APVRILLE
Jean - Claude MARTIN

14 octobre 2004

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
0 OBJET DU RAPPORT.....	7
1 GÉNÉRALITÉS	8
1.1 – STRUCTURE D’UNE CHAUSSÉE.....	8
Figure 1 : vue en coupe transversale de la structure d'une route.....	8
1.2 - COMPOSANTS DE LA COUCHE DE ROULEMENT.....	9
1.2.1 - Les granulats.....	9
1.2.2 - Les liants.....	9
1.2.2.1 - Les bitumes.....	9
a) Vieillissement.....	9
b) Bitumes modifiés.....	10
c) Bitumes de synthèse.....	10
d) Les émulsions de bitume.....	10
1.2.2.2 - Les liants hydrauliques.....	10
1.2.3 - Les différents types de couche de roulement.....	10
1.2.3.1 - Les enrobés à chaud ou bétons bitumineux (BB).....	10
1.2.3.2 - Les enduits superficiels (ES).....	11
1.2.3.3 – Les enrobés coulés à froid (ECF).....	11
1.2.3.4 – Revêtements en béton de ciment.....	11
1.2.3.5 – Réglementation sur le revêtement.....	12
1.3 – CARACTÉRISTIQUES DE SURFACE D'UNE CHAUSSÉE.....	12
1.3.1 – Adhérence.....	12
1.3.1.1 Description.....	12
1.3.1.2 Quantification de l'adhérence.....	12
a) Le coefficient de frottement longitudinal.....	12
b) Le coefficient de frottement transversal.....	12
1.3.1.3 - Adhérence et microtexture.....	13
1.3.1.4 - Adhérence et macrotexture.....	13
1.3.1.5 - Entretien de l'état de surface.....	14
1.3.2 – Réglementation.....	14
1.4 – PHOTOMÉTRIE DE LA CHAUSSÉE.....	15
1.4.1 - Généralités.....	15
1.4.2 - Classification selon la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).....	15
1.4.3 – Caractérisation de la clarté d'une chaussée.....	16
1.5 – LE BRUIT.....	17

2 – SPÉCIFICITÉS DES CHAUSSÉES EN TUNNEL	18
2.1 – MISE EN ŒUVRE EN TUNNEL	18
2.2 – DURÉE DE VIE DE LA CHAUSSÉE EN TUNNEL	18
2.3 – L'ADHÉRENCE EN TUNNEL	19
2.4 – LE BRUIT EN TUNNEL	19
2.5 – PHOTOMÉTRIE	19
3 - CHAUSSÉES CLAIRES ET ÉCLAIRCIES EN TUNNEL.....	20
3.1 – LES DIFFÉRENTS TYPES DE CHAUSSÉE.....	20
3.2 - INTÉRÊT PHOTOMÉTRIQUE (ET DONC ÉCONOMIQUE) DE CES CHAUSSÉES.....	20
3.3 – LES CHAUSSÉES CLAIRES.....	22
3.3.1 - <i>Le bitume clair</i>	22
3.3.2 – <i>Choix des granulats pour une chaussée claire</i>	23
3.3.3 – <i>Coûts</i>	23
3.3.3.1 – <i>Coûts en sortie de centrale</i>	23
3.3.3.2 – <i>Précautions spécifiques et coûts induits</i>	24
3.3.3.3 – <i>Revêtements types adaptés aux produits clairs</i>	25
3.3.4. – <i>Réparabilité</i>	25
3.3.5. – <i>Adhérence</i>	26
3.3.6 – <i>Pérennité des performances photométriques</i>	26
3.3.7 – <i>Cas des chaussées en béton</i>	27
3.4 - CHAUSSÉES ÉCLAIRCIES	27
3.4.1. – <i>Les granulats clairs</i>	27
3.4.2. – <i>Revêtements types et coût au m²</i>	28
3.4.3. – <i>Réparabilité</i>	28
3.4.4. – <i>Adhérence</i>	28
3.4.5 – <i>Décapage : Grenailage ou hydrodécapage</i>	28
3.4.6 - <i>Performances photométriques</i>	28
3.5. –CAS DES REVÊTEMENTS CLAIRS SOUS LES TUNNELS DE L'A8	29
Photométrie	29
Adhérence	30
4 – ANALYSE ÉCONOMIQUE GLOBALE	31
4.1 – DÉMARCHE RETENUE	31
4.1.1 – <i>Principe</i>	31
4.1.2 – <i>Application</i>	31
CARACTÉRISTIQUES DE L'OUVRAGE TYPE ÉTUDIÉ	32
PERFORMANCES PHOTOMÉTRIQUES À ATTEINDRE	32

(VOILES MOYENS À 90 KM/H)	32
SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE RETENUS	32
TYPES DE SOURCES LUMINEUSES	32
IMPLANTATION DES LUMINAIRES	32
PERFORMANCES DES LUMINAIRES	32
TYPES DE CHAUSSÉE.....	32
CALCUL D'UNE SOLUTION OPTIMISÉE POUR CHAQUE CAS	32
4.3 – PRÉSENTATION DES SOLUTIONS.....	33
4.4 – DONNÉES RETENUES ET CALCULS EFFECTUÉS POUR CHAQUE CAS	34
4.4.1 – <i>Investissement initial en couche de roulement (Cch)</i>	34
4.4.2 – <i>Coût de l'installation d'éclairage (Cinstall)</i>	34
4.4.3 – <i>Coût de fonctionnement annuel (Cfonc)</i>	35
4.4.4 – <i>coût global (C)</i>	37
5 – RÉSULTATS DES CALCULS ÉCONOMIQUES	38
5.1 –SOLUTIONS RETENUES (DÉTAILS EN ANNEXE 3.3).....	38
5.2 – RESULTATS	39
5.2.1 - <i>Coûts d'investissement</i>	39
5.2.1.1 – En éclairage à contre-flux	39
5.2.1.2 – En éclairage symétrique	39
5.2.2 - <i>Coûts d'exploitation</i>	40
5.2.2.1 – En éclairage à contre-flux	40
5.2.2.2 – En éclairage symétrique	40
5.2.2.3 – Tableau de synthèse	41
5.2.3 - <i>Parts respectives entre l'investissement et l'exploitation sur 20 ans</i>	41
5.2.4 – <i>Coûts globaux : Investissement + exploitation sur 20 ans</i>	42
5.3 – ÉTUDE DE SENSIBILITÉ	45
5.3.1 – <i>Influence de la longueur</i>	45
5.3.1.1 – Avec un renforcement en contre-flux	45
5.3.1.2 - Avec un renforcement en symétrique	45
5.3.1.3 – Tableau de synthèse (exemple d'un tunnel de 3000 m)	46
5.3.2 – <i>Influence du coût de la chaussée claire ou éclaircie</i>	47
5.3.2.1 - Avec un éclairage à contre-flux.....	47
5.3.2.2 – Avec un éclairage symétrique	49
6 – CONCLUSIONS GÉNÉRALES	50
6.1 - <i>Les 3 premiers chapitres</i>	50
6.2 - <i>Les chapitres 4 et 5</i>	50

ANNEXE 1 CARACTÉRISTIQUES PHOTOMETRIQUES DES CHAUSSEES ETUDIEES52

CARACTÉRISTIQUES PHOTOMÉTRIQUES MESURÉES.....	52
Chaussées claires	52
L'ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DES CHAUSSÉES CLAIRES DANS LE TEMPS,.....	52
ANNEXE 2 HYPOTHÈSES ET COÛTS RETENUS	54
1 – PRESCRIPTIONS CONCERNANT L'INSTALLATION.....	54
1.1 Types de chaussées.....	54
1.2 Types de tunnels	54
1.3 Configurations et niveaux d'éclairage.....	54
2 – LES SOURCES.....	55
3 – LES COÛTS	56
3.1 - Coût des chaussées claires.....	56
3.2 - Prix des luminaires et des sources	56
3.3 - Coût d'entretien	57
3.4 - Durée de vie de la chaussée.....	57
ANNEXE 3 : LES CALCULS	58
3.1 - DESCRIPTION DES CALCULS	58
3.1.1 - Calculs photométriques	58
3.1.2 - Calculs économiques	58
ANNEXE 3.2.....	60
DONNÉES DE CALCUL	60
CALCULS PHOTOMÉTRIQUES POUR CHAQUE TYPE DE CHAUSSÉE	60
ANNEXE 3.3.....	65
DÉTAILS DES COÛTS GLOBAUX SUR 20 ANS POUR CHAQUE TYPE DE CHAUSSÉE	65
ANNEXE 3.4.....	70
3.4.1 -COMPARAISON ÉCONOMIQUE GLOBALE POUR UN TUNNEL DE 1000 MÈTRES.....	70
3.4.2 –TABLEAUX ANALOGUES AUX PRÉCÉDENTS EN DISTINGUANT ÉCLAIRAGE SYMÉTRIQUE ET ÉCLAIRAGE À CONTRE-FLUX.....	71
ANNEXE 3.5.....	72
INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL AVEC UNE CHAUSSÉE CLAIRE À 19€ H.T./M ²	72
ANNEXE 3.6.....	73
INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL AVEC UNE CHAUSSÉE CLAIRE À 12,10€ H.T./M ² ...	73

ANNEXE 3.7	74
INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL, ÉCLAIRAGE À CONTRE-FLUX ET CHAUSSÉE CLAIRE À 19 € /M ²	74
INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL, ÉCLAIRAGE SYMÉTRIQUE ET CHAUSSÉE CLAIRE À 19 € /M ²	74
INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL ÉCLAIRAGE À CONTRE-FLUX ET CHAUSSÉE CLAIRE À 10,50 € /M ²	75
INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL ÉCLAIRAGE SYMÉTRIQUE ET CHAUSSÉE CLAIRE À 10,50 € /M ²	75
ANNEXE 3.8	77
PARTS DES COÛTS D'INVESTISSEMENT DANS LES COÛTS GLOBAUX D'EXPLOITATION SUR 20 ANS	77
ANNEXE 4 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES CHAUSSÉES DE L'AUTOROUTE A8	79
CHAUSSÉES CLAIRES EN TUNNEL SUR L'AUTOROUTE A8 PRÈS DE NICE	79

0 OBJET DU RAPPORT

Ce rapport a pour objet de caractériser les chaussées bitumineuses claires et éclaircies¹ en tunnel et d'apprécier leur intérêt économique.

Ce rapport comporte 4 parties :

- La première est consacrée aux généralités sur les chaussées depuis la structure et les composants jusqu'aux caractéristiques de surface, y compris la photométrie.
- La seconde partie aborde les spécificités de mise en œuvre et de durée de vie dans un tunnel, ainsi que celles concernant l'adhérence et la photométrie.
- La troisième partie présente de manière détaillée les caractéristiques principales des chaussées claires et éclaircies en tunnel.
- La dernière partie a pour objet d'évaluer l'intérêt économique des chaussées claires et éclaircies en tunnel

Les chaussées claires requièrent des niveaux d'éclairage en entrée et en section courante moindres que ceux nécessaires au dessus d'une chaussée classique noire ; par contre une chaussée claire coûte plus chère qu'une chaussée classique.

Un groupe de travail constitué entre le LCPC³; le CETU et deux fabricants de luminaires⁴ pour tunnel a donc réalisé des calculs pour comparer les coûts de fourniture et pose de différents types de chaussée en tunnel (couche de roulement) ajoutés à ceux de l'installation d'éclairage mis en œuvre et de son entretien sur une période de 20 ans.

Les niveaux de luminance et d'uniformité à atteindre pour les deux systèmes d'éclairage utilisés en tunnel, symétrique et contre-flux, ont été fixés par le CETU.

Pour différentes implantations (latérale et au-dessus des voies) et pour deux types de sources lumineuses (fluorescent et sodium haute-pression) les fabricants de luminaires ont défini des solutions d'éclairage optimisées. Ces solutions ont été calculées avec sept sortes de revêtements différents :

- trois chaussées types issues de la classification CIE (R₁, R₂, R₃),
- une chaussée avec des granulats clairs (ayant subi un décapage du liant par grenailage),
- une chaussée avec des granulats clairs (ayant subi un décapage du liant par hydro-décapage),
- deux chaussées claires (COCLAIR et GERCHROME).

Les caractéristiques photométriques des revêtements types de la CIE sont normalisées ; pour les autres revêtements, les valeurs sont issues de mesures goniophotométriques faites par le LCPC sur des échantillons. Il faut noter que le revêtement R₂ est très représentatif des chaussées que l'on trouve dans la majorité des tunnels routiers français : les résultats obtenus avec ce revêtement seront donc utilisés comme référence.

Ensuite, pour chaque solution, le coût d'investissement (installation d'éclairage et chaussée) et le coût de fonctionnement (consommation et entretien) actualisé sur 20 ans, ont été calculés.

¹ Le plus souvent la couche de surface d'une chaussée est en béton bitumineux très sombre (chaussée dite noire). Toutefois avec des granulats clairs et un enrobé classique la chaussée sera dite « éclaircie », et avec des granulats clairs et un enrobé clair la chaussée sera dite « claire »

² Dans ce rapport, le vocable « chaussée » désigne uniquement la couche de roulement.

³ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

⁴ Les sociétés COMATELEC et PHILIPS

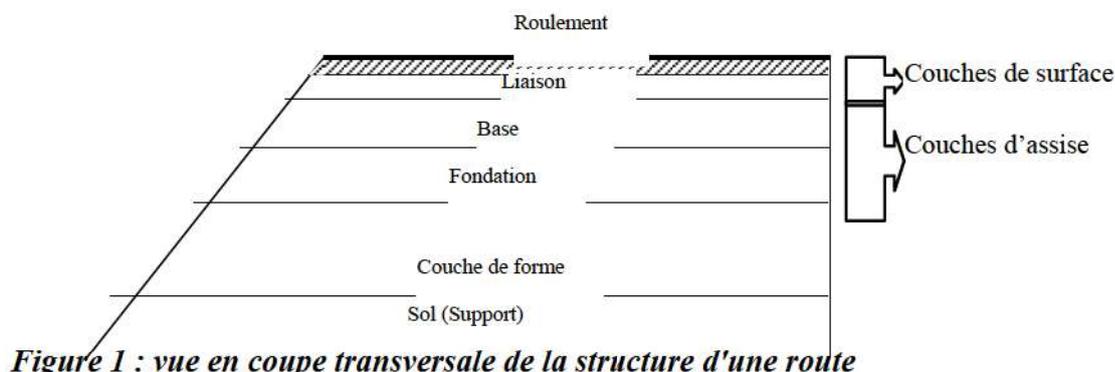
En ajoutant le coût d'investissement au coût de fonctionnement actualisé, on obtient un coût total pour chaque solution ; on peut alors comparer les diverses solutions entre elles.

1 GENERALITES

1.1 – Structure d'une chaussée

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches mises en œuvre sur une plate-forme support de chaussée, constituée du sol terrassé, dit sol support, le plus souvent surmonté d'une couche de forme.

La couche de forme ne fait pas partie de ce qu'on appelle la chaussée. Cependant, elle protège le sol support, contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier. Elle homogénéise également les caractéristiques du sol terrassé et le protège du gel.



La chaussée proprement dite est constituée par l'assise et la couche de surface :

- L'assise comprend deux couches, la couche de fondation et la couche de base. Ces couches en matériaux élaborés, le plus souvent liés (avec du bitume ou des liants hydrauliques), apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur la plate-forme support, afin de maintenir les déformations de celle-ci dans les limites admissibles.
- La couche de surface est constituée de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison, sauf en cas de chaussée en béton où seule une couche suffit. La couche de roulement est le revêtement de la route, sur lequel s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Ses caractéristiques de surface doivent lui permettre d'assurer les fonctions suivantes :
 1. avoir une bonne étanchéité : elle doit maintenir l'intégrité de la structure par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels de déverglaçage,
 2. limiter le bruit de roulement,
 3. présenter une surface plane et confortable (un bon uni), et donc résister à l'orniérage,
 4. limiter les projections d'eau,
 5. offrir une bonne adhérence,
 6. présenter de bonnes caractéristiques photométriques.

Les quatre dernières fonctions sont primordiales pour la sécurité des usagers.

1.2 - Composants de la couche de roulement

La couche de roulement est constituée par des granulats (cailloux, sables et éléments très fins) et par un liant (bitume ou ciment) dont le rôle premier est de les agglomérer durablement.

1.2.1 - Les granulats

Les granulats sont majoritaires et représentent entre 93 % et 96 % du poids de la couche de roulement. Ils sont classés selon leur diamètre. Pour être compacte, une couche de roulement est constituée de toutes les tailles de granulats possibles, depuis le plus fin, jusqu'au plus gros qu'on s'est fixé. Par exemple, on dit d'une couche de roulement dont le plus gros diamètre de granulats est 10 mm qu'elle est de granularité 0/10. Lorsqu'on désire une couche de roulement moins compacte et plus poreuse, on supprime une classe granulaire. Par exemple, on dit d'une couche de roulement dont le plus gros diamètre de granulats est 10 mm et qui ne renferme pas de granulats dont la taille varie entre 4 et 6 mm qu'elle est de granularité 0/10, discontinue 4/6.

Les gravillons ont des caractéristiques intrinsèques données par la nature de la roche dont ils proviennent. Les contraintes auxquelles sont soumises les couches de chaussée se concentrent dans les granulats qui sont plus rigides que le liant. Leur résistance mécanique est donc un critère très important pour les caractéristiques de surface du revêtement.

Aucune classification n'existe sur la couleur des granulats, ou sur leur clarté. Ainsi, la notion de granulat clair manque de précision alors qu'elle est déterminante pour la clarté des revêtements. Il serait donc utile de procéder à un classement quantitatif des granulats suivant leur clarté afin de contourner la subjectivité de l'œil humain.

1.2.2 - Les liants

Le liant représente entre 4 et 7 % du poids total du revêtement. Il assure la cohésion des granulats et joue un rôle important dans la résistance mécanique du revêtement. Il peut être de deux sortes :

- ❑ hydrocarbonés composés essentiellement d'hydrocarbures et appartenant à la famille générale des liants organiques ; de nos jours, il est utilisé *les bitumes* qui sont produits en raffinerie, en général à partir de la distillation du pétrole.
- ❑ hydrauliques doivent leur nom au rôle primordial joué par l'eau dans le processus de prise dont le représentant principal est le *ciment*.

1.2.2.1 - Les bitumes

Les bitumes sont de couleur noire et se présentent, à température ordinaire, comme des liquides visqueux ou des solides susceptibles de fluer. Il s'agit de mélanges très complexes d'hydrocarbures constituant un milieu colloïdal où la partie la plus lourde -les asphaltènes- est dispersée en micelles dans un mélange d'huiles et de résines appelées maltènes. Les asphaltènes sont à l'origine de la couleur noire et d'une partie de la dureté du bitume. Elles représentent environ 15 % de sa composition.

a) Vieillessement

Les bitumes vieillissent et perdent leurs caractéristiques : ils deviennent moins élastiques et finissent par se fissurer sous les contraintes. Le vieillissement des bitumes est dû principalement à l'oxydation par l'air, accélérée par le rayonnement solaire (ultraviolets).

b) Bitumes modifiés

Lorsque le trafic et le climat sont très agressifs et qu'un bitume pur, même très dur, ne suffirait pas à éviter l'orniérage, on peut utiliser un bitume modifié. Un bitume modifié est un bitume pur

auquel on a ajouté des produits pour améliorer son comportement dans le sens voulu. Les additifs les plus couramment utilisés sont des élastomères ou des plastomères tels que le SBS (Styrène - Butadiène - Styrène) ou l'EVA (Ethylène - Vinyle - Acétate). Les bitumes purs peuvent également être modifiés par de la poudre de caoutchouc récupérée des pneumatiques usés, par des fibres minérales, ou encore des déchets de câbles électriques. Le but de ces ajouts est de rendre le bitume moins fragile à basse température (- 10 à - 20° C), et plus rigide à température élevée (50 à 60° C).

c) Bitumes de synthèse

Les bitumes de synthèse sont des produits issus de la chimie du pétrole. Ils sont "fabriqués de toutes pièces" à partir de bases et permettent la confection de revêtements colorés, tout en conservant de bonnes caractéristiques routières.

d) Les émulsions de bitume

Pour être appliqué à froid, le bitume peut être mélangé à l'eau sous forme d'émulsion. Le liant colle aux granulats lors de la rupture de l'émulsion, c'est-à-dire lorsque, au contact des granulats, l'eau se sépare du bitume et s'écoule ou s'évapore.

1.2.2.2 - Les liants hydrauliques

Le principal liant hydraulique est le ciment pour chaussées en béton.

Les liants hydrauliques sont rarement utilisés pour les couches de roulement du fait des contraintes de mise en œuvre et du prix élevé de cette technique.

Ils sont cependant davantage utilisés pour la construction des assises.

1.2.3 - Les différents types de couche de roulement

Il existe de nombreux types de matériaux différents pouvant être employés en couche de roulement. Ils se distinguent par la nature du liant (bitume, ciment), par leur formulation et par leur mode de mise en œuvre.

1.2.3.1 - Les enrobés à chaud ou bétons bitumineux (BB)

Cette technique est la plus courante. Elle utilise le fait que le bitume est sous forme liquide à des températures de l'ordre de 140 à 160° C, et peut alors être mélangé avec des granulats déshydratés et chauffés aux mêmes températures afin d'être bien enrobés par le bitume.

Ci-dessous figurent les enrobés les plus couramment utilisés :

- Les Bétons Bitumineux Semi Grenus (BBSG) : ce sont des enrobés à chaud mis en œuvre entre 5 et 9 cm d'épaisseur. Leur formulation est caractérisée par une granulométrie continue de taille 0/10 ou 0/14, et un dosage en liant d'environ 6 %. Ces enrobés ont été largement utilisés mais ont posé des problèmes d'orniérage sous fort trafic.
- Les Bétons Bitumineux Drainant (BBDr) : ils sont caractérisés par une très forte discontinuité : ils ont une faible teneur en sable (10 à 12 %) et donc en bitume (entre 4,5 et 5 %), au profit d'une forte proportion de gravillons 4/6, 6/10 ou 10/14 suivant la granulométrie désirée. Il en résulte une grande proportion de vides communicants dans lesquels l'eau peut circuler. L'intérêt de ces enrobés à l'air libre est de limiter voire supprimer les projections d'eau par temps de pluie.

Mais ils sont interdits en tunnel du fait qu'il retiennent les hydrocarbures et matières dangereuses pouvant se déverser sur la chaussée, sans que celles-ci puissent éventuellement s'évaporer comme cela peut se produire à l'air libre, d'où des dangers potentiels accrus en

tunnel, et une baisse. Cependant, ces enrobés posent des problèmes de viabilité hivernale, de colmatage et rapide de l'adhérence après mise ne service à faible vitesse.

- Les Bétons Bitumineux Minces (BBM) : Ce sont des enrobés à chaud mis en œuvre entre 2,5 et 5 cm pour une taille et une taille de gravillons 0/10 ou 0/14)
- Les Bétons Bitumineux Très Minces (BBTM) : ce sont des enrobés à chaud mis en œuvre entre 1,5 et 2,5 cm d'épaisseur. La granulométrie est soit 0/6 soit 0/10. Leur formulation est caractérisée par une forte discontinuité (2/4 ou 4/6), le mélange étant constitué par environ 35 % de sable 0/2, 60 % de gravillons 6/10 ou 4/6 et 5 à 6 % de bitume modifié. Les gravillons se retrouvent enrobés par un mastic bitumeux constitué par le liant et les éléments fins du sable. Ils sont collés les uns aux autres par ce mastic et résistent très bien à l'arrachement grâce au bitume modifié.
- Les Bétons Bitumineux Ultra Minces (BBUM) : ils ont les mêmes caractéristiques que les BBTM avec une épaisseur moins importante de 1 à 2 cm.
-

Les BBTM et BBUM se comportent très bien sous fort trafic, notamment sur les autoroutes. Leur faible épaisseur d'application ne leur permet pas un apport structurel à la chaussée ni un rattrapage de l'uni. Ils sont en fait des produits dont le prix de revient au mètre carré est un des plus faibles. Ces deux points forts expliquent qu'ils sont les plus utilisés sur le réseau français.

1.2.3.2 - Les enduits superficiels (ES)

Les enduits superficiels se distinguent des enrobés par leur mise en œuvre. Un enduit se met en œuvre de la façon suivante :

1. un camion citerne répand un film de liant sur le support,
2. un deuxième camion répand alors les granulats sur la couche de liant,
3. un compacteur à pneus vient enfoncer les granulats dans le liant.

Les étapes 1 et 2 peuvent être répétées si l'on veut un enduit bi-couche. Les enduits superficiels sont inutilisables quand le trafic devient lourd. Ils sont très rugueux et provoquent un bruit de roulement important.

1.2.3.3 – Les enrobés coulés à froid (ECF)

Les enrobés coulés à froid sont des mélanges bitumineux réalisés avec une émulsion de bitume. Ils sont appliqués par une machine spéciale, en consistance fluide à température ambiante et sur une épaisseur très faible (0,5 à 1,5 cm). Leur utilisation est limitée par le trafic poids lourds, ainsi que par le bruit important qu'ils provoquent. De plus, l'aspect de surface est moins homogène que celui obtenu avec un enrobé à chaud : on observe des traces de peignage.

1.2.3.4 – Revêtements en béton de ciment

Les chaussées en béton ont la particularité de servir à la fois de couche de base et de couche de roulement. Le béton est coulé à même la fondation, soit en dalles goudonnées les unes aux autres, soit en continu (Béton Armé Continu BAC), la maîtrise de fissuration du béton étant assurée dans ce dernier cas par des armatures longitudinales. Cette dernière solution améliore le confort de conduite des usagers et elle est très employée depuis quelques années.

La mise en œuvre des chaussées béton se fait en continu par des machines à coffrage glissant. Avec une telle machine, sont regroupées en quelques mètres les opérations de répartition, serrage, moulage, et lissage. En sortie de machine, le béton est trop lisse : il doit être strié, clouté ou

dénudé chimiquement, afin de le rendre moins glissant. Finalement, pour éviter la dessiccation du béton frais, on l'enduit d'une résine étanche.

1.2.3.5 – Réglementation sur le revêtement.

Les différents types de revêtements (BBSG, BBTM, BBM ...) sont soumis à des normes produits. Celles-ci ne dictent pas une formulation obligatoire, mais fixent des fuseaux de valeurs à respecter (granulométrie, classes minimales des granulats, seuils admissibles de déformation permanente maximale du support) et définissent les produits par des niveaux de performances à obtenir au cours de différents essais.

1.3 – Caractéristiques de surface d'une chaussée

La couche de roulement est l'interface entre le véhicule et la chaussée. Ses qualités sont donc liées principalement aux caractéristiques de sa surface, c'est-à-dire l'adhérence, la photométrie et le bruit de roulement.

1.3.1 – Adhérence

1.3.1.1 Description

L'adhérence d'un revêtement correspond à sa capacité à mobiliser des forces de frottement entre les pneumatiques et la chaussée sous l'effet des sollicitations de la conduite. Elle s'oppose à la glissance.

Pour assurer une bonne sécurité, l'adhérence doit permettre au véhicule :

- de conserver sa trajectoire, en particulier dans les virages,
- de réduire les distances de freinage,
- de favoriser les manœuvres d'évitement ou de récupération d'une situation d'accident.

Le problème d'adhérence doit être examiné avec soin dans la situation défavorable qu'est la présence d'eau sur la chaussée.

1.3.1.2 Quantification de l'adhérence

La quantification de l'adhérence d'une chaussée se fait par la mesure de deux coefficients de frottement.

a) Le coefficient de frottement longitudinal

Le coefficient de frottement longitudinal (CFL) permet de quantifier le frottement pneu-chaussée lorsque celui-ci est sollicité pendant des freinages en ligne droite.

b) Le coefficient de frottement transversal

Le coefficient de frottement transversal (CFT) permet de quantifier le frottement pneu-chaussée lorsque celui-ci est sollicité dans des situations de virage ou de dérapage.

Ces deux coefficients décroissent lorsque la vitesse augmente :

- Le niveau N à basse vitesse est fonction du nombre de points de contact sec gomme-granulats : En cas de pluie, le film d'eau résiduel sur chaussée est rompu par la *microtexture de celle-ci*. (cf §1.3.1.3)

- La pente de décroissance p est fonction de la capacité d'évacuation de l'eau entre le pneumatique et le revêtement : Celle-ci est conditionnée par la *macrotexture de la chaussée* (cf §1.3.1.4)

1.3.1.3 - Adhérence et microtexture

Comme dit ci-dessus, la microtexture du revêtement détermine le niveau d'adhérence de la chaussée à basse vitesse.

La microtexture dépend des arêtes et aspérités de dimensions inférieures à 0,5 mm horizontalement et à 0,2 mm verticalement (figure suivante). Ces aspérités sont constituées par l'assemblage des grains de sable et du mortier, et par l'état de surface ou microrugosité des gravillons. Elles donnent au revêtement un aspect râpeux.

En cas de chaussée humide, c'est elle qui rompt la fine pellicule d'eau (environ 0,01 mm d'épaisseur) qui subsiste à sa surface pour offrir l'aire de contact sec la plus grande possible entre le pneu et la chaussée. La pression du pneu sur ces "micro-pics" devient alors suffisante pour chasser complètement l'eau à l'interface chaussée-pneu. Il s'établit alors une multitude de contacts secs, garants d'une bonne adhérence. Si la microtexture est trop faible, la zone de contact sec sous le pneu disparaît et c'est le viscoplanage.

La microtexture est d'autant plus forte que la granularité du revêtement est plus fine, que l'angularité et la résistance des gravillons au polissage par le trafic et à l'usure sont plus élevées, que la teneur en sables durs est plus importante.

Actuellement, il n'existe pas de méthode opérationnelle pour la mesure directe de la microtexture ; elle est appréciée par la valeur à faible vitesse du coefficient de frottement longitudinal.

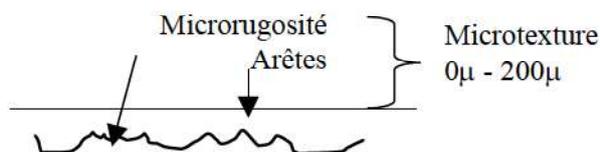


Figure 2 - Microtexture

1.3.1.4 - Adhérence et macrotexture.

Conjointement aux rainurages des pneus, le revêtement doit assurer l'évacuation de l'eau entre le pneumatique et la chaussée : c'est le rôle de la macrotexture qui conditionne l'adhérence à moyenne et à haute vitesse sur chaussée mouillée.

La macrotexture est caractérisée par les aspérités de dimensions comprises entre 0,5 et 50 mm horizontalement et entre 0,2 et 10 mm verticalement (figure 3). Ces aspérités entre les gravillons jouent le rôle de canaux d'évacuation et donnent au revêtement un aspect grenu. La macrotexture est d'autant plus grande que la granularité est plus grossière, que la discontinuité de la formule est plus grande, que la teneur en sable, et que le compactage sont plus faibles.

La macrotexture conditionne l'adhérence sur chaussée mouillée à moyenne et à haute vitesse. En effet, plus la vitesse augmente et plus le volume d'eau à évacuer dans le même laps de temps est important. Dans le cas d'une macrotexture trop faible, cette eau n'est plus évacuée assez rapidement : elle forme alors un bourrelet à l'avant et sous le pneu induisant l'hydroplanage (ou aquaplanage).

La macrotexture d'un revêtement évolue avec l'âge de ce dernier. Elle a tendance à devenir médiocre sous les effets conjugués du climat et du trafic. En effet, la chaleur, qui rend le bitume plus mou, la pollution (hydrocarbures, poussières), et la pression répétée des poids lourds provoquent l'indentation des gravillons dans le liant, l'orniérage, ou le ressuage du bitume. Ces phénomènes contribuent à boucher les vides de surface qui font la macrotexture du revêtement.

Par ailleurs, la macrotexture a un effet sur :

- les projections d'eau (évacuation de l'eau),
- les propriétés optiques du revêtement (suppression de l'effet miroir),
- le bruit de contact pneu-chaussée (augmentant avec la macrotexture),
- la résistance au roulement (augmentant avec la macrotexture).

La macrotexture est appréciée indirectement par mesure du coefficient de frottement longitudinal à diverses vitesses de manière à estimer la pente de la courbe donnant la CFL en fonction de la vitesse. Mais il existe aussi des méthodes directes, dont les plus efficaces utilisent des appareils laser mesurant précisément les altitudes des granulats.

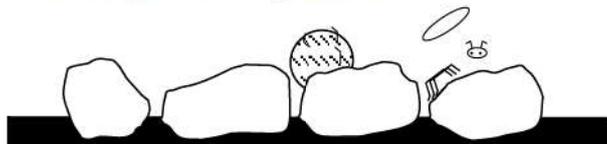


Figure 2 - Macrotexture

1.3.1.5 - Entretien de l'état de surface

Macrotexture et microtexture peuvent être régénérées par grenailage ou par hydrorégénération. Le grenailage consiste à projeter sur le revêtement des microbilles d'acier qui cassent les gravillons en surface faisant apparaître des petits cratères et arêtes vives ; elles nettoient les souillures et creusent le liant. L'hydrorégénération ou hydrodécapage consiste à projeter un jet d'eau à très haute pression, jusqu'à 900 bars, et donne les mêmes résultats. L'efficacité de ces procédés permet de retarder un entretien plus lourd d'environ 1 à 3 ans, voire plus selon le trafic. D'autres techniques dites de thermorégénération ou de thermorecyclage consistent à chauffer le vieil enrobé à même la route et à le racler sur une épaisseur comprise entre 3 et 6 cm ; on lui ajoute ensuite les produits nécessaires (bitume, granulats, polymères supplémentaires), avant de l'appliquer de nouveau sur la chaussée. Le revêtement est alors comme neuf, tant au niveau de sa structure qu'au niveau de l'adhérence.

Pour avoir une adhérence satisfaisante à toutes les vitesses, un revêtement doit offrir à la fois une macrotexture importante et une bonne microtexture. Il faut donc trouver le compromis entre ces deux paramètres, car ils varient en sens contraires en fonction de la quantité de sable utilisée dans la formulation de l'enrobé.

1.3.2 – Réglementation

Il n'y a pas de normes en matière d'adhérence, seulement des recommandations. Au travers de la circulaire n° 88-78 relative à l'adhérence des couches de roulement, l'Etat préconise l'emploi de différents types de revêtements suivant la fonction et les difficultés de la route. Ces recommandations non obligatoires portent donc sur la macrotexture des revêtements liée à leur type (enduit superficiel, béton bitumineux semi-grenu, très mince, béton de ciment...) et à leur formulation (continu, discontinu...). Elles ne fixent pas de valeurs en dessous desquelles il ne faudrait pas descendre.

1.4 – Photométrie de la chaussée

1.4.1 - Généralités

La chaussée joue un rôle important dans la visibilité de la route. Elle occupe une grande part du champ visuel du conducteur et constitue le principal fond sur lequel se détache un éventuel

obstacle. *La conception des installations d'éclairage nécessitent une bonne connaissance des propriétés photométriques des revêtements routiers.*

Le revêtement réfléchit une partie de la lumière qu'il reçoit. Ce phénomène caractérise la clarté du revêtement. Plus la clarté d'un revêtement est importante, plus la proportion de lumière renvoyée est grande par rapport à la lumière absorbée. En outre, un revêtement peut renvoyer la lumière de plusieurs façons :

- elle peut être réfléchi de façon diffuse, c'est à dire dans toutes les directions de l'espace indépendamment de son incidence.
- la lumière peut être réfléchi de manière spéculaire, c'est à dire que le revêtement se comporte comme un miroir : il renvoie la lumière dans une direction symétrique de la direction d'incidence.

En réalité, les revêtements de chaussée renvoient la lumière des deux façons à la fois : elle est réfléchi dans toutes les directions de l'espace, mais avec une direction privilégiée. C'est un mode de réflexion mixte.

1.4.2 - Classification selon la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)

La CIE a décrit le comportement photométrique des revêtements de chaussée. De façon simplifiée, celui-ci peut être caractérisé par deux paramètres :

- Le coefficient de luminance moyenne Q_0 , qui rend compte de la clarté de la surface (il augmente proportionnellement au pourcentage de la lumière reçue qui est réémise) .
- Le coefficient de spécularité $S1$, qui caractérise l'aptitude du revêtement à renvoyer la lumière dans une direction privilégiée (Il augmente d'autant plus que le revêtement a tendance à se comporter comme un miroir).

Ces paramètres sont indépendants ; il est possible d'avoir une surface très spéculaire ($S1$ élevé) et très sombre (Q_0 faible), par exemple une peinture laquée noire, ou inversement une surface peu spéculaire ($S1$ faible) et très claire (Q_0 élevé) comme dans le cas d'une peinture blanche mate.

La CIE a réparti les revêtements de chaussée en quatre classes en fonction de la valeur du coefficient de spécularité selon le tableau suivant :

Classe	Condition sur $S1$
1	$S1 < 0,42$
2	$0,42 \leq S1 < 0,85$
3	$0,85 \leq S1 < 1,35$
4	$1,35 \leq S1$

La - spéculaire

↓

La + spéculaire

Pour chaque classe i un revêtement standard « R_i » est défini, caractérisé par un couple de valeurs $[S_1, Q_0]$ type :

Revêtement standard de chaque classe CIE	S_1	Q_0
R1	0,247	0,10
R2	0,582	0,07
R3	1,109	0,07
R4	1,549	0,08

Si on estime que la valeur du coefficient de luminance moyenne Q_0 du revêtement est différente de celle du revêtement standard, les luminances calculées devront être multipliées par un facteur égal à : Q_0 estimé/ Q_0 standard.

Un enrobé neuf est habituellement spéculaire (classe R_4) car un film de bitume recouvre les granulats. Sous l'effet de la circulation ce film s'enlève au bout de quelques mois, et les propriétés photométriques du revêtement se stabilisent. En France la majorité des revêtements de chaussée sont de classe 2 ou 3.

A noter que les valeurs Q_0 et S_1 sont des *caractéristiques photométriques intrinsèques* des chaussées, ce qui permet de les identifier du point de vue photométrique. Cependant d'autres paramètres que la chaussée interviennent dans les calculs d'éclairage routier. En effet l'effet perçu par l'automobiliste dépend aussi de son angle de vision et de la répartition spatiale de l'énergie lumineuse de chaque luminaire, appelé solide photométrique.

1.4.3 – Caractérisation de la clarté d'une chaussée

Pour les besoins d'un projet d'éclairage, on assimile souvent la chaussée à une surface parfaitement diffusante. En utilisant la loi de Lambert généralisée qui permet de passer de la luminance moyenne de chaussée à l'éclairement moyen que doit fournir l'installation d'éclairage, on peut écrire $E = \pi/c * L$

La clarté réellement perçue par l'automobiliste sous son angle de vision s'exprime alors par le rapport $c = \pi * L/E$, où L est la **luminance¹ moyenne** de la chaussée vue par l'automobiliste, et E **l'éclairement moyen** reçue par celle-ci.

Ce rapport simple, appelé coefficient de clarté, résume les interactions complexes entre les caractéristiques photométriques de chaussée et celles des luminaires contribuant à l'éclairage de celle-ci.

En considérant que la chaussée est homogène dans sa longueur, tout comme l'est l'installation d'éclairage (répartition régulière des luminaires) il est admis que ce rapport c est constant *pour une chaussée et un type d'éclairage donné*. Il peut donc prendre des valeurs différentes pour une même chaussée sous un autre type d'éclairage.

¹ □ Luminance : Intensité lumineuse émise par une surface (Candelas/m²) Cf Dossier pilote des tunnels 4.2 (CETU)

1.5 – Le bruit

Les recommandations actuelles sont en faveur de revêtements peu bruyants pour le confort de l'usager et des riverains. Le bruit de roulement provient du contact entre le pneu et la chaussée : lorsque le véhicule avance, le pneu frappe violemment la chaussée et crée un bruit de martèlement. Puis il se décolle tout aussi violemment en aspirant l'air logé dans les anfractuosités de la chaussée, en créant un bruit d'aspiration ou "pumping". Selon les différents types de revêtement, le bruit de roulement est plus ou moins important. Il est maximum pour les revêtements de type enduit superficiel (ES) ou coulé à froid (ECF) ; il est minimum pour les enrobés drainants (BBDr) et faible pour les enrobés très minces et ultra-minces (BBTM et BBUM).

2 – SPECIFICITES DES CHAUSSEES¹ EN TUNNEL

Les tunnels présentent des particularités dont l'origine commune est due au milieu confiné qu'ils constituent. Ce confinement a une influence importante sur la mise en oeuvre et les caractéristiques de la chaussée.

Le sol support en tunnel est en général indéformable (dalle de béton armé) ou d'une grande portance (rochers), ce qui supprime ou simplifie respectivement la structure des couches d'assise comme celles décrites à propos des chaussées à l'air libre (cf § 1.1.). Ces informations sont décrites dans le dossier pilote génie civil des tunnels publié par le CETU, section 8 chapitre 3.

2.1 – Mise en œuvre en tunnel

Dans un tunnel, l'espace est limité tant en largeur qu'en hauteur, ce qui crée des contraintes supplémentaires lors de la construction de la chaussée.

La structure de chaussée initiale, ainsi que les couches de roulement appliquées lors des réfections doivent avoir une épaisseur qui permet de conserver une hauteur libre suffisante.

La chaussée doit être d'une qualité irréprochable afin de raréfier les opérations d'entretien sous circulation, toujours délicates en tunnel du fait des risques d'accident élevés (fumées, étroitesse, faible luminosité).

Les engins de chantier ne sont pas toujours compatibles avec le gabarit du tunnel : il peut arriver que la largeur ne permette pas aux camions de faire demi-tour et la hauteur de lever leur benne pour la vider. Il faut alors utiliser des engins spéciaux et très coûteux, appelés chargeurs.

Tous les engins de chantier circulant dans le tunnel doivent être équipés de pots catalytiques afin de réduire les fumées et les gaz toxiques.

Des extincteurs supplémentaires sont à proximité des engins pour une plus grande sécurité.

Lorsque les travaux de chaussée sont effectués avant l'installation de la ventilation et de l'éclairage définitif, des ventilateurs et un éclairage provisoires doivent être mis en place selon la longueur du tunnel. Ces matériels coûtent cher. En général, une ventilation provisoire est utilisée pour les tunnels de plus de 500 m de long.

Quel que soit le type de chaussée, ces contraintes occasionnent un coût supplémentaire qui se répercute sur le prix de la chaussée posée.

2.2 – Durée de vie de la chaussée en tunnel

Aux entrées et sorties de tunnel on observe les mêmes phénomènes qu'à l'air libre du fait de la proximité de ce dernier : pénétration des précipitations, du gel, du rayonnement solaire et variations importantes des températures et fluage éventuel de la chaussée.

Dans le tunnel lui-même, la chaussée est moins soumise aux agressions des agents atmosphériques qu'à l'air libre :

- Elle est protégée de la pluie et donc moins sensible au désenrobage des granulats dû à l'eau.
- La chaussée est également protégée du gel et des fortes variations de températures journalières et saisonnières : en effet, alors qu'à l'air libre la température d'un revêtement peut varier de –

¹

A partir de ce chapitre, le vocable « chaussée » désigne uniquement la couche de roulement

10 °C à 50 ou 60 °C l'été en plein soleil, dans un tunnel assez long la température est relativement stable : elle dépasse rarement les 20 °C et ne descend pas en dessous de 0 °C. Les déformations thermiques cycliques de la chaussée sont donc moins importantes et retardent les pathologies de type fissurations, faïençage du revêtement ou éclatement des granulats ;

- Le bitume du revêtement est protégé du rayonnement solaire (UV) : il en résulte un vieillissement ralenti du bitume qui peut tenir son rôle de liant plus longtemps ;
- avec une température maximale ne dépassant guère les 20 °C en tunnel, les problèmes d'orniérage par fluage des couches bitumineuses sous fortes chaleurs ne se posent pas, ce qui contribue aussi au maintien d'un bon uni..
- Cependant, du fait de l'étroitesse des tunnels, les véhicules balayent moins la route dans sa largeur et suivent ceux qui les précèdent comme sur des rails. Le trafic est plus canalisé qu'à l'extérieur et un même point de la chaussée est sollicité plus souvent ; ceci est défavorable pour l'orniérage. Au total, les avantages précédents ont pour conséquence l'augmentation de la durée de vie de la structure de la chaussée et du revêtement. Contrairement aux revêtements situés à l'air libre, les revêtements en tunnel posent rarement des problèmes dus à leur comportement mécanique. L'entretien lié à la dégradation de la structure du revêtement (pelades, orniérage par fluage, fissurations,...) est donc presque toujours évité, et cela pendant une période d'environ 20 à 30 ans contre 7 à 10 ans pour une route à l'air libre. Ces durées de vie en tunnel sont issues d'une enquête auprès des exploitants de tunnel. Les revêtements en question sont ceux de l'époque, à savoir essentiellement des BBSG ; il est probable que des revêtements plus récents comme les BBM, BBTM ou BBUM durent autant, mais il n'est pas possible de le certifier.

Les opérations d'entretien du revêtement en tunnel sont donc liées le plus souvent à ses caractéristiques de surface, et en particulier à l'adhérence qui ne peut être maintenue à un niveau satisfaisant pendant plus d'une dizaine d'années.

2.3 – L'adhérence en tunnel

Même s'ils sont à l'abri des précipitations, les tunnels peuvent être humides quand ils ne sont pas bien ventilés. Par ailleurs les salissures grasses tombant sur la chaussée perdurent plus aisément en tunnel qu'à l'air libre. Ceci suffit à rendre le revêtement glissant.

Le dimensionnement de l'éclairage en tient compte systématiquement, les distances d'arrêt retenues pour les calculs de dimensionnement sont celles observées à l'air libre sur chaussées mouillées.

2.4 – Le bruit en tunnel

Si le bruit à l'air libre est de première importance en zone urbaine ou péri-urbaine, il n'en est pas tenu compte en général dans les tunnels. Il y est cependant supérieur en raison du phénomène de réverbération.

Il est préférable de choisir un revêtement peu bruyant à enrobé très mince (BBTM) ou ultra mince (BBUM) (0/6). Rappelons que les revêtements drainants (BBDr) sont interdits en tunnel.

2.5 – Photométrie

Le but principal d'une installation d'éclairage est de permettre au conducteur de percevoir en temps utile un éventuel obstacle situé sur la chaussée, en assurant un contraste suffisant entre les luminances¹ respectives de l'obstacle et de la chaussée. Ces luminances dépendent de l'éclairage installé, mais aussi de la clarté de la chaussée.

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.

Les études d'éclairage visent à obtenir la valeur optimale de la puissance de l'installation d'éclairage sur la base de ces caractéristiques, afin assurer une bonne perception d'un éventuel obstacle sur la chaussée

Les chapitres suivants expliquent l'intérêt des chaussées claires et éclaircies dans ce domaine.

3 - CHAUSSEES CLAIRES ET ECLAIRCIES EN TUNNEL

3.1 – Les différents types de chaussée

On distingue les couches de surface en béton bitumineux, réputées très sombres, de celles en béton de ciment plus claires.

Mais l'utilisation d'un béton de ciment n'est pas la seule solution pour obtenir un revêtement relativement clair.

Il est possible en effet de réaliser des chaussées bitumineuses « éclaircies » avec un enrobé classique et des granulats clairs (Voir §3.3), et des chaussées dites « claires », grâce à certains liants synthétiques clairs et granulat « clair » (Voir §3.4).

3.2 - Intérêt photométrique (et donc économique) de ces chaussées

La luminance de chaussée en tunnel est calculée de manière à obtenir une visibilité suffisante en zone d'entrée du tunnel et tout au long du parcours dans le tunnel. Tout éventuel obstacle sur chaussée doit être perçu par l'automobiliste. La distance de visibilité doit lui permettre d'immobiliser son véhicule à temps.

Toutes les expériences et études effectuées sur le sujet ont montré que pour une *vitesse d'accès donnée*, la luminance de chaussée nécessaire à cette visibilité dépend essentiellement des conditions photométriques extérieures. Plus les luminances extérieures à l'approche de l'entrée du tunnel sont élevées, plus la vision de l'automobiliste a du mal à discerner les objets à l'intérieur du tunnel, qui en première approche constitue un « trou noir ». La vision de l'automobiliste doit s'adapter progressivement aux conditions lumineuses faibles de l'intérieur d'un tunnel, et cette adaptation est d'autant plus longue que le niveau lumineux initial, c'est à dire celui de l'extérieur, est élevé.

La perception d'obstacles éventuels sur la chaussée dépend directement de la luminance de celle-ci, par contraste.

Or l'éclairage nécessaire pour l'obtention de cette luminance dépend pour sa part essentiellement du coefficient de clarté de la chaussée vue sous l'angle du conducteur. Ce coefficient est proportionnel au rapport entre la luminance de chaussée perçue par le conducteur (cf §1.4) et

¹ Luminance : Intensité lumineuse émise par une surface (Candelas/m²) Cf Dossier pilote des tunnels 4.2 (CETU)

l'éclairement¹ reçu par cette chaussée. Plus ce coefficient est élevé, plus la chaussée apparaît lumineuse sous un même éclairage.

Il est donc possible de diminuer le flux lumineux à installer avec une chaussée claire pour obtenir la même luminance que celle obtenue avec une chaussée noire classique, tout en assurant une visibilité suffisante des obstacles.

Le tableau suivant indique à titre d'exemple les niveaux de luminance à mettre en œuvre pour différents coefficients de clarté de chaussée ; ces niveaux ont été calculés avec le logiciel ECLAIR de dimensionnement de l'éclairage (CETU) pour une vitesse d'accès de 70 km/h, des voiles lumineux extérieurs moyens, et un éclairage de type symétrique :

Coefficient de clarté de la chaussée intérieure	Luminance nécessaire en entrée ² (cd/m ²)	Eclairement nécessaire en entrée (lux)
0,12 (sombre)	97	2500
0,18 (moyen)	96	1700
0,24 (clair)	95	1250

Les gains sur les niveaux d'éclairement à mettre en œuvre sont, en gros, proportionnels à la clarté de la chaussée soit pour une chaussée claire un gain de l'ordre de 25 % (1250/1700) par rapport à une chaussée moyenne et de 50 % (1250/2500) par rapport à une chaussée sombre.

Les mêmes calculs, pour une installation à contre flux (le flux lumineux est orienté vers le conducteur pour favoriser le contraste des éventuels objets tombés vus sur la chaussée) donnent les résultats suivants :

Coefficient de clarté de la chaussée intérieure	Luminance nécessaire en entrée ³ (cd/m ²)	Eclairement nécessaire en entrée (lux)
0,12 (sombre)	46	1200
0,18 (moyen)	57	1000
0,24 (clair)	65	850

¹ Eclairement : Quotient du flux lumineux (lumens) arrivant sur une surface par l'aire de celle-ci ; il s'exprime en Lux/m² ; le flux lumineux est la somme des flux énergétiques (W) sur toutes les longueurs d'ondes lumineuses visibles

² A noter qu'une chaussée claire fait baisser de 2% environ la luminance nécessaire à l'entrée. En effet ce type de chaussée renvoie plus de lumière sur les piédroits, l'adaptation visuelle du conducteur est légèrement améliorée, d'où le niveau de luminance de chaussée un peu plus faible.

³ Les niveaux de luminance à mettre en œuvre sous un éclairage à contre-flux augmentent avec la clarté de chaussée (contrairement au cas précédent en éclairage symétrique) car plus la chaussée réfléchit la lumière (coefficient c élevé), notamment vers les obstacles, moindre est le contraste sous lequel ceux-ci sont vus, autrement dit ceux-ci apparaissent « moins noirs ». Pour conserver une valeur de contraste admissible il convient d'augmenter suffisamment le niveau de luminance de chaussée, et ceci explique, aussi, le moindre gain relatif dû aux chaussées claires sous un éclairage à contre-flux..

Pour une situation donnée (vitesse d'accès de 70 km/h et voiles lumineux extérieurs moyens) identique à la précédente, avec un éclairage de type contre-flux les gains sur les niveaux d'éclairément à mettre en œuvre sont moins importants : de l'ordre de 15 % (850/1000) par rapport à une chaussée moyenne et de 30 % (850/1200) par rapport à une chaussée sombre¹.

Il convient de souligner que même si les gains apportés par une chaussée claire sont plus faibles en contre-flux qu'en symétrique, le système d'éclairage à contre-flux reste intéressant (pour la situation de référence choisie, avec une chaussée claire, il est nécessaire d'installer 850 Lux avec du contre-flux et 1240 Lux avec du symétrique).

3.3 – Les chaussées claires.

Ce sont des enrobés réalisés avec un liant synthétique clair et des granulats blancs. De telles chaussées peuvent présenter un coefficient de clarté particulièrement élevé à la mise en service. Leur coefficient de clarté s'étend de 0,24 à 0,30 et parfois plus (jusqu'à 0,40) pour certains enrobés.

3.3.1 - Le bitume clair

S'il est possible de colorer un bitume pur ou allégé en asphaltènes (les asphaltènes sont à l'origine de la couleur noire et d'une partie de la dureté des bitumes purs) en y incorporant une plus ou moins grande quantité de pigments, l'opération se révèle inefficace lorsqu'il s'agit d'obtenir un bitume de couleur claire. Il est donc indispensable de partir de liants hydrocarbonés dépourvus d'asphaltènes. Il s'agit *des bitumes clairs*.

Les bitumes clairs sont des produits synthétiques issus de la chimie du pétrole. Ils sont élaborés à partir de bases ne contenant pas d'asphaltènes de manière à présenter les mêmes propriétés que les bitumes classiques, et d'être transparents en film mince. Ils permettent, par incorporation d'une quantité de pigments « blancs » assez réduite, d'obtenir une teinte très claire.

Le bitume clair peut être utilisé soit à chaud, soit à température réduite après fluidification, soit à froid sous forme d'émulsion.

Les pigments utilisés pour la coloration claire des bitumes de synthèse sont d'origine minérale : oxyde de titane. Les pigments minéraux résistent mieux que les pigments organiques à l'action de la lumière (UV) et des intempéries. De plus, ils sont thermostables, ce qui est indispensable à leur emploi dans les revêtements bitumineux confectionnés à chaud.

Le dosage en pigments varie entre 1 et 2 % du granulat et leur coût est très élevé, de l'ordre de 2300 euros la tonne.

La teinte du mélange bitume de synthèse et pigments « blancs » obtenu n'est pas véritablement blanche: elle est beige clair. Cependant, il a été constaté qu'à l'air libre, la teinte obtenue à l'application s'éclaircit progressivement sous l'effet de l'exposition à la lumière du jour et se stabilise durablement en quelques semaines. Les expériences de chaussées claires en tunnel montrent que cet éclaircissement final n'a pas lieu en tunnel, en raison de l'absence de rayonnement solaire.

La teinte finale dépend aussi de la qualité de dispersion du pigment dans le mélange bitumineux (mélange des granulats, du bitume de synthèse et des pigments). La coloration est homogène et intense si la distribution du pigment dans le mélange est homogène. Certains procédés peuvent améliorer cette dispersion.

¹ Voir note 2 ci-dessus.

3.3.2 – Choix des granulats pour une chaussée claire

Suite à une période de quelques mois d'usage ou plus suivant le trafic, la couleur dominante de la plupart des revêtements devient essentiellement celle du granulat. En effet, le liant enrobe parfaitement les granulats à la mise en service, mais les effets conjugués de la circulation et du rayonnement solaire (hors tunnel) décapent la surface des granulats, alors mise à nu. Ce phénomène peut être très rapide pour les enduits superficiels, qui laissent ainsi apparaître la couleur des gravillons et ce, quelle que soit la nature du liant. Il est beaucoup plus lent pour les revêtements appliqués en tunnel où le rayonnement est absent.

Ce constat permet donc de mesurer l'importance du choix de la teinte des granulats pour conserver une chaussée claire.

- Les calcaires blancs ne peuvent pas être utilisés pour constituer les gravillons des couches de roulements malgré leur abondance, en raison de mauvaises caractéristiques mécaniques : la chaussée devient rapidement très glissante.
- Les granulats très blancs non calcaires sont difficiles à trouver et par conséquent très chers. Actuellement, il s'agit de quartz très clairs issus de roches massives, et devant être entièrement concassés. Les chantiers effectués dans le quart sud-est de la France ont fait venir ce granulat depuis la carrière d'Inzinzac en Bretagne. Aujourd'hui, ce gisement est quasiment épuisé et un nouveau filon est exploité dans le centre de la France.
- On peut également citer le Granusil, granulat issu de la calcination de galets de mer fabriqué à Cailleux-sur-Mer : c'est un matériau utilisé en Allemagne depuis une trentaine d'années, mais qui était exclu en France pour sa très faible résistance à la fragmentation. Actuellement, il est toléré à hauteur de 30 % maximum dans la composition granulométrique, où associé à une roche plus dure (quartz blanc par exemple), sa friabilité est limitée.

3.3.3 – Coûts

3.3.3.1 – Coûts en sortie de centrale

La rareté des granulats clairs conduit à des prix élevés : le quartz blanc coûte environ 38 euros la tonne en carrière contre 13 euros pour un granulat ordinaire. A cela, il faut ajouter le prix du transport jusqu'à la centrale d'enrobage : par exemple, il faut compter deux journées à un camion de 25 T à 445 euros par jour pour livrer le granulat à plus de 500 km, d'où un prix de revient du transport d'environ 38 euros la tonne. A comparer avec les 5 à 8 euros/t pour un granulat ordinaire que l'on peut toujours trouver dans un rayon de moins de 50 km de la centrale.

Finalement, pour un chantier de chaussée très claire dans une région excentrée, il faut compter un prix de granulat livré à la centrale d'environ 76 euros/t voire 92 euros /t pour du quartz blanc, contre 18 euros/t pour un matériau quelconque. Pour un chantier plus proche, mais plus improbable vu la rareté des gisements, le surcoût sera pour le moins de 26 euros/t, ce qui laisse le prix du quartz livré à 44 euros/t soit plus du double d'un granulat ordinaire.

Le coût élevé du quartz blanc explique que les entreprises routières incorporent également du sable calcaire blanc dans le granulat des revêtements clairs : à hauteur de 60 %, les gravillons sont en quartz, alors que le calcaire constitue la fraction sableuse à hauteur de 30 %.

Pour le Granusil, jamais utilisé seul, on retiendra des prix semblables à ceux du quartz.

Finally, a light-colored binder costs between 229 and 244 euros/t (HT) at the exit of the central binder plant, which is about 5 times more expensive than a classic black binder whose cost varies between 40 and 50 euros/t. (See additional costs for the production of the binder §3.3.6).

3.3.3.2 – Précautions spécifiques et coûts induits

The production and implementation of light-colored binders require a set of perfectly clean materials, that is, without any trace of another product that would cause defects of an irreparable nature. The cleanliness of the materials requires that the entire production chain be free of any trace of black bitumen.

At the level of the central binder plant, the light binder must have a storage tank and dedicated conveyors. The storage of pigments must be carefully managed to avoid losses of product or pollution. Before production of a quantity of light binder, the plant and in particular the drum-dryer-binder are cleaned: one passes one or two batches of granules through the entire production chain, without bitumen; when the granules are clean, the production of light binder can begin. This cleaning takes about 2 hours and costs about 3000 € for the company. The introduction of pigments into the mixture takes place at the moment of its production, in the mixer, before the admission of the synthetic binder. The low annual production of light binder does not allow for the equipping of all central plants with special tanks and circuits, and even less for reserving a central plant for this type of product; it results that, contrary to classic central plants which are usually found less than 50 km from the site, central plants capable of producing a large quantity of light binder are rare.

Another procedure allows for the direct introduction of a mother solution of bitumen-light binder-pigments into the granules; there is no need for a tank and dedicated circuit for the light binder since the latter is delivered in small containers that are emptied into the mixer. This technique allows any central plant to produce light binder, but is only interesting for the production of small quantities; the cleaning of the central plant remains necessary.

It is indispensable to have a perfectly clean application workshop: trucks, compactors, finishers, as well as the tools and equipment of the workers (buckets, shovels, brooms...) must be cleaned meticulously. The cleaning of the finisher is long and tedious because of the complexity of the machine: it can take an entire day and costs the price of immobilization of the materials, about 3000 to 3800 euros, which increases the price of the tonne of light binder, especially when it is used for small quantities.

For the bonding layers, especially in the case of thin or very thin binders, it is necessary to avoid overdosages and localized concentrations which can be the origin of binder blackening and therefore of staining or blotches. The use of light binder in bonding layers is preferable.

Stops and restarts of spreading, as well as the variations in layer thickness, are the origin of heterogeneities in shades on the treated surface. In consequence and especially in the case of thin binders, it is indispensable that the supports be little deformed and that the regularity of spreading of the light material be well mastered.

The joints between black and light zones are delicate to realize, especially during compaction: risks of blisters, undulations. Special precautions must be taken, for example, cutting and protection with polyurethane and/or adhesive of the joint of the first zone realized, manual spreading and compaction of the material of the adjacent zone close to the joint.

3.3.3.3 – Revêtements types adaptés aux produits clairs

Pour l'application des revêtements clairs, du fait des surcoûts importants et du respect des gabarits de hauteur en tunnel, seuls les matériaux applicables en faible épaisseur sont retenus. Actuellement, les types d'enrobés utilisés sont des BBM ou des BBTM d'épaisseur comprise en 2,5 et 3,5 cm, de formulation continue ou discontinue. Ces revêtements nécessitent un support de très bonne qualité du point de vue de l'uni, car leur faible épaisseur ne leur permet pas de rattraper d'éventuels défauts.

3.3.3.4 – Coût au m²

Pour un revêtement clair appliqué sur 3 cm d'épaisseur, sur une assez grande surface en tunnel (2 km sur 9 m de large par exemple), on obtient un prix final d'environ 19 euros/m² (produit + mise en œuvre) contre environ 4,60 euros/m² pour un enrobé noir classique en tunnel ¹.

3.3.4. – Réparabilité

D'un point de vue général, la réparabilité des bétons bitumineux à chaud n'est pas bonne, surtout lorsqu'il s'agit de très petites surfaces. Ces difficultés se trouvent amplifiées lorsque ces produits sont des enrobés clairs.

En effet, il est pratiquement impossible de faire coïncider la teinte de la réparation avec celle de l'ancien enrobé qui l'entoure. Néanmoins l'évolution importante et rapide de la teinte observée avec les enrobés clairs semble apporter une amélioration à ce problème. Il a été ainsi constaté qu'après une période de un à deux ans, la zone réparée avec le même enrobé clair présente une teinte qui peut se confondre avec celle de l'ancien revêtement avoisinant. Au delà de cette période les teintes n'évoluent pratiquement plus.

En ce qui concerne les techniques de régénération ou de recyclage des enrobés, destinées à leur donner une nouvelle jeunesse à la fois du point de vue structurel et de l'adhérence, il est illusoire de vouloir les appliquer à un enrobé clair. D'une part, les machines utilisées ne sont pas nettoyables, et d'autre part, il est impossible de racler uniquement l'enrobé clair dont l'épaisseur est très faible, sans toucher également, par manque de précision ou parce que la chaussée est légèrement déformée, aux couches sous-jacentes qui peuvent être en bitume noir : il y aurait forcément salissure de l'enrobé clair par de l'enrobé noir.

Lorsque la couche de roulement arrivera en fin de vie, il faudra donc soit enlever l'enrobé périmé et en mettre un neuf, soit régénérer l'adhérence par les techniques du grenailage ou de l'hydrodécapage dont le coût est d'environ 3 à 4 euros /m². Ces techniques sont efficaces à court terme, (2 à 3 ans).

Toutefois, ce décapage ne peut pas être pratiqué indéfiniment tous les 3 ans sur un revêtement mince qui finirait par se désagréger. Il doit également être bien maîtrisé pour ne pas être trop agressif vis à vis du granulats qui deviendrait trop rugueux et se teinterait en noir en arrachant la gomme des pneus : cela s'est déjà vu dans les tunnels du Prado-Carénage à Marseille, où l'enrobé éclairci s'est considérablement noirci après un grenailage trop puissant.

¹ Des recherches sont en cours sur des produits clairs applicables en très faible épaisseur, et une diminution des coûts pour les années à venir est envisageable.

3.3.5. – Adhérence

Le choix des granulats pour leur clarté ne doit pas faire oublier que leurs caractéristiques mécaniques doivent être adaptées aux contraintes habituelles subies par les couches de roulement, c'est-à-dire celles dues à l'importance du trafic lourd.

Les gravillons utilisés pour les revêtements clairs sont des quartz dont les caractéristiques intrinsèques sont bonnes tant pour la dureté que pour la résistance au polissage. Ils font partie des minéraux qui mettent le plus de temps à se polir. Lorsqu'une calcite est polie au bout de quelques mois, les feldspaths le sont en 3 ans et les quartz en 5 ans. Ces gravillons sont donc favorables à l'obtention d'une microtexture durable.

La macrotexture des chaussées claires est du même ordre de grandeur que celle des enrobés classiques, il en est donc de même de leur qualité d'adhérence à faible vitesse.

3.3.6 – Pérennité des performances photométriques.

Sous l'effet de la circulation, les chaussées ont tendance à devenir progressivement de moins en moins claires. Cependant, vu des mesures effectuées ces dernières années sur les quelques tunnels équipés de chaussées claires, il semble que la clarté d'une chaussée claire se stabilise sous l'effet du trafic.

Hors tunnel, la teinte du revêtement atteint une nuance intermédiaire entre le beige clair du liant et le blanc du granulat, si la pollution n'est pas trop importante.

En tunnel, quelle que soit l'importance du trafic, le revêtement finit toujours par se salir sous les effets des gaz d'échappement et de la pollution plus importante qu'à l'extérieur, et de l'absence de lavage par la pluie. En particulier si les gravillons restent relativement propres, le liant se noircit considérablement. Toutefois, l'usager, sous un angle de vision compris entre 0,5 et 1,5° aperçoit essentiellement les faces claires des gravillons, le liant étant quasiment invisible. De ce fait la chaussée lui paraît toujours claire.

Ce phénomène de persistance de clarté de chaussée perçue par l'automobiliste n'est possible que si :

- La macrotexture est relativement importante : le liant noirci demeure invisible.
- Le trafic est suffisant pour nettoyer les granulats.

L'exemple du paravalanche de la Pendant est une bonne illustration du nettoyage par le trafic. Il a été constaté que la voie constamment circulée était la plus propre et donc la plus claire, contrairement à la voie circulée uniquement l'hiver. Ce nettoyage est sans doute lié à l'eau chassée par les pneus, la quantité d'eau étant dans ce cas relativement importante vu la faible longueur de ce paravalanche (assimilé à un tunnel).

Les exemples en tunnel du tableau ci-après illustrent par ailleurs la diminution du coefficient de clarté et sa stabilisation autour de 0,30.

OUVRAGES	Coefficients de clarté			
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4
Paravalanche du petit Bornand	0,38	0,27 à 0,31	0,29 à 0,31	0,29 à 0,31
Tunnel du Châtelard	0,55	0,29	0,31 à 0,33	-
Paravalanche de la Pendant	0,50	0,50	0,41	0,36
Tunnel de las Planas	0,31 à 0,33	-	-	0,31 à 0,33
Tunnel de Cap de Croix (A8)	-	-	-	0,31
Tunnel de la Baume	0,30	-	-	0,29 à 0,36

Pour résumer, l'enrobé clair neuf perd de la clarté à cause de la salissure apportée par le trafic, tout en restant durablement plus clair que n'importe quel autre type de revêtement, grâce à la blancheur de ses granulats.

3.3.7 – Cas des chaussées en béton

Les chaussées en béton sont claires, et la couleur peut être modulée par le choix des gravillons et, éventuellement par des ajouts de type pigment. D'un point de vue photométrique, elles sont proches des chaussées bitumineuses claires.

En France, ces chaussées se rencontrent pour l'instant essentiellement sur les autoroutes, et les tunnels qui en sont équipés le sont dans la continuité des autoroutes à chaussée béton.

Pour l'instant la présente étude n'a pas retenu ce type de chaussée dans l'analyse économique globale du §4 ci après.

3.4 - Chaussées éclaircies

Les revêtements éclaircis sont constitués d'un bitume noir classique et de granulats clairs. Ceux-ci ne s'éclaircissent toutefois qu'après un certain temps de circulation qui fait disparaître le film superficiel de liant. Celui-ci peut aussi être éliminé par décapage.

3.4.1. – Les granulats clairs

Les granulats utilisés sont les mêmes que pour les enrobés clairs : du quartz pour les gravillons et du calcaire blanc pour le sable. Le bitume étant normal, c'est donc du granulat que vient le surcoût dans un enrobé éclairci. Avec les mêmes considérations de prix que pour les chaussées claires, à savoir 76 euros/t le granulat livré, on obtient un prix d'environ 92 euros/t pour l'enrobé éclairci sortie centrale, contre 40 à 50 euros/t pour un enrobé noir classique, et 230 euros/t pour un enrobé clair.

Il n'y a pas de précautions particulières à observer pendant la fabrication ou la mise en œuvre de l'enrobé, sachant qu'il s'agit d'un bitume noir.

Les seules précautions concernent les techniques de décapage : Si l'enrobé doit être grenailé ou hydrodécapé, il convient d'attendre au moins une à deux semaines après sa mise en œuvre pour lui laisser le temps de sécher. De plus, ce décapage ne doit pas être trop agressif.

3.4.2. – Revêtements types et coût au m²

Les types de revêtements les plus appropriés, pour des raisons de surcoût et de gabarit de tunnel, sont encore les BBM et les BTM.

Pour un revêtement éclairci appliqué sur 3 cm d'épaisseur, sur une assez grande surface en tunnel (2 km sur 9 m de large par exemple), on obtient un prix final d'environ **8,40 € / m²** (produit + mise en œuvre) contre environ **4,60 € / m²** pour un enrobé noir classique, et 19 euros/m² pour un enrobé clair. Le prix passe à **11,40 € / m²** lorsque l'enrobé est grenailé.

3.4.3. – Réparabilité

De même que pour les enrobés clairs, une réparation récente d'enrobé éclairci est visible. La différence disparaît peu à peu au bout de quelques mois par le décapage dû au trafic.

En ce qui concerne la régénération de l'enrobé, le risque est la remontée des gravillons sombres des couches sous-jacentes. Il faut donc réincorporer des granulats blancs ou bien appliquer l'enrobé éclairci sur une épaisseur suffisante bien supérieure à 3 cm pour ne pas éviter ce problème, ce qui augmente le prix au m² de l'enrobé éclairci.

3.4.4. – Adhérence

Un revêtement éclairci a le même liant qu'une chaussée classique : bitume noir. Par conséquent son comportement mécanique, dont l'adhérence, est quasi-identique à celui d'un enrobé classique de même formulation.

3.4.5 – Décapage : Grenailage ou hydrodécapage

Juste après sa mise en œuvre, le revêtement est noir comme les revêtements classiques. Après quelques semaines de service sur une route à l'air libre, le liant noir à la surface des granulats est décapé sous l'action du trafic et du soleil, et les granulats blancs apparaissent. Au bout de quelques mois, le revêtement atteint une teinte finale un peu plus claire donnée par les granulats. Ce décapage peut prendre beaucoup plus de temps en tunnel où le rayonnement solaire est absent. De plus, en tunnel, la circulation est plus canalisée qu'à l'air libre ; il en résulte un décapage important dans les bandes de roulement, alors que le milieu des files tarde à s'éclaircir.

Pour éviter cette phase transitoire, il est possible toutefois de décapier artificiellement la surface des granulats. *On utilise alors les mêmes techniques que pour la régénération de l'adhérence*, à savoir l'hydrodécapage ou le grenailage qui ici ont pour but d'éliminer la pellicule de liant noir à la surface des granulats, éclaircissant ainsi l'aspect général du revêtement.

Le prix du décapage en tunnel varie autour de 3 euros/m², selon les quantités. Le rendement peut aller de 3000 à 5000 m²/j. Ce traitement a l'inconvénient de ne pouvoir être effectué que quelques jours au moins après l'application de la couche de roulement, afin de ne pas la dégrader : il peut alors impliquer d'interrompre ou de réduire la circulation, ce qui est très pénalisant en tunnel.

Un problème de coloration caramel des granulats blancs a été rencontré avec l'hydrodécapage. Il semblerait que l'eau chargée par les huiles du bitume décapé ait teinté les granulats blancs, réduisant leur clarté.

3.4.6 - Performances photométriques

Les coefficients de clarté des chaussées éclaircies s'étendent de 0,18 à 0,22.

A noter que l'évolution de la clarté c d'une chaussée « éclaircie non décapée » en tunnel est l'inverse de celle d'un enrobé clair. En effet, le revêtement d'abord très noir, s'éclaircit, au fur et à mesure que les granulats se découvrent sous l'action du trafic, pour atteindre une teinte claire durable. Cependant, cette clarté reste supérieure à 0,18.

3.5. –Cas des revêtements clairs sous les tunnels de l'A8 ¹

Le contournement de Nice par l'autoroute A8 comporte beaucoup de tunnels dont trois sont équipés de chaussées claires au bitume de synthèse depuis fin 1995.

Le tunnel de Las Planas mesure 1060 m et possède un enrobé Colclair sur toute sa largeur.

Les tunnels de Cap de Croix et de la Baume longs de 580 m et 340 m respectivement, possèdent un enrobé Gerchrome également sur les deux files. Leurs chaussées ne sont pas lavées, comme la totalité des tunnels français. Le trafic poids lourds sur le contournement est très important, de l'ordre de 4500 PL par jour et par sens.

Photométrie

Vu sous l'angle de l'usager, les deux revêtements, Gerchrome et Colclair, demeurent remarquablement clairs, malgré les années passées.

A l'observation de la couche de roulement, il peut être constaté que les granulats blancs ont bien été mis à nu et sont peu salis. Les quelques particules de liant qui restent sur les granulats, et qui sont donc en contact avec les pneus, sont également de couleur claire. Par contre, le bitume entre les granulats est complètement noirci.

♦ **Gerchrome**

Le revêtement Gerchrome est très homogène, lorsqu'on a une vue de l'ensemble et de près également. On n'observe pas de ségrégations ni de plaques de liant.

♦ **Colclair**

Concernant l'aspect visuel, la chaussée n'est pas très uniforme, surtout de près. En effet, on s'aperçoit que la répartition du liant et du sable n'est pas homogène : on constate un effet de ségrégation. De plus, des problèmes ont été rencontrés à la mise en œuvre, et des plaques de liant plus ou moins grandes (jusqu'à un mètre de long sur 0,5 de large) forment des taches claires et glissantes par endroits. On constate également que le liant ne s'est pas totalement décapé à la surface des granulats.

Pour améliorer la clarté, un essai de grenailage a été pratiqué sur la voie lente et sur une longueur de 150 m début mai 1999. Cette zone apparaît comme blanchie par rapport au revêtement non grenailé. Le grenailage a nettoyé la salissure à la surface des granulats, et partiellement le liant dans les creux. A priori, ce décapage n'a pas été trop agressif dans la mesure où les gravillons ne sont pas noircis en se recouvrant de la gomme des pneus.

La zone grenailée du Colclair confirme son aspect très blanc par un coefficient de clarté égal à 0,44 voire 0,50 par endroits. Cependant, une telle clarté ne saurait durer du fait de la salissure apportée par le trafic, le liant va noircir, comme cela a déjà été le cas pour le Colclair non grenailé, entre sa mise en service et aujourd'hui.

Lors de sa mise en service fin 1995, c'est-à-dire avant toute pollution et avant décapage du liant clair par le trafic, l'enrobé Colclair avait un coefficient de clarté de 0,31 à 0,33. Les mesures effectuées en mai 99 donnaient un coefficient de clarté de 0,31, voire 0,33 par endroits, après 4 ans de service. *La clarté du revêtement Colclair n'a donc pas changé en 4 ans.* (Voir coefficients photométriques en annexe 1)

¹

Les caractéristiques techniques de ces chaussées sont en annexe 4.

Adhérence

♦ Gerchrome

Les mesures de CFL effectuées en 1995 montrent que le revêtement se classait dans la partie supérieure du fuseau du réseau routier national pour des vitesses supérieures à 60 km/h, preuve d'une bonne adhérence à ces allures. L'extrapolation vers les vitesses inférieures montre que les valeurs de CFL se rapprochent du milieu du fuseau habituel, témoignant d'une adhérence normale à faible vitesse. Ceci signifie que l'adhérence sur le gerchrome en tunnel est supérieure à celle des enrobés drainants présents en amont et en aval.

Les valeurs de CFT quant à eux sont dans la continuité des valeurs relevées sur les enrobés drainant avant et après le tunnel.

Globalement l'adhérence de ce revêtement est tout à fait satisfaisante.

♦ Colclair

Malgré une macrotexture élevée, les mesures de CFL faites à plusieurs époques, montrent que l'adhérence du revêtement n'est pas très bonne, vers les valeurs basses habituellement observées sur le réseau routier national.

Les valeurs de CFT (1999) sont hétérogènes et inférieures à celles de l'enrobé précédant le tunnel : il y a une rupture nette de l'adhérence. L'adhérence dans la seconde moitié du tunnel s'inscrit dans la continuité des valeurs relevées sur les enrobés drainants après le tunnel.

Ces constatations sont caractéristiques d'une mauvaise microtexture. La macrotexture n'est pas en cause puisque la décroissance des CFL avec la vitesse est normale.

La pollution due au tunnel ne suffit pas à expliquer le faible niveau d'adhérence de l'enrobé Colclair, puisque le Gerchrome ne pose pas ce problème. Les granulats ont une bonne résistance au polissage (CPA) et ne sont donc pas en cause, même si l'utilisation de Granusil dans le Gerchrome semble plus favorable à l'adhérence. On peut avancer d'autres facteurs : une formulation trop discontinue qui entraîne une réduction de la microtexture et donc du nombre de contacts pneu-chaussée ; une disposition des gravillons trop à plat sur la route, certainement due à un compactage particulier : ils semblent disposés comme des pavés, ne présentant pas leurs arêtes aux pneus, mais leurs faces ; un liant trop collant qui ne s'est pas décapé totalement et qui rend la chaussée glissante.

Sur la zone grenillée, l'adhérence est considérablement améliorée puisque les valeurs de CFL sont très élevées. On note une amélioration du CFL de 34 % à 40 km/h, et de 24 % à 60 et 80 km/h. Ceci s'explique par la régénération de la microtexture ou par le nettoyage des matières grasses sur le revêtement.

4 – ANALYSE ECONOMIQUE GLOBALE

4.1 – Démarche retenue

4.1.1 – Principe

Rappelons que l'objectif est d'évaluer l'intérêt économique des chaussées claires et éclaircies, à qualités routières comparables, par rapport à des chaussées traditionnelles. Un ouvrage type a donc été défini ainsi que des performances photométriques à atteindre. Différentes solutions d'éclairage ont été retenues en combinant le type d'installation (éclairage à flux symétrique ou à contre-flux), la nature des sources (fluorescent ou sodium haute-pression) et différentes implantations (en haut de piédroit et au-dessus des voies). Ensuite chaque solution a été optimisée pour les types de revêtements retenus. Enfin, le coût total de chaque solution a été établi pour permettre d'effectuer des comparaisons.

4.1.2 – Application

Les deux fabricants de luminaires COMATELEC et PHILIPS ont élaboré des solutions d'éclairage optimisées pour tous les cas d'étude retenus (voir § suivant).

4.2 - Présentation synoptique des cas étudiés

<p>Caractéristiques de l'ouvrage type étudié</p>	<p>Largeur roulable : 9 mètres Longueur : 1 000 mètres Renforcement : 400 mètres Hauteur sous luminaires : 5 mètres</p>
<p>Performances photométriques à atteindre (Voiles moyens à 90 km/h)</p>	<p>► Niveaux de luminance { - Renforc^t en symétrique: 100 cd /m² - Renforcement en contre-flux : 48 cd /m² sur chaussée R2 60 cd /m² sur ch. éclaircie 68 cd /m² sur ch. claire - Section courante 4 cd/m²</p> <p>► Dépréciation de 30 % à prévoir</p> <p>► Uniformités { Longitudinale = 0,8 Globale renforcement = 0,8 Globale sect. courante = 0,5</p>
<p>Systèmes d'éclairage retenus</p>	<p>{ - Symétrique en section courante - Contre flux et symétrique en zone renforcée</p>
<p>Types de sources lumineuses</p>	<p>{ Sodium HP¹ pour les renforcements Sodium HP et fluo-compacts en section courante.</p>
<p>Implantation des luminaires</p>	<p>{ Renforcements, 3 cas : { - En haut de piedroit (Symétrique) - Au dessus des voies (Symétrique) - Au dessus des voies (Contre-flux) Section courante, 2 cas : { - Au dessus des voies - En haut de piedroits</p>
<p>Performances des luminaires</p>	<p>{ Les performances des luminaires sont des données constructeurs. Le calcul des implantations optimisées a été effectué par leurs propres logiciels</p>
<p>Types de chaussée</p>	<p>{ - R1, R2, R3 (3 types) - Eclaircie (hydrodécapée, et grenailée) (2 types) - Colclair, Gerchrome (à 12 & 72 mois) (4 types)</p>
<p>Calcul d'une solution optimisée pour chaque cas</p>	<p>{ - <u>En renforcement</u> : 27 cas : 9 revêtements x 3 implantations. - <u>En section courante</u> : 36 cas : 9 revêt. x (2 types de sources) x (2 implantations)</p>

¹ HP : haute pression

4.3 – Présentation des solutions

Section courante : solutions proposées par Comatelec	COM1	Luminaires équipés de source de 70 ou 100 Watts en sodium Haute pression Implantation latérale
	COM2	Luminaires équipés de source de 70 ou 100 Watts en sodium Haute pression Implantation au-dessus des voies
	COM3	Luminaires équipés d'une source de 70 OU 100 Watts en sodium Haute pression Implantation au-dessus des voies
	COM4	Luminaires équipés chacun de sources de 2X40, 4X36 ou 4x 40 Watts de type fluo-compact Implantation au-dessus des voies
	COM5	Luminaires équipés chacun de 2 sources de 55 ou 4x 40 Watts de type fluo-compact Implantation latérale
Section courante : solutions proposées par Philips	PHIL1	Luminaires équipés de source de 50, 70 ou 100 Watts en sodium Haute pression Implantation au-dessus des voies
	PHIL5	Luminaires équipés de source de 50, 70 ou 100 Watts en sodium Haute pression Implantation au-dessus des voies
	PHIL2	Luminaires équipés chacun de 1 ou 2 sources de 55 Watts de type fluo-compact Implantation au-dessus des voies
	PHIL3	Luminaires équipés chacun de sources de 2x36, 2x55 ou 4x55 Watts de type fluo-compact Implantation latérale
	PHIL4	Luminaires équipés d'une source de 70, 100 ou 150 Watts en sodium Haute pression Implantation au-dessus des voies
Renforcements : solutions proposées par Comatelec	COM	Luminaires de renforcement à 1 source de 400 Watts en sodium Haute Pression Implantation au-dessus des voies Contre-flux
	"sur voies"	Luminaires de renforcement à 1 source de 400 Watts en sodium Haute Pression Implantation au-dessus des voies symétrique
	"latérale"	Luminaires de renforcement à 1 source de 400 Watts en sodium Haute Pression Implantation latérale Symétrique
Renforcements : solution proposée par Philips	PHIL	Luminaires de renforcement à 1 source de 400 Watts en sodium Haute Pression Implantation au-dessus des voies Contre-flux

Le tableau ci-dessus présente des familles de solutions construites avec différentes optiques. Une optique pouvant être associée à plusieurs sources de puissances différentes voire de natures différentes (flu compact ou sodium haute pression), on obtient des familles de solutions, dans le respect des performances exigées.

Il convient de noter que pour les renforcements Philips n'a présenté qu'une solution pour le contre-flux.

4.4 – Données retenues et calculs effectués pour chaque cas

4.4.1 – Investissement initial en couche de roulement (C_{ch})

Ce coût est égal à la surface de la chaussée du tunnel multipliée par le coût du revêtement au m² ; on a donc :

$$C_{CH} = (\text{Coût/m}^2) \times (\text{longueur du tunnel} \times \text{largeur du tunnel})$$

Les différents coûts de chaussée au m² sont donnés en annexe 3.

4.4.2 – Coût de l'installation d'éclairage ($C_{install}$)

Ce coût comprend la fourniture et la pose des appareils d'éclairage entièrement équipés (sources et appareillages) y compris les boîtes de dérivation associées. Il est donc obtenu en multipliant le coût unitaire global de chaque appareil par le nombre d'appareils.

En tunnel une installation d'éclairage est réalisée autour d'un module qui est répété autant de fois que nécessaire pour couvrir la longueur de l'ouvrage ; le nombre de modules s'obtient donc en divisant la longueur de l'ouvrage par la longueur unitaire d'un module.

$$C_{install} = (\text{Coût unitaire global d'un appareil}) \times [(\text{longueur tunnel}) / (\text{longueur du module})]$$

Les valeurs suivantes ont été retenues (en Euros HT aux conditions de l'année 2002) :

Pour tous les types de luminaires :	Suspensions latérales :	34 €
	Suspensions en plafond :	25 €
	Boîte de dérivation avec prise :	130 €

Le détail des coûts par type de luminaire et de source est donné en annexe 2.3

4.4.3 – Coût de fonctionnement annuel (C_{func})

Il est constitué de 3 composants :

- le coût de l'énergie qui rémunère l'électricité consommée par les différents régimes d'éclairage sur une période d'une année,
- le coût de renouvellement des sources (ramené sur une année car les sources peuvent, selon les régimes, ne pas être changées tous les ans),
- le coût de l'entretien apporté à l'installation d'éclairage sur une année (nettoyages des luminaires et interventions sur les auxiliaires).

$$C_{\text{func}} = C_{\text{énergie}} + C_{\text{renouvellementSources}} + C_{\text{lavages \& maintenance}}$$

Le coût de l'**énergie** est obtenu en multipliant la puissance absorbée par l'ensemble des sources (y compris les ballasts) par le temps de fonctionnement ramené à un équivalent plein régime. Cela conduit à retenir :

- *en renforcement* : 100% des lampes qui fonctionnent 1 000 heures par an pour le plein régime et 50% des lampes qui fonctionnent 1 500 heures par an pour le régime moitié, soit une durée annuelle moyenne de 1750h /an en plein régime pour toutes les lampes ;
- *en section courante* : 100% des lampes qui fonctionnent 4760h /an pour le plein régime et 50% des lampes qui fonctionnent 8760h /an pour le régime moitié, soit une durée annuelle moyenne de 6760 h /an en plein régime pour toutes les lampes.

Les consommations retenues pour les différents types de sources utilisées apparaissent dans le tableau ci-dessous:

Types de lampe	Consommation moyenne avec auxiliaire (watts)
50 W Na HP	61,3
70 W Na HP	83,8
100 W Na HP	113,6
150 W Na HP	169
250 W Na HP	276
400 W Na HP	430
36 W PLL électronique	39
40 W PLL électronique	45
55 W PLL électronique	58

Le prix moyen du kWh retenu pour les calculs est de 0,069 € hors taxe.

Le coût de **renouvellement des sources** est obtenu en divisant la durée de vie des sources par le temps de fonctionnement annuel des sources. Il est fait l'hypothèse que les lampes sont remplacées systématiquement quand elles atteignent la fin de leur durée de vie.

Sur la base d'une durée de vie moyenne de 12 000 heures (Sodium HP et Fluo compacte) cela conduit à retenir :

- des lampes qui, en renforcement, sont remplacées au bout de $12\ 000/1\ 750 = 6,85$ ans, soit 82 mois (durée annuelle moyenne de fonctionnement de 1750 h /an plein régime pour toutes les lampes) ;
- des lampes qui, en section courante, sont remplacées au bout de $12\ 000 /6\ 760 = 1,77$ an, soit 21 mois (durée annuelle moyenne de fonctionnement de 6 760 h /an plein régime pour toutes les lampes).

Les fréquences de changement des lampes sont ensuite ramenées en durée annuelle par une règle de trois (changer toutes les lampes tous les 2 ans est équivalent, en termes de coût, à en changer la moitié tous les ans).

Le remplacement d'une source est estimé à 15 euros sur la base d'une intervention nécessitant 2 personnes + 1 camion nacelle.

Les coûts unitaires retenus pour les différents types de sources utilisées apparaissent dans le tableau suivant :

Types de lampe	Prix unitaire HT (€)
50 W Na HP	9,20 €
70 W Na HP	9,20 €
100 W Na HP	12,20 €
150 W Na HP	13,70 €
250 W Na HP	15,25 €
400 W Na HP	16,50 €
36 W PLL électronique	6,10 €
40 W PLL électronique	7,20 €
55 W PLL électronique	7,20 €

Le coût de **lavage et maintenance** est obtenu en multipliant un coût unitaire moyen pour l'entretien (lavage et maintenance) de chaque luminaire par le nombre total de luminaires. Sur la base de 2 nettoyages par an, spécifiques aux luminaires, avec des réparations électriques accidentelles (lampes, ballast), on a retenu un coût forfaitaire de 46 euros H.T. /an /luminaire.

4.4.4 – coût global (C)

Il est composé des coûts d'investissement (chaussée et installation d'éclairage) auxquels s'ajoutent le coût de fonctionnement actualisé sur une durée de vie estimée de l'installation de 20 ans soit :

$$C = C_{\text{ch}} + C_{\text{install}} + [k \times C_{\text{fonct}}]$$

Avec k qui est le coefficient d'actualisation des dépenses projetées sur les 20 ans à venir.

Quelques simulations ont montré que la hiérarchie des différents types de chaussée du point de vue économique est peu affectée tant que ce facteur reste dans la fourchette généralement adoptée pour 20 ans, c'est-à-dire de 12 à 15 selon le taux d'actualisation annuel adopté (de 3 % à 6 %).

5 – RESULTATS DES CALCULS ECONOMIQUES

5.1 –SOLUTIONS RETENUES (DETAILS EN ANNEXE 3.3)

Dans les tableaux de l'annexe 3.3 apparaissent les résultats obtenus avec :

- des chaussées "classiques" de type R1, R2 et R3 ;
- des chaussées éclaircies (grenillées ou hydrodécapées) ;
- des chaussées claires (Colclair et Gerchrome).

Toutes les solutions n'ont pas été retenues pour réaliser la comparaison financière. Les solutions obtenues avec des chaussées de type R1 et R3 ont été écartées ; la chaussée de type R2 a été retenue comme référence car c'est ce type de chaussée qui est le plus fréquemment rencontré en tunnel. Les solutions d'éclairage dont l'uniformité longitudinale était trop éloignée de la prescription de 0,80, c'est-à-dire inférieure ou égale à 0,75. ont été éliminées dans la présentation ci-dessous.

Ont donc été retenues:

- en section courante à éclairage symétrique en plafond (« *sur voies* »), les solutions « COM2 » et « PHIL5 »,
- en section courante à éclairage symétrique en haut de piedroit (« *Latéral* »), les solutions « COM1 » et « PHIL3 »,
- en zone renforcée à contre-flux où seules les solutions en plafond sont possibles, les 2 solutions proposées, une par fournisseur,
- en zone renforcée à éclairage symétrique, où les seules proposées sont celles de la société COMATELEC, une en plafond, et l'autre en haut de piedroit.

Rappelons que les résultats présentés ci-après reposent sur des solutions d'éclairage optimisées données par les constructeurs de luminaires. Les solutions basées sur les photométries des chaussées claires à 73 mois ne sont issues que d'un seul fournisseur.

5.2 – RESULTATS

Tous les tableaux de ce paragraphe sont établis dans l'hypothèse d'un tunnel de 1 000 mètres avec les prix de chaussée indiqués ci-dessous :

Type de chaussée	Prix au m ²
Chaussée claire	19 €
Chaussée éclaircie	11,45 €
Chaussée noire classique	4,60 €

5.2.1 - Coûts d'investissement

5.2.1.1 – En éclairage à contre-flux

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en contre-flux

Coûts d'investissement (Chaussée + app.éclairage)

Ch.Claire: 19,00 € Ch.éclaircie: 11,45 €

Type de chaussée	Section courante (en k€)	Zone renforcée (En k€)	TUNNEL COMPLET
R2	115	120	235
Grenaillée	157	161	318
Colclair 73m	188	140	328
Gerchrome 73m	189	140	329

5.2.1.2 – En éclairage symétrique

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en symétrique

Coûts d'investissement (Chaussée + app.éclairage)

Ch.Claire 19,00 € Ch.éclaircie 11,45 €

Type de chaussée	Section courante (en k€)	Zone renforcée (En k€)	TUNNEL COMPLET
R2	115	243	358
Grenaillée	157	171	329
Colclair 73m	188	233	421
Gerchrome 73m	189	233	422

5.2.2 - Coûts d'exploitation

5.2.2.1 – En éclairage à contre-flux

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en contre-flux

Coûts d'exploitation			
Ch.Claire: 19,00 €		Ch.éclaircie: 11,45 €	
Type de chaussée	Section courante (en k€)	Zone renforcée (En k€)	TUNNEL COMPLET
R2	307	170	477
Grenaillée	303	230	533
Colclair 73m	248	131	379
Gerchrome 73m	250	131	381

Soit :

- un gain de l'ordre de 20% pour une chaussée claire vis à vis d'une chaussée R2.
- un surcoût de 12% pour une chaussée éclaircie vis à vis d'une chaussée R2 ; Ce résultat est expliqué dans les commentaires à propos du tableau 5a du §5.2.4 ci-après.

5.2.2.2 – En éclairage symétrique

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en symétrique

Coûts d'exploitation			
Ch.Claire 19,00 €		Ch.éclaircie 11,45 €	
Type de chaussée	Section courante (en k€)	Zone renforcée (En k€)	TUNNEL COMPLET
R2	307	344	651
Grenaillée	303	245	548
Colclair 73m	248	218	465
Gerchrome 73m	250	218	468

Soit :

- un gain de l'ordre de 29% pour une chaussée claire vis à vis d'une chaussée R2.
- un gain de l'ordre de 17% pour une chaussée éclaircie vis à vis d'une chaussée R2

5.2.2.3 – Tableau de synthèse

Le tableau suivant donne les ratios de coût d'exploitation sur 20 ans en prenant comme référence la solution **classique d'un éclairage symétrique sur une chaussée de type R2** pour un tunnel de 1000 mètres avec les coûts qui apparaissent au paragraphe 5.2.2:

RATIOS DE COÛTS D'EXPLOITATION SUR 20 ANS POUR UN TUNNEL DE 1000 MÈTRES		
Eclairage Chaussées	Contre flux	Symétrique
R2	0,73	1 (=651 k€)
Eclaircies	0,82	0.84
Clares	0,58	0,71

En termes de coûts d'exploitation, les chaussées claires et éclaircies sous éclairage symétrique présentent un intérêt certain vis à vis des chaussées R2 : 16% environ pour les chaussées éclaircies et 29% pour les chaussées claires.

En contre flux, seules les chaussées claires amènent un gain en coût d'exploitation : 20% (0,58/0,73)

5.2.3 - Parts respectives entre l'investissement et l'exploitation sur 20 ans

L'annexe 3.8 donne la proportion des coûts d'investissement (couche de roulement + luminaires équipés) dans les coûts globaux calculés sur 20 ans.

Les tableaux ci-dessous sont établis pour les coûts standards, adoptés dans ce document, des couches de roulements des différents types de chaussée.

□ Avec renforcement en contre-flux.

Tableau g

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en contre-flux					Coûts en € / m ²	
Part des coûts d'investissement (Ch + app.éclairage) dans le coût global sur 20 ans (Invest.+ Exploitation)					Ch.Claire	19,00 €
					Ch.éclaircie	11,45 €
Type de chaussée	Section courante		Zone renforcée CF		TUNNEL COMPLET	
	%	Coût global partiel*	%	Coût global partiel*	%	Coût global Total*
R2	27%	422	41%	290	33%	712
Grenaillée	34%	460	41%	391	37%	851
Colclair 73m	43%	435	52%	272	46%	707
Gerchrome 73m	43%	439	52%	271	46%	710

* =Moyenne des solutions en k€

La part totale de l'investissement [Couche de roulement + appareillage électrique] est naturellement plus importante en chaussée claire (46 %) qu'en chaussée classique (33 %), mais cette différence relativement faible montre qu'au bout de 20 ans les coûts d'exploitation tendent à compenser le fort surcoût des chaussées claires

☐ **Avec renforcement en symétrique**

Tableau h

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en symétrique					Coûts en € / m ²	
Part des coûts d'investissement (Ch + app.éclairage) dans le coût global sur 20 ans (Invest.+ Exploitation)					Ch.Claire	19,00 €
					Ch.éclaircie	11,45 €
Type de chaussée	Section courante		Zone renforcée CF		TUNNEL COMPLET	
	%	Coût global partiel*	%	Coût global partiel*	%	Coût global Total*
R2	27%	422	41%	587	35%	1009
Grenaillée	34%	460	41%	416	37%	877
Colclair 73m	43%	435	52%	451	47%	886
Gerchrome 73m	43%	439	52%	451	47%	890

* =Moyenne des solutions en k€

Ce tableau inspire un commentaire analogue à celui du tableau précédent.

Pour finir, ce phénomène donnant une part appréciable aux frais exploitation quels que soient les coût d'investissement, est naturellement encore plus net si les calculs sont effectués avec un prix de 8,40 € /m² pour la chaussée éclaircie et 12 € /m²¹ pour la chaussée claire

5.2.4 – Coûts globaux : Investissement + exploitation sur 20 ans

Dans les tableaux suivants sont indiqués les coûts financiers (investissement + coûts d'exploitation capitalisés).

☐ **Avec renforcement en contre-flux.**

Tableau 5.a

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en contre-flux				
Coûts globaux (Investissement + exploitation)				
Ch.Claire:		19,00 €	Ch.éclaircie: 11,45 €	
Type de chaussée	Section courante (en k€)	Zone renforcée (En k€)	TUNNEL COMPLET	
R2	422	290	712	
Grenaillée	460	391	851	
Colclair 73m	435	272	707	
Gerchrome 73m	439	271	710	

¹ Voir commentaires à propos de ce coût dans le §5.3.2

Commentaires sur le tableau 5.a renforcement en contre-flux)

- Chaussées claires

Les coûts globaux entre chaussées claires et R2 sont très proches pour un tunnel de 1000 mètres. Le chapitre 5.3.1 ci-après montre comment la longueur influe sur ce résultat.

- Chaussées éclaircies:

Les chaussées grenillées étant systématiquement plus économiques que les chaussées hydrodécapées, celles-ci n'ont pas été prises en compte. Les chaussées éclaircies par granaillage sont plus coûteuses sur 20 ans que les chaussées standard R2 (+ 19% en moyenne).

Explications :

L'analyse des tableaux fait apparaître en fait que l'économie en énergie électrique induite par les chaussées éclaircies est contre-balancée par un nombre plus important de sources, de 50W ou 70W Na HP, au lieu des 100W Na HP qui seraient nécessaires, mais en nombre moindre, sur une chaussée R2. Ce nombre plus important de sources (et donc de luminaires) nécessaires avec une chaussée éclaircie amène un coût d'investissement supplémentaire auquel vont s'ajouter des coûts de maintenance plus importants.

Un exemple simple peut illustrer ce propos :

Pour un niveau donné de luminance à respecter, pour une chaussée de type R2 il pourra être installé des appareils de 100 watts tous les 8 mètres, alors qu'avec une chaussée claire il sera installé des appareils de 50 watts tous les 6 mètres. Si on compare ces 2 solutions sur une longueur identique, à savoir 48 mètres, nous avons une puissance installée¹ de $100 \text{ watts} \times 6 = 600 \text{ watts}$ dans un cas et de $50 \times 8 = 400 \text{ watts}$

Autrement dit, la maintenance sur chaussée éclaircie alourdit le coût global d'exploitation des installations et contre balance l'économie réalisée par une moindre consommation d'énergie.

- Chaussées claires:

Le bilan sur 20 ans en section courante est légèrement défavorable pour les chaussées claires vis à vis des chaussées classiques R2, alors qu'en zone renforcée ce bilan est favorable. Ainsi plus le tunnel est long, plus l'avantage global de la chaussée claire s'amenuise au fur et à mesure de l'allongement de la section courante. Il devient nul à partir d'une certaine longueur (ce point est développé en détail dans le paragraphe §5.3.2

Pour 1000 mètres de longueur en chaussée claire, l'avantage de la zone renforcée est presque contre-balancé par le coût supplémentaire de la chaussée claire en section courante, dont la longueur, dans notre cas, est égale à $1000 \text{ m} - 400 \text{ m} = 600 \text{ mètres}$.

C'est ainsi que le tableau [5.a] de la page précédente, indique des prix globaux très voisins entre R2 et chaussées claires, respectivement 712, 707 et 710 k€.

¹ Cet exemple vise uniquement à illustrer le constat effectué, il n'a pas de réalité même si les chiffres cités sont tout à fait plausibles même si les puissances absorbées par les appareillages des sources ne sont pas prises en compte.

❑ Avec renforcement en symétrique

Tableau 5.b

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en symétrique			
Coûts globaux (Investissement + exploitation)			
	Ch.Claire: 19,00 €		Ch.éclaircie: 11,45 €
Type de chaussée	Section courante (en k€)	Zone renforcée (En k€)	TUNNEL COMPLET
R2	422	587	1009
Grenaillée	460	416	877
Colclair 73m	435	451	886
Gerchrome 73m	439	451	890

Commentaire sur le tableau 5.b (renforcement en éclairage symétrique)

Les chaussées claires et éclaircies grenillées sont proches pour un tunnel de 1000 mètres du point de vue coût global, lequel est inférieur d'environ 13 % à celui d'une chaussée classique de type R2

Tableau de synthèse

Le tableau suivant donne les ratios de coût global par rapport à la solution *classique de référence* d'un éclairage symétrique sur une chaussée de type R2 [indice 1] pour un tunnel de 1000 mètres

Eclairage	RATIOS DE COUTS GLOBAUX POUR UN TUNNEL DE 1000 METRES	
	Contre flux	Symétrique
Chaussées R2	0,71	1 (=1 009 k€)
Eclaircies grenillées	0,84	0,87
Clares	0,70	0,88

Outre les commentaires attachés aux tableaux 5a et 5b ci-dessus, il est à noter ici qu'il apparaît nettement que le choix du type d'éclairage (Symétrique ou à contre-flux) a plus d'importance que celui de la chaussée, le contre-flux étant toujours le plus intéressant.

5.3 – ÉTUDE DE SENSIBILITE

5.3.1 – Influence de la longueur

Nous avons constaté au §5.2 ci-dessus que le bilan sur 20 ans en section courante des chaussées claires est légèrement défavorable vis à vis des chaussées classiques R2 en section courante, alors qu'il est largement favorable en zone renforcée. D'où l'existence d'une longueur limite de tunnel au delà de laquelle le bilan des chaussées claires vis à vis des chaussées de type R2 est négatif.

5.3.1.1 – Avec un renforcement en contre-flux

Des calculs de coûts globaux avec un prix de chaussée claire de 19€ /m² ont été effectués pour des tunnels de 400 m (zone de renforcement seule), 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 3000 m et 4000 m. le tableau résultant figure en annexe 3.5.

Résultats de ces calculs :

- Quelle que soit la longueur du tunnel, la chaussée éclaircie "grenailée" est plus onéreuse (de 16 à 22%) que la chaussée de référence R2,. La chaussée éclaircie "hydrodécapée" est nettement plus chère.
- Pour un tunnel de longueur égale à 400 m (longueur de zone de renforcement) le coût global d'une chaussée claire est inférieur d'environ 9% à celui d'une chaussée classique de type R2.
- Ce pourcentage diminue avec la longueur totale du tunnel si toute la section courante est aussi équipée de chaussée claire; l'équilibre est atteint pour un tunnel de 1 200 mètres environ.

5.3.1.2 - Avec un renforcement en symétrique

Des calculs analogues à ceux décrits dans le paragraphe précédent ont aussi été menés avec un éclairage symétrique

Résultats de ces calculs :

- Pour un tunnel de longueur égale à 400 m (longueur de zone de renforcement) le montant global des coûts en chaussée éclaircie grenailée et en chaussée claire s'avère environ 20% moindre qu'avec une chaussée R2 .
- Ce pourcentage diminue avec la longueur totale du tunnel. Le gain devient nul pour un tunnel de 3000 mètres environ pour une chaussée éclaircie grenailée et pour une chaussée claire.
- Comme précédemment en contre-flux, la chaussée hydrodécapée est toujours la plus chère en terme de coût global (+15% environ)

5.3.1.3 – Tableau de synthèse (exemple d'un tunnel de 3000 m)

(chaussées hydrodécapées non prises en compte)

		RATIOS DE COÛTS GLOBAUX POUR UN TUNNEL DE 3000 MÈTRES	
Chaussées	Eclairage	Contre flux	Symétrique
	R2	0,84	1 (=1 885 k€)
	Éclaircie grenillée	0,98	1
	Claire	0,91	1,01

Par rapport à notre solution de référence les commentaires suivants peuvent être faits :

- En contre-flux, au delà de 1200 m une chaussée claire n'est plus intéressante (voir §5.3.1.1). Ce tableau est conforme.
- En symétrique les chaussées claires et éclaircies (grenillées) sont intéressantes tant que la longueur du tunnel ne dépasse pas 3000 m environ.

5.3.2 – Influence du coût de la chaussée claire ou éclaircie

5.3.2.1 - Avec un éclairage à contre-flux.

En section COURANTE		Totaux en k€ sur 20 ans pour un tunnel de 1000 mètres au total				
SOLUTION constructeurs		R2	HYDRODÉC.	GRENAILLÉ	COL. 73 m	GER. 73 m
Symétrique sur voies	COM2	493	496	573	524	529
	PHIL5	409	547	411	400	400
Symétrique latéral	COM1	435	467	510	471	478
	PHIL3 PLL	484	495	439	607	607

Zone d'éclairage RENFORCÉ (400m)		Totaux en k€ sur 20 ans pour un tunnel de 1000 mètres au total				
SOLUTION constructeurs		R2	HYDRODÉC.	GRENAILLÉ	COL. 73 m	GER. 73 m
Contre-flux sur voies	COM 400WNaHP	294	414	408	298	298
	PHIL 400WNaHP	286	501	374	246	244
Symétrique sur voies	COM 400WNaHP	695	856	487	522	522
Symétrique latéral	COM 400WNaHP	587	754	416	451	451

Meilleure solution (sect.courante + renforcement) de	<i>Dans les faits, seules les solutions à contre-flux sont ici prises en compte</i>					
	PHILIPS	694	996	785	645	643
Meilleure solution en symétrique uniquement	COMATELEC	1022	1221	927	922	929
	meilleures solutions					
<i>= Estimations d'après résultats obtenus sur Colclair & Gerchrome 12 mois</i>						

Etude économique globale des chaussées claires sur la base de 19 € H.T./m²
Et des chaussées éclaircies à 11,45 € /m²

Renforcement de 400 mètres en CONTRE-FLUX :
Totaux investissement + exploitation en k€ H.T. sur 20 ans (Éclairage sur voies)

Longueur totale du tunnel	Types de chaussée					Gains par rapport aux ch. R2 (- si pertes)			
	R2	Hydrod.	Grenailé	Colclair	Gerchrome	ch. grenailées		chaussées claires	
						k€	%	k€	%
400 (enft unigt)	449	635	550	407	407	-102	-22,6%	41,6	9,3%
500	493	690	600	457	458	-108	-21,9%	35,2	7,2%
1000	712	964	851	707	710	-139	-19,6%	3,6	0,5%
1500	931	1238	1102	957	961	-171	-18,4%	-28,1	-3,0%
2000	1150	1512	1353	1207	1213	-203	-17,6%	-59,8	-5,2%
3000	1588	2060	1854	1706	1717	-266	-16,7%	-123,2	-7,8%
4000	2027	2607	2356	2206	2220	-329	-16,2%	-186,6	-9,2%

Etude économique globale des chaussées claires sur la base de 19 € H.T./m²
Et des chaussées éclaircies à 11,45 € /m²

Renforcement de 400 mètres en éclairage symétrique:
Totaux investissement + exploitation en k€ H.T. sur 20 ans (Éclairage sur voies)

Longueur totale du tunnel	Types de chaussée					Gains par rapport aux ch. R2 (- si pertes)			
	R2	Hydrod.	Grenailé	Colclair	Gerchrome	ch. grenaillées		chaussées claires	
						k€	%	k€	%
400 (enft unigt)	746	922	576	586	588	170	22,8%	158,6	21,3%
500	790	974	626	636	638	164	20,7%	152,3	19,3%
1000	1009	1235	877	886	890	132	13,1%	120,6	12,0%
1500	1228	1496	1128	1136	1142	100	8,2%	88,9	7,2%
2000	1447	1756	1378	1386	1394	69	4,7%	57,2	4,0%
3000	1885	2278	1880	1886	1897	5	0,3%	-6,2	-0,3%
4000	2324	2800	2382	2386	2401	-58	-2,5%	-69,5	-3,0%

Avec une chaussée claire, le gain se fait sur la zone renforcée mais le bilan est légèrement négatif en section courante : cela conduit à un bilan globalement négatif dès lors que la section devient très longue. Nous avons donc effectué plusieurs simulations pour trouver le coût permettant d'atteindre le point d'équilibre. : cette valeur est d'environ 12 € /m². **Autrement dit, les chaussées claires à 12 € /m², ou moins, sont toujours plus intéressantes quelle que soit la longueur du tunnel.**

Par ailleurs, une chaussée claire a été récemment proposée et installée à un coût d'environ 10,50 € /m². Les calculs précédents ont donc été repris avec cette valeur. Nous avons également fixé la valeur de la chaussée éclaircie à son plus bas niveau: 8,40 € /m², c'est-à-dire sans décapage.

Rappelons que le décapage permet de faire apparaître la clarté définitive d'une chaussée éclaircie, mais celle-ci peut aussi s'obtenir après plusieurs mois de circulation, sans décapage initial.

Résultats de ces calculs avec un éclairage à contre-flux :

- Pour les chaussées claires le gain sur les coûts globaux, vis à vis d'une chaussée R2, est de l'ordre de 16 % pour un tunnel de 400 m et décroît avec la longueur du tunnel jusqu'à 4,3 % pour 10 km.
- La chaussée éclaircie non grenailée, malgré le prix peu élevé de 8,40 € /m², n'a pas d'intérêt économique quelle que soit la longueur du tunnel.

5.3.2.2 – Avec un éclairage symétrique

Résultats obtenus:

- Pour des chaussées claires au prix de 10,50 € /m², le gain sur les coûts globaux, vis à vis d'une chaussée R2, est de l'ordre de 25 % pour un tunnel de 400 m et décroît avec la longueur du tunnel jusqu'à 6 % pour 10 km.

- La chaussée éclaircie non grenillée, avec un prix de 8,40 €/m², s'avère toujours intéressante, économiquement parlant, quelle que soit la longueur du tunnel jusqu'à 6 000m
- Par rapport au cas précédent (avec un éclairage en contre-flux) les chaussées claires sont encore plus intéressantes quelle que soit la longueur.

5.3.2.3 – Tableau de synthèse pour **un tunnel de 1 000 mètres**.

RATIOS DE COÛTS GLOBAUX POUR UN TUNNEL DE 1000 MÈTRES ET COÛTS DE CHAUSSEE CLAIRES/ECLAIRCIES AMOINDRIS		
Eclairage Chaussées	Contre flux	Symétrique
R2	0,71	1 (=1 009 k€)
Éclaircie	0,82	0,84
Claire	0,63	0,80

Par rapport à notre solution de référence les commentaires suivants peuvent être faits :

- Le contre-flux est plus intéressant que le symétrique (de l'ordre de 10 %) quel que soit le type de chaussée
- En symétrique les chaussées claires et éclaircies (grenillées) sont intéressantes (gain de 15 à 20 % environ).
- En contre-flux, les chaussées claires apportent un gain de l'ordre de 12%.(0.62/0.70)

Avec de tels prix, il est également intéressant d'équiper de plus longs tunnels en chaussées claires ou éclaircies. Des calculs effectués pour un tunnel de 3000 mètres conduisent vers les mêmes conclusions générales, les gains relatifs étant toutefois moins importants.

6 – Conclusions générales

6.1 - Les 3 premiers chapitres.

Le premier chapitre de ce rapport rappelle les caractéristiques et les principaux problèmes posés par la mise en œuvre de tous les types de chaussée à l'intention de ceux qui ne sont pas spécialistes en la matière. Il permet d'introduire le chapitre suivant propre aux chaussées en tunnel, et enfin le troisième chapitre décrivant plus précisément la problématique des chaussées claires.

De ces trois premiers chapitres, il ressort qu'à l'air libre les chaussées claires sont plus difficiles et onéreuses à mettre en œuvre que les chaussées classiques, ces difficultés étant accrues dans un tunnel. L'étude nous permet d'évaluer le surcoût induit par cette mise en œuvre plus délicate, ce surcoût s'ajoutant à celui de l'élaboration du produit.

6.2 - Les chapitres 4 et 5

Les deux derniers chapitres abordent l'éventuel intérêt économique des chaussées claires et éclaircies en tunnel à travers la comparaison de plusieurs types de chaussée. Les calculs de coût ont porté sur les sommes totales : investissement initial + exploitation actualisé sur 20 ans ..

1. En termes de coût d'investissement les chaussées claires et éclaircies sont plus chères que les chaussées de type R2, au quadruple environ pour les premières, et plus du double pour les dernières (sur la base des prix du §5.2).
2. En termes de coûts d'exploitation, les chaussées éclaircies sont intéressantes sous éclairage symétrique, les chaussées claires le sont quel que soit l'éclairage (cf §5.2.2.3).

Sachant qu'un euro en exploitation est souvent plus difficile à trouver qu'un euro en investissement, il peut être conclut que l'intérêt des chaussées claires en exploitation pourrait être le principal argument à leur utilisation en tunnel, cet avantage étant relativement important, de l'ordre de 30%

3. Au plan économique global (investissement + exploitation sur 20 ans): il ressort de l'étude que les conclusions dépendent de la longueur du tunnel et du coût des chaussées claires et éclaircies, le coût des premières étant sujettes à des modifications orientées à la baisse:

□ *Dans les conditions standard de l'étude (tunnel de 1000m, chaussée claire à 19€/m²)*

- Les chaussées claires sont comparables à la chaussée classique R2 en éclairage à contre-flux. (Elles sont plus coûteuses si le tunnel fait plus de 1200 mètres environ). La chaussée éclaircie grenailée est plus coûteuse.
- Les chaussées claires et éclaircies grenailées sont toutes deux aussi intéressantes avec un éclairage symétrique

□ *En faisant varier longueur du tunnel ou coût des chaussées claires et éclaircies*

- les chaussées claires sont les plus intéressantes, pour tout type d'éclairage et quelle que soit la longueur du tunnel, si et seulement si leur coût au m² est inférieur à 12 €/m².
- Les chaussées éclaircies *non grenailées* (moins chères) présentent un bilan positif vis à vis des chaussées classiques R2 éclairage symétrique tant que la longueur du tunnel ne dépasse pas 6000 m.

4. En termes de confort, si le coût global d'un tunnel équipé de chaussée claire (ou éclaircie) est parfois un peu plus important que celui d'un tunnel équipé d'une chaussée classique, il faut indiquer que les chaussées claires apportent à l'usager un confort visuel

supplémentaire et rendent l'ambiance intérieure plus agréable. Cet aspect peut, à coûts globaux assez proches, être un élément suffisant pour choisir ce type de chaussée.

ANNEXE 1 CARACTERISTIQUES PHOTOMETRIQUES DES CHAUSSEES ETUDIEES

Caractéristiques photométriques mesurées.

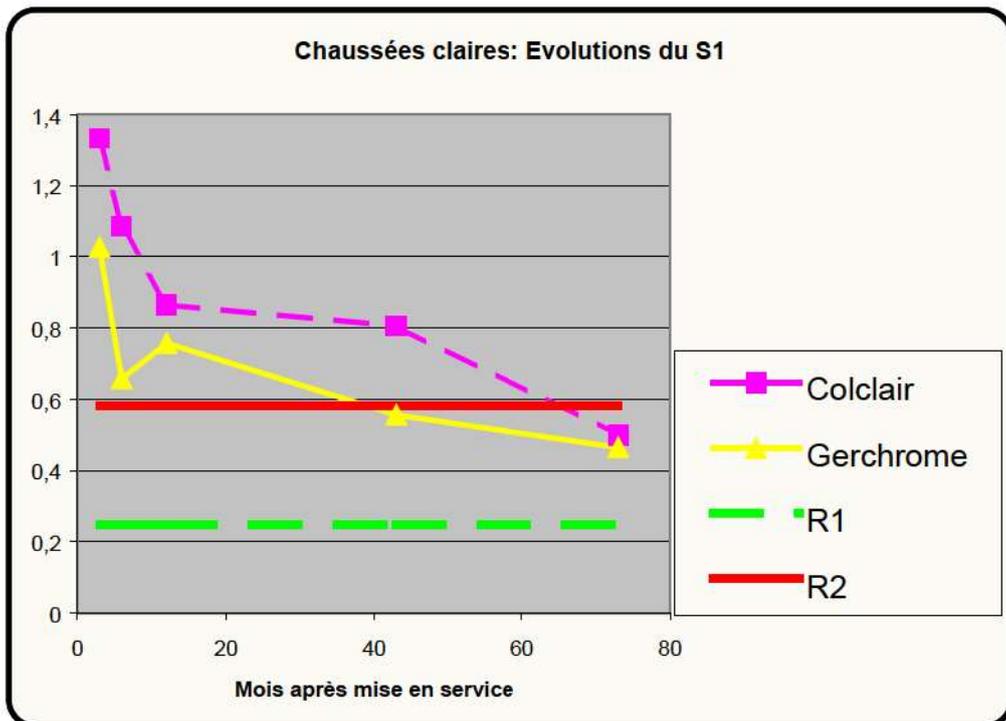
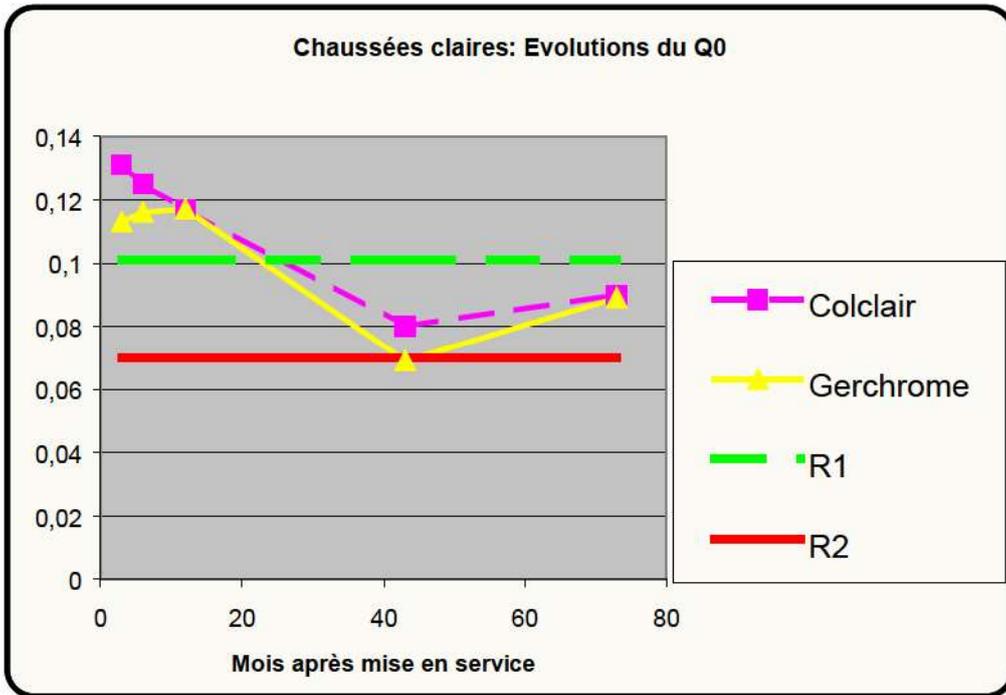
Catégorie de revêtement	Chaussées	Q ₀	S ₁	S ₂	Cat. CIE
Classiques normalisés	R1 CIE	0,10	0,247	1,546	R1
	R2 CIE	0,07	0,582	1,798	R2
	R3 CIE	0,07	1,109	2,381	R3
	R4 CIE	0,08	1,549	3,042	R4
Chaussées claires	Colclair_3mois	0,130	1,335	2,000	R3
	Colclair_6mois	0,125	1,107	1,923	R3
	Colclair_12mois	0,117	0,823	1,667	R3
	Colclair_43mois *	0,080	0,805	1,713	R2
	Colclair_grenailé_43m	0,084	0,431	1,485	R2-R1
	Colclair_55mois *	0,091	0,336	1,334	R1
	Colclair_73mois	0,090	0,50	1,50	R2
	Gerchrome_3mois	0,113	1,026	1,835	R3
	Gerchrome_6mois	0,116	0,657	1,659	R2
	Gerchrome_12mois	0,117	0,757	1,711	R2
	Gerchrome_43mois	0,069	0,556	1,516	R2
Gerchrome_73mois	0,089	0,465	1,50	R2	
Revêtements éclaircis	R2 Hydrodécapé	0,064	0,65	1,63	R2
	R1 Grenailé	0,097	0,10	1,25	R1

- Sur chaussées claires, Il apparaît à 43 mois et 55 mois de brusques baisses sur Q0 accompagnées de valeurs S1 faibles qui tendent vers les caractéristiques de chaussée de classe R1. Pour enlever toute ambiguïté sur l'exactitude des mesures, nous avons fait réaliser à 73 mois de nouvelles mesures : La photométrie des chaussées claires COLCLAIR et GERCHROME apparaît stabilisée entre les caractéristiques R1 et R2 (Voir graphiques suivants).

L'évolution des caractéristiques des chaussées claires dans le temps,

Montre qu'elles sont très spéculaires à la mise en service (Classe R3). Mais elles répondent au bout de quelques mois de service aux caractéristiques R2, avec une tendance vers R1. Autrement dit ces chaussées sont un peu moins spéculaires que celles de catégorie typiquement R2, et présentent un Q0 de 0,09 au lieu de 0,07

Les courbes ci-après montrent l'évolution comparée des caractéristiques Q0 et S1 de ces chaussées.



ANNEXE 2 HYPOTHESES ET COUTS RETENUS

1 – Prescriptions concernant l'installation

1.1 Types de chaussées

7 types de chaussée ont été étudiées :

- COLCLAIR (à 12 mois et 72 mois)
- GERCHROME (à 12 mois et 72 mois)
- Revêtement éclairci par grenailage (1)
- Revêtement éclairci par utilisation du procédé RUGOR (2)
- Revêtement classique R1
- Revêtement classique R2
- Revêtement classique R3 .

(1) et (2) : *Il s'agit des 2 procédés envisagés actuellement pour l'éclaircissement, avant mise en service, d'une chaussée éclaircie (granulat clair + liant noir). Ces procédés servaient initialement à redonner de l'adhérence à une chaussée ancienne, et sont utilisés ici pour décaper la couche superficielle de liant noir afin de faire ressortir la couleur des granulats :*

- Le grenailage est un procédé employé par l'entreprise GAILLEDROT, à base de microbilles d'acier (NB : tunnel Prado-Carénage).
- Le procédé RUGOR est utilisé par l'entreprise Jean LEFEBVRE, avec de l'eau sous pression (> 1500 bars). (NB : 2è" tube Chamoise, on a observé que les granulats conservaient une couleur caramel).

(On observe qu'aujourd'hui encore que 95 % des chaussées en tunnel sont classées R2 ou R3).

1.2 Types de tunnels

On considère un tunnel unidirectionnel de largeur roulable 9 mètres, de longueur 1000 mètres, doté d'une zone de renforcement de 400 mètres (la longueur du tunnel n'influe pas sur les calculs à proprement parler, mais sur les ratios de longueur éclairage de renforcement / éclairage de base).

1.3 Configurations et niveaux d'éclairage

1 La hauteur de feu est de 5 mètres.

2 Renforcement d'entrée :

- En contreflux en sodium haute pression, au-dessus des voies.
- En symétrique, au dessus des voies & en haut de piédroits

Récapitulatif : 9 revêtements * 3 configurations = 27 cas.

3 Eclairage en section courante.

A – Deux lignes en plafond séparées de 5m50.

B – Deux lignes en haut de piédroits

Pour chaque implantation ci-dessus, les calculs doivent être effectués pour 2 types de lampe : sodium haute pression tubulaire, et fluo-compacte.

Récapitulatif : 9 revêtements * 2 implantations * 2 types de lampe = 36 cas.

4 Niveaux :

Le facteur de dépréciation des niveaux dû aux salissures est pris égal à 25% et les réflexions de parois ne sont pas prises en compte.

Niveaux prescrits correspondants à des voiles moyens pour 90 kms/h :

- Renforcement: 100 Cd/m² en éclairage symétrique.
En contre flux a) 68 Cd/m² sur chaussée claires
b) 60 Cd/m² sur chaussée. Éclaircie.
c) 48 Cd/m² sur chaussée classique R2

Les niveaux ici prescrits en contre flux tiennent compte des résultats présentés dans le 2ièm tableau du §3.2

- Section courante : 4 cd/m'.

5 Dépréciation : 25 % (facteur de maintenance 0,75).

6 Uniformités :

- Longitudinale : 0,8
- Globale : 0,8 en renforcement, 0,5 en section courante.

7 Maillage des points de calcul : Tel que défini par l'A.F.E

8 Facteur d'éblouissement : « Theshold Increment » <= 10%

9 Autres considérations :

- Les sources sont équipées ou non de gradateurs (au choix du fabricant).
- Les calculs seront effectués avec les matrices photométriques propres aux luminaires (Comatelec - Philips).
- Les réflexions de parois ne sont pas prises en compte
- Le paramètre de qualité du contraste Lchaussée/(Eclairage vertical) sera à calculer.
- Le prix des luminaires est fixé identique par catégorie pour les deux constructeurs (Voir§ suivant)

2 – Les sources

2.1 Durée de vie et remplacement des lampes

Durée de vie moyenne utile : 12000 heures (SHP et Fluo compacte)

Il est fait l'hypothèse que les lampes sont alors remplacées systématiquement.

2.2 Temps de fonctionnement et fréquence de remplacement

- A/ *En renforcement* :
- 100% des lampes fonctionnent 1000 heures par an
 - 50% des lampes fonctionnent 1500 heures par an

Soit une durée annuelle moyenne de 1750h /an pour toutes les lampes

Les lampes sont remplacées au bout de $12000/1750 = 6,85$ an, soit 82 mois

- B/ *En section courante* :
- 100% des lampes fonctionnent 4760h /an
 - -50% des lampes fonctionnent 8760h /an

Soit une durée annuelle moyenne de 6760 h /an pour toutes les lampes.

Les lampes sont remplacées au bout de $12000/6760 = 1,77$ an soit 21 mois.

3 – Les coûts

Tous les coûts indiqués ci-dessous s'entendent en Euros hors taxes

3.1 - Coût des chaussées claires

Pour un revêtement clair appliqué sur 3 cm d'épaisseur, sur une assez grande surface en tunnel, 2000m de longueur sur 9 m de large par exemple, les présentes investigations ont montré que le produit posé revient à 19 euros/m² environ (produit + mise en œuvre), contre 4,60 euros/m² pour un enrobé noir classique. L'annexe 3.1 précise ce prix final.

Il est tenu compte du surcoût in situ induit par le nettoyage du matériel en début de chantier et spécifique à la mise en œuvre des enrobés clairs : 3800 € (voir §3.3.6). A noter toutefois que l'incidence de ce surcoût par rapport au prix du m² posé diminue selon la longueur du tunnel et reste très modeste : de 0,42 € au m² pour un tunnel de 1000 mètres à 0,1 €/m² pour 4000 mètres.

3.2 - Prix des luminaires et des sources

(en € H.T. année 2003)

Coûts valables pour tous les types de luminaires :

Suspensions latérales : 34€
 Suspensions en plafond : 25€
 Coffret avec prise et M.O. : 130€

Types de LAMPE	Prix net unitaire (€)	Flux par lampe (Lumen)	Consommat. avec auxiliaire (Watts)	Prix LUMINAIRE avec lampe(s) et cordons		Prix total Fourniture + pose en plafond*1	Prix total Fourniture + pose sur piédroits*2
				Nbre de lampes			
50W SHP	9,20€	4400	61,3	1	245€	400€	409€
70W SHP	9,20€	6600	83,8	1	245€	400€	409€
100W SHP	12,20€	10500	113,6	1	275€	430€	439€
150W SHP	13,70€	16500	169	1	455€	610€	619€
250W SHP	15,25€	32000	276	1	455€	610€	619€
400W SHP	16,50€	55000	430	1	455€	610€	619€
36W PLL ferrom	9,45€	2900	90	2	320€	475€	484€
36W PLL électronique	6,10€	2700	72	2	350€	505€	514€
40W PLL électronique	7,20€	3500	89	1	245€	400€	409€
				2	350€	505€	514€
55W PLL électronique	7,20€	4500	116	1	245€	400€	409€
				2	350€	505€	514€

*1 : Prix total = prix lampes + coffret (130€) + suspension en plafond (25€).

*2 : Prix total = prix lampes + coffret (130€) + suspension latérale (34€).

3.3 - Coût d'entretien

A/ Remplacement d'une lampe avec 2 personnes + 1 voiture échelle : 15 euros /lampe.

(Voir fréquences au §2.2.3.8 ci-dessus)

B/ Il est admis 2 nettoyages par an spécifiques aux luminaires, avec des réparations électriques accidentelles (lampes, ballast, C.C), soit forfaitairement 46 euros H.T. /an /luminaire selon notre groupe de travail.

3.4 - Durée de vie de la chaussée

Comme nous l'avons vu au §2.2.2, la durée de vie d'une chaussée en tunnel atteint facilement 20 ans. Nous adopterons cette durée pour toutes les comparaisons économiques, en l'adoptant également comme période d'amortissement.

ANNEXE 3 : LES CALCULS

3.1 - Description des calculs

3.1.1 - Calculs photométriques

- Le haut de la première feuille de l'annexe 3.2 rappelle la valeur des différents paramètres utilisés. Les annexes 3.3 à 3.7 sont la copie de feuilles de calcul EXCEL permettant de faire varier à volonté tous ces paramètres.
- Pour chaque type de chaussée et de configuration d'éclairage (sous la voûte ou en haut de piédroits), les sociétés Philips et Comatelec nous ont fourni leur solution d'éclairage répondant au mieux aux prescriptions. Certaines d'entre elles s'éloignent cependant de notre demande concernant l'uniformité longitudinale devant être égale à 0,8

Les 7 premières colonnes des « données constructeur par module », de « Lmoy en cd/m² » à « Ntotal de sources » sont issues de leur logiciel de calcul respectif. *Nous n'en avons pas la maîtrise.*

La colonne suivante « Source+ballast (w) » est issue d'un consensus concernant la consommation du ballast de chaque type de source, 15 watts par exemple pour une lampe de 70 w en sodium haute pression.

Les 3 dernières colonnes sont la conséquence des précédentes :

Puissance par pas (W) : = (Ntotal de sources) * puissance (Source+ballast)

Puissance totale en kW :

* En section courante : =Puissance_par_pas*LongueurTot/Pas_du_module/1000

* En zone renforcée : =Puissance_par_pas*LongueurRenf/2/Pas_du_module/1000

Conso./an en kW:

* En section courante : =Puissance_totale(kW)*(Heures en régime de base)

* En zone renforcée : =Puissance_totale(kW)*(heures équivt plein soleil)

NB : Le calcul de puissance en zone renforcée fait apparaître une division par 2. En effet les calculs de puissance l'ont été pour les seuil d'entrée dans chaque cas. En fait l'éclairage de renforcement décroît régulièrement dans la zone renforcée jusqu'à devenir nul en section courante. La division par deux permet de donner une bonne estimation de la puissance réelle consommée tout au long des zones renforcées

3.1.2 - Calculs économiques

Pour chaque type de chaussée il a été établi un tableau reprenant en lignes chaque solution constructeur et en colonnes les coûts :

- Annuels de lampe à remplacer, d'énergie (précédemment calculée), d'entretien des lampes
- D'investissement en matière de chaussée (sur la base de prix au mètre carré) et appareils d'éclairage

A / Concernant les coûts annuels :

Coût énergie = Consommation/an * (Coût kWh)

Sources = Nbre_de_sources_par_module
*LongueurTot/Pas_du_module
*Heures_regimebase/Vie_des_sources
*(couts_lampes + Remplacelampe)

(heures_regimeBase) est remplacé par (heures équivalent plein soleil)
pour les zones renforcées)

Entretien = nbre_appareils
*LongueurTot/Pas_du_module
*Coût_LAVAGE

La colonne « Total » est la somme des 3 précédentes

B / Concernant les investissements en k€:

En éclairage :=Nbre_appareils_par_module*LongueurTot/R1_Pas_du_module
*R1_Coût_appareils/1000
(LongueurTot est remplacé par longueur-renforcée pour la zone
renforcée)

Chaussée : = (LongueurTot)*Cout_ChStd*LargeurCH/1000
(Cout_Chstd remplacé par Cout_Ch grenailé, Cout_ChClaire selon le cas..)

C / TOTAL ACTUALISÉ= Investissement_eclairage
+Investissement_chaussée
+Coûts annuels*facteur_d'actualisation_sur_futurs_20ans.

Le bilan de l'étude s'effectue sur ce total actualisé

ANNEXE 3.2

Calculs photométriques pour chaque type de chaussée

Données de calcul

DONNEES DE CALCUL	
Coût chaussée std/m ²	4,60 €
Coût Ch. grenailée/hydro	11,40 €
Coût Chaussée claire/m ²	19,00 €
Mise en œuvre pour le tunel	3 800 €
Coût KWH	0,07 €
Coût LAVAGE	46,00 €
Largeur de chaussée (m)	9
Heures équiv Psoleil	1750
H. équiv Régime de base	6760
Vie des sources (H)	12000
Facteur ACTUAL 20ans	13
F_Ch-Claire_enCF	0,685
F_Ch-eclaircie_enCF	0,594
F_Chstd_enCF	0,475

Coût lampe 50-70w NaHP	9,20 €
Coût lampe 100w NaHP	12,20 €
Coût lampe 150w NaHP	13,70 €
Coût lampe 400w NaHP	16,50 €
Coût lampe 36w PLL	6,10 €
Coût lampe 40w PLL	7,20 €
Coût lampe 55w PLL	7,20 €
Appareil 70W NaHP	400 €
Appareil 100W NaHP	430 €
Appareil 150-400W NaHP	610 €
Appareil PLL 1 lampe	400 €
Appareil PLL 2 lampes	505 €
remplct lampe 2 pers	15 €
Surcoût Piedroit	9,20 €

Coût des appareils = fourniture+pose en plafond

Calculs pour revêtements de type R1

ECLAIRAGE	SOLUTION	CONSTRUCTEUR	DONNEES CONSTRUCTEUR par module								Calculs sur longueur totale			
			Lmoyen cd/fr ²	Ug	U1	Emoy en lux	R=E/L	Pas du module	Nbre d'appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance totale (kW)	Conso./an en kWh
	Sur voies	COM2 70W NaHP	6,45	0,79	0,76	85	13,2	7,6	2	2	85	170	111,8	756 053
		COM3 70W NaHP	5,6	0,71	0,74	85,5	11,9	12	2	2	85	170	70,8	478 833
		COM4 2*40W PL	5,6	0,75	0,79	70	12,5	8	2	4	45	180	112,5	760 500
	Latéral	COM1 70W NaHP	5,4	0,91	0,87	66	12,2	9,4	2	2	85	170	90,4	611 277
		COM5 2*55W PL	5,2	0,82	0,79	76	12,3	8,4	2	4	67	268	159,5	1 078 381
SECTION COURANJE	Sur voies	PHIL1 70W NaH	5,76	0,52	0,75	64	11,1	13	2	2	85	170	65,4	442 000
		PHIL5 70WNaHP	6,86	0,66	0,75	85	12,4	9,8	2	2	85	170	86,7	586 387
		PHIL2 1*55W PL	5,34	0,75	0,76	66,5	12,5	8,2	2	2	82	164	100	676 000
	Latéral	PHIL4 70W NaH	5,56	0,81	0,75	65	11,7	11,2	2	2	85	170	75,9	513 036
		PHIL3 2*36W B	5,52	0,81	0,76	85,7	11,9	9,5	2	4	46	184	96,8	659 653
RENFORCÉ	CONTRE FLUX	COM 400WNaHP	63	0,79	0,86	658,4	10,421	5,4	2	2	438	876	32,2	55 349
		PHIL 400WNaHP	63	0,88	0,96	673,6	10,742	5,8	2	2	438	876	30,2	52 627
	SYMETRIQUE	Sur voies*	132	0,84	0,99	1765	13,371	3	2	2	438	876	58,4	102 200
		Latéral*	133	69	98	1631	12,263	3,7	2	2	438	876	47,4	82 865

* Cox 400WNaHP

Calculs pour revêtements de type R2														
ECLAIRAGE	SOLUTION CONSTRUCTEUR		DONNEES CONSTRUCTEUR par module								Calculs sur longueur totale			
			Lmoyen cd/m²	Ug	UI	Emoy en lux	R=EA	Pas du module	Nbre d' appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance totale (kW)	Conso./an en KWH
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 100W NaHP	6	0,78	0,79	126	21,0	8,2	2	2	114	228	139,0	959 805
		COM3 100W NaHP	5,6	0,75	0,7	103	18,4	4	2	2	114	228	285,0	1 826 600
		COM4 2*36V PLL	5,5	0,74	0,798	106	19,3	8,8	2	4	39	156	89,6	599 182
	Latéral	COM1 100W NaHP	5,4	0,91	0,87	66	12,2	9,4	2	2	114	228	121,3	819 830
		COM5 2*40WPLL	5,3	0,77	0,82	109	19,4	9	2	4	45	180	100,0	676 000
		PHIL1 100W NaHP	6,36	0,71	0,75	119	18,7	11,1	2	2	114	228	102,7	694 270
SYMETRIQUE	Sur voies	PHIL5 100WNaHP	6,74	0,67	0,76	126	18,7	10	2	2	114	228	114,0	770 640
		PHIL2 2*55WPLL	5,95	0,71	0,76	112	18,8	9,7	2	4	67	268	139,1	933 856
		PHIL4 100WNaHP	5,35	0,77	0,76	96,9	16,5	11,75	2	2	114	228	97,0	655 864
REINFORCE	CONTR ELIX	PHIL3 2*55WPLL	5,34	0,78	0,78	100	18,7	9,8	2	4	67	268	136,7	924 327
		COM 400WNaHP	63	0,78	0,83	771,9	12,2	4,6	2	2	438	876	37,7	66 034
		PHIL 400WNaHP	64	0,69	0,96	816,5	12,8	4,8	2	2	438	876	36,6	64 033
REINFORCE	SYMETRIQUE	Sur voies*	133	0,84	0,99	2822	21,2	1,9	2	2	438	876	92,2	161 368
		Latéral*	135	0,69	0,96	2779	20,6	2,26	2	2	430	876	77,5	135 664
		* Com 400WNaHP												

Calculs pour revêtements de type R3														
ECLAIRAGE	SOLUTION constructeurs		DONNEES CONSTRUCTEUR par module								Sur longueur totale			
			Lmoyen cd/m²	Ug	UI	Emoy en lux	R=EA	Pas du module	Nbre d' appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance totale (kW)	Conso./an en KWH
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 100WNaHP	5,3	0,83	0,91	136	25,7	7,6	2	2	114	228	150,0	1 014 000
		COM3 100WNaHP	5,6	0,75	0,7	103	18,4	12	2	2	114	228	95,0	642 200
		COM4 2*40WPLL	5,2	0,72	0,81	121	23,3	9,4	2	4	45	180	95,7	647 234
	Latéral	COM1 100WNaHP	5,4	0,82	0,9	123	22,8	8	2	2	114	228	142,5	963 300
		COM5 2*55WPLL	5,5	0,76	0,81	128	23,3	10	2	4	67	268	134,0	905 840
		PHIL1 100WNaHP	5,33	0,81	0,75	106	19,9	12,6	2	2	114	228	90,5	611 619
SYMETRIQUE	Sur voies	PHIL5 100WNaHP	5,35	0,66	0,61	117	21,9	11,3	2	2	114	228	100,9	661 982
		PHIL2 2*55WPLL	5,33	0,71	0,85	118	22,1	9,23	2	4	67	268	145,2	981 408
		PHIL4 150WNaHP	6,28	0,72	0,75	136	22,0	13,2	2	2	169	336	127,3	860 364
REINFORCE	CONTR ELIX	PHIL3 2*55WPLL	5,33	0,8	0,91	119	22,3	8,25	2	4	67	268	162,4	1 097 988
		COM 400WNaHP	64	0,71	0,89	726,3	11,3	4,9	2	2	438	876	35,5	62 150
		PHIL 400WNaHP	63	0,66	0,96	770,0	12,2	5,1	2	2	438	876	34,5	60 374
REINFORCE	SYMETRIQUE	Sur voies*	137	0,84	0,98	2770	27,5	1,4	2	2	438	876	125,1	219 000
		Latéral*	132	0,68	0,97	3343	25,3	1,8	2	2	430	876	97,3	170 333
		* Com 400WNaHP												

Calculs pour revêtements de type grenailé														
ECLAIRAGE	SOLUTION constructeur	DONNEES CONSTRUCTEUR par module								Calculs sur longueur totale				
		Lmoy en cm²	Ug	U	Emoy en lux	R=EL	Pes du module	Nbre d' appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance en KWH	Conso. An en KWH	
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 70WNaHP	7,14	0,77	0,76	93,0	13,025	7	2	2	85	170,0	132,6	896 093
		COM3 70WNaHP	5,6	0,66	0,7	66,5	11,875	12	2	2	85	170,0	95,0	642 200
		COM4 2*40WFL	6	0,74	0,77	75,0	12,5	7,5	2	4	45	180,0	100,0	676 000
	Latéral	COM1 100WNaHP	5,3	0,84	0,94	114,0	21,509	8,6	2	2	114	228,0	132,6	896 093
		COM5 2*55WFL	6	0,77	0,8	133,0	22,167	9,6	2	4	67	268,0	133,6	943 593
		PHIL1 50WNaHP	5,33	0,52	0,77	56,9	10,675	8,75	2	2	65	130,0	66,7	450 667
REINFORCE	Sur voies	PHIL5 50WNaHP	5,38	0,73	0,81	61,0	11,338	9	2	2	65	130,0	72,2	486 232
		PHIL2 55WFL	5,78	0,73	0,75	66,5	11,505	8,2	2	2	67	134,0	81,7	552 341
		PHIL4 70WNaHP	6,36	0,85	0,75	69,9	10,991	10,5	2	2	85	170,0	81,0	547 238
	Latéral	PHIL3 55WFL	5,34	0,87	0,81	58,9	11,03	8,35	2	2	67	134,0	80,2	542 439
		COM 400WNaHP	81	0,79	0,94	1019,9	12,533	3,9	2	2	438	876,0	45,0	78 767
		PHIL 400WNaHP	78	0,86	0,93	1030	13,136	4	2	2	438	876,0	40,9	71 606
SYMETRIQUE	Sur voies*	132	0,84	0,96	1689	12,795	3,2	2	2	438	876,0	54,8	95 813	
	Latéral*	132	0,7	0,89	1631	12,356	3,8	2	2	438	876,0	46,1	80 694	
* Com 400WNaHP														

Calculs pour revêtements de type Hydrodécapé														
ECLAIRAGE	SOLUTION constructeur	DONNEES CONSTRUCTEUR par module								Calculs pour 1000m				
		Lmoy en cm²	Ug	U	Emoy en lux	R=EL	Pes du module	Nbre d' appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance en KWH	Conso. An en KWH	
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 100WNaHP	5,3	0,57	0,83	121	22,8	8,6	2	2	114	228	132,6	896 093
		COM3 100WNaHP	6,1	0,77	0,77	108	17,7	12	2	2	114	228	95,0	642 200
		COM4 2*40WFL	5,8	0,73	0,8	126	21,7	9	2	4	45	180	100,0	676 000
	Latéral	COM1 70WNaHP	5,5	0,85	0,79	66	12,0	8,4	2	2	85	170	101,2	684 048
		COM5 2*55WFL	5,1	0,79	0,79	63	12,4	7,4	2	4	67	268	181,1	1 224 108
		PHIL1 100WNaHP	5,33	0,54	0,87	163	30,6	8,25	2	2	114	228	138,2	934 109
REINFORCE	Sur voies	PHIL5 100WNaHP	5,35	0,77	0,9	172	32,1	7,7	2	2	114	228	148,1	1 000 851
		PHIL2 2*55WFL	5,33	0,8	0,95	173	32,5	8,3	2	4	67	268	212,7	1 437 841
		PHIL4 150WNaHP	5,34	0,84	0,81	176	33,0	10,35	2	2	169	336	162,3	1 097 275
	Latéral	PHIL3 2*55WFL	5,62	0,75	0,75	189	33,6	10,4	2	4	67	268	128,8	871 000
		COM 400WNaHP	81	0,87	0,93	1019,3	12,5	3,8	2	2	438	876	45,8	80 102
		PHIL 400WNaHP	77	0,86	0,97	1477,3	19,1	3,1	2	2	438	876	56,5	98 871
SYMETRIQUE	Sur voies*	133	0,85	0,99	2974	22,4	1,75	2	2	438	876	100,1	175 200	
	Latéral*	137	0,66	0,98	3036	22,2	2	2	2	438	876	87,6	153 300	
* Com 400WNaHP														

Calculs pour revêtements de type Gerchrome														
ECLAIRAGE	SOLUTION constructeur		DONNÉES CONSTRUCTEUR par module								Calculs sur longueur totale			
			Lmoyen cd/m²	Ug	Uj	E moy en lux	R=E/L	Pas du module	Nbre d' appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance en KW	Conso./an en KWH
	Sur voies	COM2 70UNaHP	6	0,76	0,78	77,0	12,83	8,4	2	2	85	170	101,19	684 048
		COM3 70UNaHP	5,4	0,78	0,78	53,0	9,81	12	2	2	85	170	70,83	478 833
		COM4 2*40WPLL	5,5	0,72	0,8	66,0	12,00	8,6	2	4	45	180	104,65	707 442
	Latéral	COM1 70UNaHP	5,3	0,86	0,94	64,0	12,08	9,6	2	2	85	170	88,54	588 542
		COM5 2*55WPLL	5,2	0,76	0,79	69,0	12,11	9,2	2	4	67	268	145,65	984 609
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50UNaHP	5,33	0,5	0,8	93,3	8,12	12,8	2	2	65	130	50,78	343 281
		PHIL5 50UNaHP	5,57	0,65	0,76	50,0	8,98	11	2	2	65	130	59,09	399 455
		PHIL6 55WPLL	6,08	0,69	0,75	55,0	9,05	9,8	2	2	67	134	68,37	462 163
	Latéral	PHIL4 70UNaHP	6,45	0,71	0,75	59,9	9,29	12,2	2	2	85	170	69,47	470 904
		PHIL3 55WPLL	5,33	0,74	0,79	50,2	9,42	9,8	2	2	67	134	68,37	462 163
RENFORCÉ	CONTRE FLUX	COM 400UNaHP	92	0,73	0,86	653,5	7,12	6,6	2	2	438	876	26,36	46 138
		PHIL 400UNaHP	91	0,82	0,83	561,0	6,16	8	2	2	438	876	20,71	36 251
	SYMETRIQUE	Sur voies*	132	0,85	0,98	1689,0	12,80	3,2	2	2	438	876	54,75	95 813
		Latéral*	135	0,67	0,96	1631,0	12,08	3,8	2	2	438	876	46,11	80 694

* Com 400UNaHP

Calculs pour revêtements de type Colclair														
ECLAIRAGE	SOLUTION CONSTRUCTEUR		DONNÉES CONSTRUCTEUR par module								Calculs sur longueur totale			
			Lmoyen cd/m²	Ug	Uj	E moy en lux	R=E/L	Pas du module	Nbre d' appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance en KW	Conso./an en KWH
	Sur voies	COM2 70UNaHP	6	0,76	0,77	77,0	12,83	8,5	2	2	85	170	100,0	676 000
		COM3 70UNaHP	5,4	0,77	0,76	53,0	9,81	12	2	2	85	170	70,6	478 833
		COM4 2*40WPLL	5,5	0,72	0,8	66,0	12,00	8,6	2	4	45	180	104,7	707 442
	Latéral	COM1 70UNaHP	5,2	0,84	0,92	63,0	12,12	9,8	2	2	85	170	86,7	586 327
		COM5 2*55WPLL	5,8	0,74	0,8	71,0	12,24	9	2	4	67	268	149,9	1 006 489
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50UNaHP	7,89	0,53	0,75	49,7	6,17	11,4	2	2	65	130	57,0	385 439
		PHIL5 50UNaHP	5,71	0,64	0,76	50,0	8,76	11	2	2	65	130	59,1	399 455
		PHIL2 55WPLL	7,33	0,7	0,75	53,6	7,31	10,2	2	2	67	134	65,7	444 039
	Latéral	PHIL4 70UNaHP	6,62	0,7	0,75	60,9	9,20	12	2	2	85	170	70,6	476 033
		PHIL3 55WPLL	5,33	0,73	0,78	49,7	9,32	9,9	2	2	67	134	67,7	457 495
RENFORCÉ	CONTRE FLUX	COM 400UNaHP	92	0,71	0,86	653,5	7,12	6,6	2	2	438	876	26,4	46 138
		PHIL 400UNaHP	90	0,79	0,83	545,3	6,09	9	2	2	438	876	20,1	35 249
	SYMETRIQUE	Sur voies*	132	0,84	0,98	1689	12,80	3,2	2	2	438	876	54,8	95 813
		Latéral*	135	0,69	0,97	1631	12,08	3,8	2	2	438	876	46,1	80 694

* Com 400UNaHP

Calculs pour revêtements de type Gerchrome à 73 mois														
ECLAIRAGE	SOLUTION CONSTRUCTEUR	DONNÉES CONSTRUCTEUR par module								Calculs sur longueur totale				
		Lmoyen cd/m²*	Ug	UI	Emoy en lux	R=EIL	Pas du module	Nbre d' appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance en KWH	Conso. /an en KWH	
	Sur voies	COM2 NaHP									0	21	143 650	
		COM3 NaHP									0,00	0,00	Non Calculé	
		COM4 PLL									0	0,00	Non Calculé	
	Latéral	COM1 NaHP									0	19	125 694	
		COM5 PLL									0	0,00	Non Calculé	
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50WNaHP	5,34	0,57	0,89	70,2	13,14	7,9	2	2	65	130	16,46	111 241
		PHIL5 50WNaHP	3,61	0,65	0,75	52,0	14,40	10,7	2	2	65	130	12,15	82 131
		PHIL2 55WPLL	5,33	0,79	0,92	77,7	14,57	7	2	2	67	134	19,14	129 406
	Latéral	PHIL4 70WNaHP	5,35	0,86	0,89	77,1	14,40	9,5	2	2	85	170	17,89	120 958
		PHIL3 55WPLL	5,34	0,87	0,96	78,0	14,60	6,3	2	2	67	134	21,27	143 784
REINFORCÉ	COUVERTE FLUX	COM 400WNaHP	0			0,0		0,0			0	0	0,00	Non Calculé
		PHIL 400WNaHP	31	0,79	0,83	561,0	6,03	8	2	2	436	876	21,32	37 317
	SYMÉTRIQUE	Sur voies*											57	100 603
Latéral*												40	84 710	

Calculs pour revêtements de type Colclair à 73 mois														
ECLAIRAGE	SOLUTION CONSTRUCTEUR	DONNÉES CONSTRUCTEUR par module								Calculs sur longueur totale				
		Lmoyen cd/m²*	Ug	UI	Emoy en lux	R=EIL	Pas du module	Nbre d' appareils	N total de sources	Source + Ballast(W)	Puissance par pas(W)	Puissance en KWH	Conso. /an en KWH	
	Sur voies	COM2 NaHP									0	105,00	709 800	
		COM3 NaHP									0,00	0,00	Non Calculé	
		COM4 PLL									0	0,00	Non Calculé	
	Latéral	COM1 NaHP									0	91,07	615 643	
		COM5 PLL									0	0,00	Non Calculé	
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50WNaHP	5,34	0,57	0,89	70,2	13,14	7,9	2	2	65	130	82,28	556 203
		PHIL5 50WNaHP	3,61	0,65	0,75	52,0	14,40	10,7	2	2	65	130	60,75	410 654
		PHIL2 55WPLL	5,33	0,79	0,92	77,7	14,57	7	2	2	67	134	95,71	647 029
	Latéral	PHIL4 70WNaHP	5,35	0,86	0,89	77,1	14,40	9,5	2	2	85	170	89,47	604 842
		PHIL3 55WPLL	5,34	0,87	0,96	78,0	14,60	6,3	2	2	67	134	106,35	716 921
REINFORCÉ	COUVERTE FLUX	COM 400WNaHP	0			0,0		0,0			0	0	0,00	Non Calculé
		PHIL 400WNaHP	90	0,79	0,83	545,3	6,03	8	2	2	438	876	21,32	37 317
	SYMÉTRIQUE	Sur voies*											57,49	100 603
Latéral*												40,41	84 710	

* Com 400WNaHP

DETAILS DES COÛTS GLOBAUX SUR 20 ANS POUR CHAQUE TYPE DE CHAUSSEE

RAPPELS :

DONNEES DE CALCUL	
Coût chaussée std/m²	4,60 €
Coût Ch. grenailée/hydro	11,45 €
Coût Chaussée claire/m²	14,93 €
Mise en œuvre pour le tunne	3 800 €
Coût KWH	0,07 €
Coût LAVAGE	46,00 €
Largeur de chaussée (m)	9
Heures équiv Psoleil	1750
H. équiv Régime de base	6760
Vie des sources (H)	12000
Facteur ACTUAL 20ans	13
F_Ch-Claire_enCF	0,685
F_Ch-eclaircie_enCF	0,594
F_Chstd_enCF	0,475

Coût lampe 50-70w NaHP	9,20 €
Coût lampe 100w NaHP	12,20 €
Coût lampe 150W NaHP	13,70 €
Coût lampe 400w NaHP	16,50 €
Coût lampe 36w PLL	6,10 €
Coût lampe 40w PLL	7,20 €
Coût lampe 55w PLL	7,20 €
Appareil 70W NaHP	400 €
Appareil 100W NaHP	430 €
Appareil 150-400W NaHP	610 €
Appareil PLL 1 lampe	400 €
Appareil PLL 2 lampes	505 €
remplct lampe 2 pers	15 €
Surcoût Piedroit	9,20 €

Coûts agrégés pour chaussées R1											
ECLAIRAGE	SOLUTION	CONSTRUCTEUR	Coût des lampes	Coût des appareils	Coûts annuels en €				INVESTISSEMENT (k€)		TOTAL ACTUALISÉ sur 20 ans
					Energie	Sources	Entretien	Total	Éclairage	Chaussée	
	Sur voies	COM2 70W NaHP	9,20 €	400 €	52 168 €	17 938 €	60 526 €	130 632 €	526,32	190,44	2415
		COM3 70W NaHP	9,20 €	400 €	33 040 €	11 361 €	38 333 €	82 733 €	333,33	190,44	1599
		COM4 2740U PLL	7,20 €	505 €	52 475 €	31 265 €	57 500 €	141 240 €	631,25	190,44	2658
		COM1 70W NaHP	9,20 €	409 €	42 178 €	14 503 €	48 936 €	105 617 €	435,32	190,44	1999
SECTION COURANTE	Sur voies	COM5 2*55W PLL	7,20 €	514 €	74 408 €	29 776 €	54 762 €	158 946 €	612,14	190,44	2869
		PHIL1 70W NaHP	9,20 €	400 €	30 498 €	10 487 €	35 385 €	76 369 €	307,69	190,44	1491
	Latéral	PHIL5 70WNaHP	9,20 €	400 €	40 457 €	13 911 €	46 939 €	101 306 €	408,16	190,44	1916
		PHIL2 1*55W PLL	7,20 €	400 €	46 644 €	15 251 €	55 098 €	117 093 €	487,80	190,44	2212
		PHIL4 70W NaHP	9,20 €	400 €	35 399 €	12 172 €	41 071 €	88 643 €	355,36	190,44	1708
		PHIL3 2*36W PLL	6,10 €	514 €	45 171 €	25 024 €	48 421 €	118 616 €	511,26	190,44	2274
RENFORCE	COUVRE FLUX	COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	3 888 €	675 €	6 763 €	11 327 €	89,69	16,56	253
		PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	3 645 €	633 €	6 341 €	10 619 €	84,06	16,56	239
	SYNÉTIQUE	Sur voies*	16,50 €	610 €	7 052 €	1 225 €	12 267 €	20 543 €	162,67	16,56	446
		Latéral*	16,50 €	610 €	5 716 €	993 €	9 946 €	16 657 €	131,05	16,56	365

Coûts agrégés pour chaussées R2											
ECLAIRAGE	SOLUTIONS		Coût des lampes	Coût des appareils	Coûts annuels en €			INVESTISSEMENT (k€)		TOTAL ACTUALISÉ sur 20 ans	
					Energie	Sources	Lavage	Total	Éclairage		Chaussée
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 100W NaHP	12,20 €	430 €	64 847 €	18 686 €	56 098 €	139 630 €	524,39	190,44	2530
		COM3 100W NaHP	12,20 €	430 €	132 935 €	36 307 €	115 000 €	266 242 €	1075,00	190,44	4967
		COM4 2*350VPLL	6,10 €	505 €	41 344 €	27 014 €	52 273 €	120 631 €	573,88	190,44	2333
	Latéral	COM1 100W NaHP	12,20 €	439 €	56 568 €	16 301 €	48 936 €	121 005 €	467,23	190,44	2241
		COM5 2*40WPLL	7,20 €	514 €	46 644 €	27 791 €	51 111 €	125 546 €	571,33	190,44	2394
		PHIL1 100WNaHP	12,20 €	430 €	47 905 €	13 804 €	41 441 €	103 150 €	387,39	190,44	1919
REINFORCÉ	SYMETRIQUE	PHIL2 2*550VPLL	7,20 €	505 €	64 436 €	25 786 €	47 423 €	137 644 €	520,62	190,44	2500
		PHIL4 100WNaHP	12,20 €	439 €	45 255 €	13 041 €	39 149 €	97 444 €	373,79	190,44	1631
	COMPRE FLIX	PHIL3 2*550VPLL	7,20 €	514 €	63 779 €	25 522 €	46 939 €	136 240 €	524,69	190,44	2486
		COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	4 556 €	792 €	7 926 €	13 274 €	105,10	16,56	294
SYMETRIQUE	PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	4 416 €	766 €	7 666 €	12 671 €	101,92	16,56	266	
	Sur voies*	16,50 €	610 €	11 134 €	1 934 €	19 368 €	32 437 €	256,84	16,56	695	
	Latéral*	16,50 €	610 €	9 361 €	1 626 €	16 283 €	27 270 €	215,93	16,56	587	

* Com 400WNaHP

Coûts agrégés pour chaussées R3											
ECLAIRAGE	SOLUTION	Constructeurs	Coût unitaire	Coût des appareils	Coûts annuels en €			INVESTISSEMENT (k€)		TOTAL ACTUALISÉ	
					Energie	Sources	Lavage	Total	Éclairage		Chaussée
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 100WNaHP	12,20 €	430 €	69 966 €	20 161 €	60 526 €	150 654 €	526,32	190,44	2675
		COM3 100WNaHP	12,20 €	430 €	44 312 €	12 769 €	38 333 €	95 414 €	333,33	190,44	1764
		COM4 2*40WPLL	7,20 €	505 €	44 659 €	26 809 €	48 936 €	120 204 €	425,53	190,44	2179
	Latéral	COM1 100WNaHP	12,20 €	439 €	66 468 €	19 133 €	37 300 €	143 121 €	511,30	190,44	2563
		COM5 2*550VPLL	7,20 €	514 €	62 503 €	25 012 €	46 000 €	133 515 €	409,20	190,44	2035
		PHIL1 100WNaHP	12,20 €	430 €	42 202 €	12 161 €	36 506 €	90 070 €	317,46	190,44	1609
REINFORCÉ	SYMETRIQUE	PHIL2 2*550VPLL	7,20 €	505 €	67 717 €	27 099 €	49 837 €	144 653 €	433,37	190,44	2504
		PHIL4 150WNaHP	13,70 €	619 €	59 365 €	12 248 €	34 848 €	106 462 €	310,00	190,44	1884
	COMPRE FLIX	PHIL3 2*550VPLL	7,20 €	514 €	75 761 €	30 318 €	55 758 €	161 836 €	496,00	190,44	2790
		COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	4 288 €	745 €	7 450 €	12 493 €	98,92	16,56	278
SYMETRIQUE	PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	4 166 €	724 €	7 246 €	12 136 €	96,09	16,56	270	
	Sur voies*	16,50 €	610 €	15 111 €	2 625 €	26 286 €	44 022 €	348,57	16,56	937	
	Latéral*	16,50 €	610 €	11 753 €	2 042 €	20 444 €	34 239 €	271,11	16,56	733	

* Com 400WNaHP

Coûts agrégés pour chaussées hydrodécapées											TOTAL ACTUALISÉ sur 20ans
ECLAIRAGE	SOLUTION	CONSTRUCTEURS	Coût des lampes	Coût des appareils	Coûts annuels en €				Investissements (k€)		
					Energie	Sources	Lavage	Total	Eclairage	Chaussée	
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 70WNaHP	9,20 €	400 €	61 830 €	15 852 €	53 480 €	131 171 €	465,12	474,03	2644
		COM3 70WNaHP	9,20 €	400 €	44 312 €	11 361 €	38 333 €	94 006 €	333,33	474,03	2029
	COM4 2*40WFL	7,20 €	505 €	46 644 €	27 791 €	51 111 €	125 546 €	561,11	474,03	2667	
	Latéral	COM1 70WNaHP	9,20 €	409 €	47 199 €	16 229 €	54 762 €	110 191 €	407,14	474,03	2490
		COM5 2*55WPLL	7,20 €	514 €	04 463 €	33 000 €	62 162 €	100 426 €	694,06	474,03	3514
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 100WNaHP	9,20 €	400 €	64 454 €	16 524 €	55 758 €	136 736 €	484,85	474,03	2736
		PHIL5 100WNaHP	9,20 €	400 €	69 057 €	17 703 €	59 740 €	146 502 €	519,48	474,03	2898
	PHIL2 2*55WPLL	7,20 €	505 €	99 211 €	39 702 €	73 016 €	211 929 €	801,59	474,03	4031	
	Latéral	PHIL4 150WNaHP	13,70 €	619 €	75 712 €	15 621 €	44 444 €	135 777 €	598,26	474,03	2837
		PHIL3 2*55WPLL	7,20 €	514 €	60 099 €	24 050 €	44 231 €	128 380 €	494,42	474,03	2637
SECTION RENFORCÉ	COFFRE FLUX	COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	5 827 €	3 709 €	9 614 €	18 850 €	127,49	41,22	414
		PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	6 822 €	4 578 €	11 867 €	23 267 €	157,97	41,22	501
	SYNÉTRIQUE	Sur voies*	16,50 €	610 €	12 009 €	6 112 €	21 029 €	41 229 €	278,86	41,22	656
		Latéral*	16,50 €	610 €	10 578 €	7 098 €	18 400 €	36 076 €	244,00	41,22	754

* Com 400WNaHP

Coûts agrégés pour chaussées grenaillé											TOTAL ACTUALISÉ sur 20ans
ECLAIRAGE	SOLUTION	CONSTRUCTEURS	Coût des lampes	Coût des appareils	Coûts annuels en €				Investissements (k€)		
					Energie	Sources	Lavage	Total	Eclairage	Chaussée	
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 100WNaHP	12,20 €	430 €	61 830 €	21 090 €	65 714 €	149 434 €	614,29	474,03	3031
		COM3 100WNaHP	12,20 €	430 €	44 312 €	12 769 €	38 333 €	95 414 €	358,33	474,03	2073
	COM4 2*40WFL	7,20 €	505 €	46 644 €	33 349 €	61 333 €	141 327 €	673,33	474,03	2885	
	Latéral	COM1 100WNaHP	12,20 €	439 €	61 830 €	17 017 €	53 400 €	133 136 €	510,70	474,03	2715
		COM5 2*55WPLL	7,20 €	514 €	65 107 €	26 054 €	47 917 €	139 078 €	535,63	474,03	2818
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50WNaHP	9,20 €	400 €	31 096 €	13 982 €	47 178 €	92 258 €	410,26	474,03	2064
		PHIL5 50WNaHP	9,20 €	400 €	33 687 €	15 147 €	51 111 €	99 946 €	444,44	474,03	2218
	PHIL2 55WPLL	7,20 €	400 €	38 112 €	15 251 €	56 098 €	109 480 €	487,80	474,03	2385	
	Latéral	PHIL4 70WNaHP	9,20 €	409 €	37 759 €	12 983 €	43 810 €	94 552 €	389,71	474,03	2093
		PHIL3 55WPLL	7,20 €	409 €	37 427 €	14 977 €	55 090 €	107 494 €	489,82	474,03	2361
SECTION RENFORCÉ	COFFRE FLUX	COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	5 435 €	3 647 €	9 454 €	18 536 €	125,97	41,22	408
		PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	4 941 €	3 315 €	8 595 €	16 851 €	113,97	41,22	374
	SYNÉTRIQUE	Sur voies*	16,50 €	610 €	6 611 €	4 436 €	11 500 €	22 547 €	152,50	41,22	487
		Latéral*	16,50 €	610 €	5 567 €	3 736 €	9 604 €	18 907 €	128,42	41,22	416

* Com 400WNaHP

Coûts agrégés pour chaussées Colclair											
ECLAIRAGE	SOLUTION	constructeurs	Coût des lampes	Coût des appareils	Coûts annuels en €			INVESTISSEMENT (k€)		TOTAL ACTUALISÉ 20 ans	
					Energie	Sources	Lavage	Total	Éclairage		Chaussée
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 70WNaHP	9,20 €	400 €	46 644 €	16 030 €	54 110 €	116 000 €	470,59	790,40	2779
		COM3 70WNaHP	9,20 €	400 €	33 040 €	11 361 €	39 333 €	92 733 €	333,33	790,40	2199
		COM4 2*40WPLL	7,20 €	505 €	48 813 €	29 084 €	53 488 €	131 366 €	587,21	790,40	3086
	Latéral	COM1 70WNaHP	9,20 €	409 €	40 457 €	13 911 €	46 939 €	101 306 €	417,55	790,40	2525
		COM5 2*55WPLL	7,20 €	514 €	69 440 €	27 791 €	51 111 €	140 350 €	571,33	790,40	3290
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50WNaHP	9,20 €	400 €	26 595 €	11 958 €	40 351 €	78 905 €	350,86	790,40	2167
		PHIL2 55WPLL	7,20 €	400 €	30 439 €	12 261 €	45 098 €	87 998 €	392,16	790,40	2327
		PHIL3 55WPLL	7,20 €	409 €	31 567 €	12 632 €	46 465 €	90 664 €	413,33	790,40	2382
	Latéral	PHIL4 70WNaHP	9,20 €	409 €	33 040 €	11 361 €	38 333 €	82 733 €	341,00	790,40	2207
		PHIL5 55WPLL	7,20 €	409 €	31 567 €	12 632 €	46 465 €	90 664 €	413,33	790,40	2382
RENFORCÉ	CONTRE FLUX	COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	3 183 €	2 136 €	5 538 €	10 857 €	73,43	72,20	287
		PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	2 432 €	1 632 €	4 230 €	8 294 €	56,10	72,20	236
	SYMETRIQUE	Sur voies*	16,50 €	610 €	6 611 €	4 436 €	11 500 €	22 547 €	152,50	72,20	518
		Latéral*	16,50 €	610 €	5 567 €	3 736 €	9 604 €	10 907 €	120,42	72,20	447

* Core 400WNaHP

Coûts agrégés pour chaussées Gerchrome											
ECLAIRAGE	SOLUTION	CONSTRUCTEURS	Coût des lampes	Coût des appareils	Coûts annuels en €			INVESTISSEMENT (k€)		TOTAL ACTUALISÉ 20 ans	
					Energie	Sources	Lavage	Total	Éclairage		Chaussée
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 70WNaHP	9,20 €	400 €	47 199 €	16 229 €	54 762 €	110 191 €	476,19	790,40	2603
		COM3 70WNaHP	9,20 €	400 €	33 040 €	11 361 €	38 333 €	92 733 €	333,33	790,40	2199
		COM4 2*40WPLL	7,20 €	400 €	48 813 €	29 084 €	53 488 €	131 366 €	465,12	790,40	2964
	Latéral	COM1 70WNaHP	9,20 €	409 €	41 299 €	14 201 €	47 917 €	103 417 €	426,29	790,40	2561
		COM5 2*55WPLL	7,20 €	409 €	67 938 €	27 187 €	50 000 €	145 125 €	444,78	790,40	3122
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50WNaHP	9,20 €	400 €	23 686 €	10 651 €	35 938 €	70 274 €	312,50	790,40	2016
		PHIL5 50WNaHP	9,20 €	400 €	27 562 €	12 393 €	41 818 €	81 774 €	363,64	790,40	2217
		PHIL2 55WPLL	7,20 €	400 €	31 689 €	12 761 €	46 939 €	91 589 €	408,16	790,40	2389
	Latéral	PHIL4 70WNaHP	9,20 €	409 €	32 498 €	11 174 €	37 705 €	81 377 €	335,41	790,40	2184
		PHIL3 55WPLL	7,20 €	409 €	31 609 €	12 761 €	46 939 €	91 589 €	417,55	790,40	2399
RENFORCÉ	CONTRE FLUX	COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	3 183 €	2 136 €	5 538 €	10 857 €	73,43	72,20	287
		PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	2 501 €	1 670 €	4 351 €	8 531 €	57,70	72,20	241
	SYMETRIQUE	Sur voies*	16,50 €	610 €	6 611 €	4 436 €	11 500 €	22 547 €	152,50	72,20	518
		Latéral*	16,50 €	610 €	5 567 €	3 736 €	9 604 €	10 907 €	120,42	72,20	447

* Com 400WNaHP

Coûts agrégés pour chaussées COLCLAIR à 73 mois											
= Estimations d'après COLCLAIR 12 mois											
ECLAIRAGE	SOLUTION	CONSTRUCTEURS	Coût des lampes	Coût des appareils	Coûts annuels en €			INVESTISSEMENT (k€)		TOTAL ACTUALISÉ 20 ans	
					Energie	Sources	Lavage	Total	Éclairage		Chaussée
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 70WNaHP	9,20 €	400 €	48 976 €	0 €	0 €	122 640 €	494	790,40	2 879 €
		COM3 70WNaHP	9,20 €	400 €	Non Calculé	0 €	0 €	0 €	0,00	790,40	Non calculé
	COM4 2*40WPLL	7,20 €	505 €	Non Calculé	0 €	0 €	0 €	0,00	790,40	Non calculé	
	Latéral	COM1 70WNaHP	9,20 €	409 €	42 479 €	0 €	0 €	106 372 €	438	790,40	2 612 €
		COM5 2*55WPLL	7,20 €	514 €	Non Calculé	0 €	0 €	0 €	0,00	790,40	Non calculé
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50WNaHP	9,20 €	400 €	38 378 €	17 257 €	58 228 €	113 862 €	506,33	790,40	2777
		PHIL5 50WNaHP	9,20 €	400 €	28 335 €	12 741 €	42 991 €	84 067 €	373,83	790,40	2257
	PHIL2 55WPLL	7,20 €	400 €	44 645 €	17 866 €	65 714 €	128 225 €	571,43	790,40	3029	
	Latéral	PHIL4 70WNaHP	9,20 €	409 €	41 734 €	14 350 €	48 421 €	104 505 €	430,74	790,40	2580
		PHIL3 55WPLL	7,20 €	409 €	49 606 €	19 851 €	73 016 €	142 472 €	649,52	790,40	3292
RENFORCÉ	CONTRE FLUX	COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	Non Calculé	0 €	0 €	11 400 €	77	72,20	298 €
		PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	2 575 €	1 728 €	4 479 €	8 782 €	59,40	72,20	246
	SYMETRIQUE	Sur voies*	16,50 €	610 €	6 942 €	4 436 €	11 500 €	22 878 €	152,50	72,20	522 €
		Latéral*	16,50 €	610 €	5 816 €	3 736 €	9 684 €	19 266 €	128,42	72,20	451 €
* Com 400WNaHP											

Coûts agrégés pour chaussées Gerchrome 73 mois											
= Estimation d'après GERCHROME 12 mois											
ECLAIRAGE	SOLUTION	CONSTRUCTEURS	Coût des lampes	Coût des appareils	Coûts annuels en €			INVESTISSEMENT (k€)		TOTAL ACTUALISÉ 20 ans	
					Energie	Sources	Lavage	Total	Éclairage		Chaussée
SECTION COURANTE	Sur voies	COM2 70WNaHP	9,20 €	400 €	49 559 €	0 €	0 €	124 100 €	500	790,40	2 904 €
		COM3 70WNaHP	9,20 €	400 €	Non Calculé	0 €	0 €	0 €	0,00	790,40	Non calculé
	COM4 2*40WPLL	7,20 €	505 €	Non Calculé	0 €	0 €	0 €	0,00	790,40	Non calculé	
	Latéral	COM1 70WNaHP	9,20 €	409 €	43 364 €	0 €	0 €	108 588 €	448	790,40	2 650 €
		COM5 2*55WPLL	7,20 €	514 €	Non Calculé	0 €	0 €	0 €	0,00	790,40	Non calculé
SECTION COURANTE	Sur voies	PHIL1 50WNaHP	9,20 €	400 €	38 378 €	17 257 €	58 228 €	113 862 €	506,33	790,40	2777
		PHIL5 50WNaHP	9,20 €	400 €	28 335 €	12 741 €	42 991 €	84 067 €	373,83	790,40	2257
	PHIL2 55WPLL	7,20 €	400 €	44 645 €	17 866 €	65 714 €	128 225 €	571,43	790,40	3029	
	Latéral	PHIL4 70WNaHP	9,20 €	409 €	41 734 €	14 350 €	48 421 €	104 505 €	430,74	790,40	2580
		PHIL3 55WPLL	7,20 €	409 €	49 606 €	19 851 €	73 016 €	142 472 €	649,52	790,40	3292
RENFORCÉ	CONTRE FLUX	COM 400WNaHP	16,50 €	610 €	Non Calculé	0 €	0 €	11 400 €	77	72,20	298 €
		PHIL 400WNaHP	16,50 €	610 €	2 575 €	1 703 €	4 414 €	8 692 €	58,54	72,20	244
	SYMETRIQUE	Sur voies*	16,50 €	610 €	6 942 €	4 436 €	11 500 €	22 878 €	152,50	72,20	522 €
		Latéral*	16,50 €	610 €	5 846 €	3 736 €	9 684 €	19 266 €	128,42	72,20	451 €
* Com 400WNaHP											

3.4.2 –Tableaux analogues aux précédents en distinguant éclairage symétrique et éclairage à contre-flux

(Les solutions des constructeurs qui ne pouvaient être retenues ont été ici éliminées (voir annexe précédente §3.4.1))

En section COURANTE						
		Totaux en k€ sur 20 ans pour un tunnel de 1000 mètres au total				
SOLUTION constructeurs		R2	HYDROBEC.	GRENAILLÉ	COL. 73 m	GER. 73 m
Symétrique sur voies	COM2	493	496	573	524	529
	PHIL5	409	547	411	400	400
Symétrique latéral	COM1	435	467	510	471	478
	PHIL3 PLL	484	495	439	607	607

Zone d'éclairage RENFORCÉ (400m)						
		Totaux en k€ sur 20 ans pour un tunnel de 1000 mètres au total				
SOLUTION constructeurs		R2	HYDROBEC.	GRENAILLÉ	COL. 73 m	GER. 73 m
Contre-flux sur voies	COM 400WNaHP	294	414	408	298	298
	PHIL 400WNaHP	286	501	374	246	244
Symétrique sur voies	COM 400WNaHP	695	856	487	522	522
Symétrique latéral	COM 400WNaHP	587	754	416	461	451

Totaux sur la longueur totale du tunnel (les meilleures solutions sont toutes à contre-flux)

Meilleure solution (sect. courante + renforcement) de chaque fournisseur	Dans les faits, seules les solutions à contre-flux sont ici prises en compte					
	PHILIPS	R2	HYDROBEC.	GRENAILLÉ	COL. 73m	GER. 73m
COMATELEC	729	694	896	918	769	776
Moyenne Philips + Comatelec des meilleures solutions		712	938	851	707	710
- Estimations d'après résultats obtenus sur Colclair & Gerchione 12 mois						

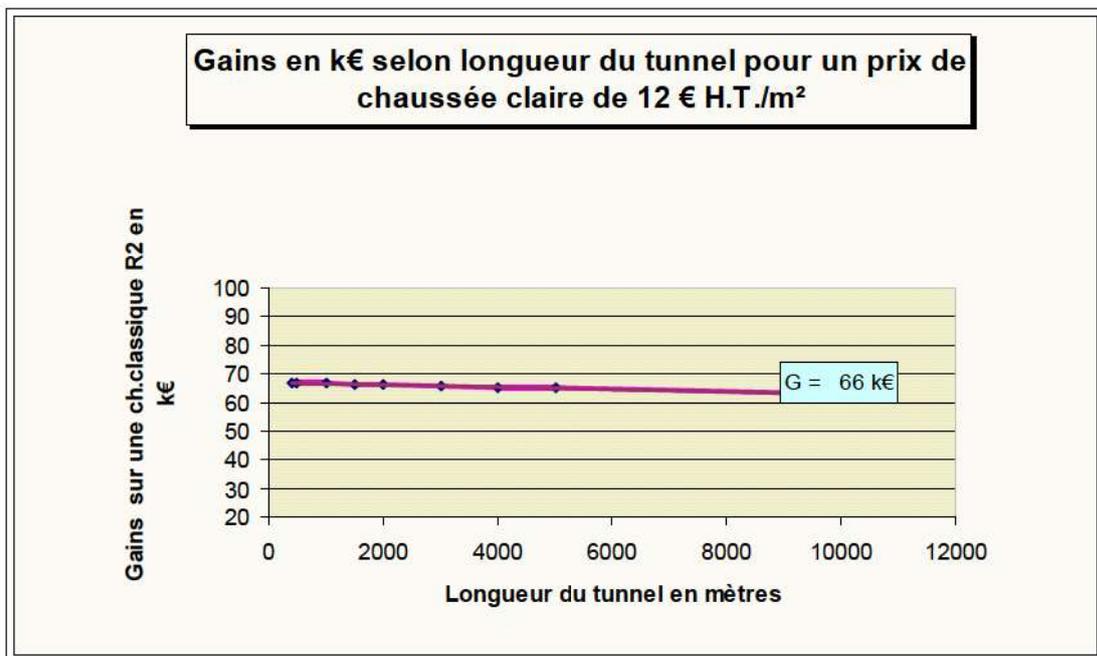
Totaux sur la longueur totale du tunnel avec un éclairage de renforcement exclusivement symétrique :

Meilleure solution en symétrique uniquement						
	Coût R2	HYDROBEC.	GRENAILLÉ	COL. 73m	GER. 73m	
COMATELEC	1022	1221	927	922	929	

Influence de la longueur du tunnel avec une chaussée claire à 19€ H.T./m²

Etude économique globale des chaussées claires sur la base de 19 € H.T./m ²								
Renforcement de 400 mètres ; Totaux investissement + exploitation en k€ H.T. sur 20 ans (Éclairage sur voies)								
Longueur totale du tunnel (uniquement)	Types de chaussée					Gain dû aux Chclaires		
	R2	Hydrod.	Grenailé	Colclair	Gerchrome	k€	%	
400	449	635	550	407	407	41,6	9,3%	
500	493	690	600	457	458	35,2	7,2%	
1000	712	964	851	707	710	3,6	0,5%	
1500	931	1238	1102	957	961	-28,1	-3,0%	
2000	1150	1512	1353	1207	1213	-59,8	-5,2%	
3000	1588	2060	1854	1706	1717	-123,2	-7,8%	
4000	2027	2607	2356	2206	2220	-186,6	-9,2%	

Influence de la longueur du tunnel avec une chaussée claire à 12,10€ H.T./m²



INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL, éclairage à contre-flux et chaussée claire à 19 €/m²

Etude économique globale des chaussées claires sur la base de 19 € H.T./m ² Et des chaussées éclaircies à 11,45 €/m ²							
Renforcement de 400 mètres en CONTRE-FLUX : Totaux investissement+ exploitation en k€ H.T. sur 20 ans (Éclairage sur voies)							
Longueur totale du tunnel (enft uniqt)	Types de chaussée					Gains par rapport aux ch. R2 (- si pertes)	
	R2	Hydrod.	Grenaille	Colclair	Gerchrome	ch. grenillées k€	chaussées claires %
400	449	635	550	407	407	-102	-22,6%
500	493	690	600	437	438	-108	-21,9%
1000	712	964	851	707	710	-139	-19,6%
1500	931	1238	1102	957	961	-171	-18,4%
2000	1150	1512	1353	1207	1213	-203	-17,6%
3000	1588	2060	1854	1706	1717	-266	-16,7%
4000	2027	2607	2356	2206	2220	-328	-16,2%

INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL, éclairage symétrique et chaussée claire à 19 €/m²

Etude économique globale des chaussées claires sur la base de 19 € H.T./m ² Et des chaussées éclaircies à 11,45 €/m ²							
Renforcement de 400 mètres en éclairage symétrique: Totaux investissement+ exploitation en k€ H.T. sur 20 ans (Éclairage sur voies)							
Longueur totale du tunnel (enft uniqt)	Types de chaussée					Gains par rapport aux ch. R2 (- si pertes)	
	R2	Hydrod.	Grenaille	Colclair	Gerchrome	ch. grenillées k€	chaussées claires %
400	746	922	576	586	588	170	22,8%
500	790	974	626	636	638	164	20,7%
1000	1009	1233	877	886	890	132	13,1%
1500	1226	1496	1128	1136	1142	100	8,2%
2000	1447	1756	1378	1386	1394	69	4,7%
3000	1883	2278	1880	1886	1897	5	0,3%
4000	2324	2800	2382	2386	2401	-58	-2,5%

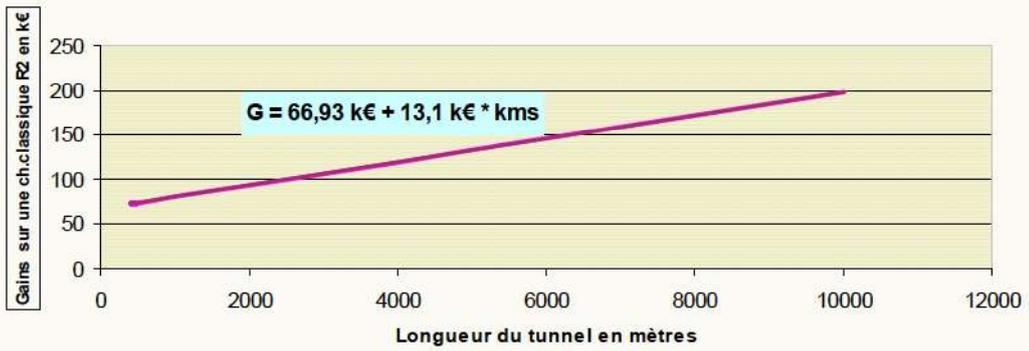
INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL éclairage à contre-flux et chaussée claire à 10,50 €/m²

Etude économique globale des chaussées claires à 10,50€ H.T./m ² Et des chaussées éclaircies à 8,40 €/m ²								
Renforcement de 400 mètres en CONTRE-FLUX : Totaux investissement + exploitation en k€ H.T. sur 20 ans (Éclairage sur voies)								
Longueur totale du tunnel	Types de chaussée				Gains par rapport aux ch. R2 (- si pertes)			
	R2	Éclaircie	Colclair	Gerchrome	Ch. Éclaircies		chaussées claires	
					k€	%	k€	%
400 (enft unigt)	449	539	376	377	-91	-20,2%	72	16,1%
500	493	587	419	420	-94	-19,1%	73	14,9%
1000	712	824	630	633	-112	-15,7%	80	11,2%
1500	931	1061	842	847	-130	-14,0%	87	9,3%
2000	1150	1298	1054	1060	-148	-12,9%	93	8,1%
3000	1568	1772	1477	1487	-184	-11,6%	106	6,7%
4000	2027	2246	1900	1914	-219	-10,8%	119	5,9%
5000	2465	2720	2324	2341	-255	-10,4%	133	5,4%
10000	4657	5091	4440	4477	-424	-9,3%	198	4,3%

INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU TUNNEL éclairage symétrique et chaussée claire à 10,50 €/m²

Etude économique globale des chaussées claires sur la base de 10,50 € H.T./m ² Et des chaussées éclaircies à 8,40 €/m ²								
Renforcement de 400 mètres en éclairage symétrique : Totaux investissement + exploitation en k€ H.T. sur 20 ans (Éclairage sur voies)								
Longueur totale du tunnel	Types de chaussée				Gains par rapport aux ch. R2 (- si pertes)			
	R2	Éclaircie	Colclair	Gerchrome	Ch. Éclaircies		chaussées claires	
					k€	%	k€	%
400 (enft unigt)	745	565	556	557	180,9	24,3%	189,2	25,4%
500	790	612	598	600	177,3	22,5%	190,5	24,1%
1000	1009	849	810	814	159,4	15,8%	197,1	19,5%
1500	1228	1086	1021	1027	141,5	11,5%	203,7	16,6%
2000	1447	1323	1233	1241	123,6	8,5%	210,2	14,5%
3000	1865	1798	1656	1668	87,8	4,7%	223,3	11,8%
4000	2324	2272	2080	2095	52,0	2,2%	236,5	10,2%
5000	2769	2746	2503	2522	16,2	0,6%	249,6	9,0%
10000	4954	5116	4619	4657	-162,9	-3,3%	315,2	6,4%

Gains en k€ selon longueur du tunnel pour un prix de chaussée claire de 10,50€ H.T./m²



PARTS DES COÛTS D'INVESTISSEMENT DANS LES COÛTS GLOBAUX D'EXPLOITATION SUR 20 ANS

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en contre-flux					Coûts en €/m ²	
Part des coûts d'investissement (Ch + app.élect.) dans le coût global sur 20 ans (Invest.+ Exploitation)					Ch.Claire	19,00 €
					Chéclaircie	11,45 €
		Section courante	Zone renforcée CF	TUNNEL COMPLET		
		Coût global partiel*	Coût global partiel*		Coût global Total*	
Type de chaussée	%		%	%		
RZ	27%	422	41%	290	33%	712
Grenaillée	34%	460	41%	391	37%	851
Colclair 73m	43%	435	52%	272	46%	707
Gerchrome 73m	43%	439	52%	271	46%	710
* =Moyenne des solutions en k€						

Tunnel de 1000 mètres dont 400m renforcés en symétrique					Coûts en €/m ²	
Part des coûts d'investissement (Ch + app.élect.) dans le coût global sur 20 ans (Invest.+ Exploitation)					Ch.Claire	19,00 €
					Chéclaircie	11,45 €
		Section courante	Zone renforcée CF	TUNNEL COMPLET		
		Coût global partiel*	Coût global partiel*		Coût global Total*	
Type de chaussée	%		%	%		
RZ	27%	422	41%	641	36%	1063
Grenaillée	34%	460	41%	452	38%	912
Colclair 73m	43%	435	52%	467	48%	922
Gerchrome 73m	43%	439	52%	467	48%	926
* =Moyenne des solutions en k€						

Tunnel de 5000 mètres dont 400m renforcés en contre-flux					Coûts en € / m²	
Part des coûts d'investissement (Ch + app.élect.) dans le coût global sur 20 ans (Invest.+ Exploitation)					Ch.Claire	19,00 €
					Ch.éclaircie	11,45 €
		Section courante	Zone renforcée CF	TUNNEL COMPLET		
		Coût global	Coût global		Coût global	
Type de chaussée	%	partiel*	%	partiel*	%	Total*
R2	29%	2175	41%	290	31%	2465
Grenaillée	39%	2467	41%	391	39%	2858
Colclair 73m	49%	2434	52%	272	49%	2706
Gerchrome 73m	49%	2453	52%	271	49%	2724
* =Moyenne des solutions en k€						

Tunnel de 5000 mètres dont 400m renforcés en symétrique					Coûts en € / m²	
Part des coûts d'investissement (Ch + app.élect.) dans le coût global sur 20 ans (Invest.+ Exploitation)					Ch.Claire	19,00 €
					Ch.éclaircie	11,45 €
		Section courante	Zone renforcée CF	TUNNEL COMPLET		
		Coût global	Coût global		Coût global	
Type de chaussée	%	partiel*	%	partiel*	%	Total*
R2	29%	2175	41%	641	32%	2816
Grenaillée	39%	2467	41%	452	39%	2918
Colclair 73m	49%	2434	52%	487	50%	2921
Gerchrome 73m	49%	2453	52%	487	49%	2940
* =Moyenne des solutions en k€						

ANNEXE 4 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES CHAUSSEES DE L'AUTOROUTE A8

Chaussées claires en tunnel sur l'autoroute A8 près de Nice

• Le **Gerchrome** est un BBM 0/10 discontinu 2/5, de 3 cm d'épaisseur, dont la formule est la suivante :

- Gravillons 6/10 : quartz blanc de Inzinzac (56), 50 %
- Gravillons 5/8 : Granusil 10,5 %
- Sable 0/2 : calcaire blanc de sotem Tourris (83), 35 %
- Filler : Méac 3,1 %
- Colorant : oxyde de titane 1,4 %
- Bitume clair : BP Color 5,8 %.

• Le **Colclair** est un BBM 0/10 discontinu 2/6, de 3 cm d'épaisseur, dont la formule est la suivante :

- Gravillons 6/10 : quartz blanc de Inzinzac (56), 65 %
- Sable 0/2 : calcaire blanc de sotem Tourris (83), 33 %
- Colorant : oxyde de titane 2 %
- Bitume clair : BP Color 5,7 %.

Les caractéristiques mécaniques des gravillons en quartz sont très bonnes. Ils sont donc utilisables sur n'importe quel type de route, et en particulier sur autoroutes. Ils sont issus d'une roche massive et donc entièrement concassés ; d'où une très bonne angularité.