

Ministère
de l'Équipement
des Transports
du Logement
du Tourisme
et de la Mer



direction
des Routes

Centre d'Etudes
des Tunnels

Cetu

Guide pour la maîtrise des coûts de fonctionnement des tunnels routiers

De la conception à l'exploitation

CETU
25 avenue François
Mitterrand
Case n°1
69674 BRON Cedex
tél. : 04 72 14 34 00
mél.
cetu@equipement.gouv.fr

Jean - Claude MARTIN

24 août 2005

SOMMAIRE

~~~~~

## Préambule

|                                                                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. COÛTS D'EXPLOITATION : PART RESPECTIVE DES DIFFÉRENTS COMPOSANTS.....</b>                                                                        | <b>5</b>  |
| <b>1.1 Que faut-il entendre par coûts d'exploitation.....</b>                                                                                          | <b>5</b>  |
| 1.1.1 Les fluides.....                                                                                                                                 | 5         |
| 1.1.2 La maintenance.....                                                                                                                              | 6         |
| 1.1.3 Le personnel.....                                                                                                                                | 7         |
| 1.1.4 Assurances.....                                                                                                                                  | 7         |
| <b>1.2 Données chiffrées.....</b>                                                                                                                      | <b>8</b>  |
| 1.2.1 Coûts bruts.....                                                                                                                                 | 8         |
| 1.2.2 Influence des principaux constituants .....                                                                                                      | 10        |
| 1.2.3 Coûts rapportés à la valeur des équipements de l'ouvrage.....                                                                                    | 11        |
| <b>2. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS.....</b>                                                                                      | <b>14</b> |
| <b>2.1 Le contexte réglementaire.....</b>                                                                                                              | <b>14</b> |
| 2.1.1 Les principaux textes.....                                                                                                                       | 14        |
| 2.1.2 Le schéma directeur d'exploitation de la route.....                                                                                              | 14        |
| 2.1.3 Le schéma directeur d'information routière.....                                                                                                  | 14        |
| 2.1.4 La circulaire interministérielle relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national (circulaire n° 2000-63 du 25 août 2000)..... | 15        |
| <b>2.2 Spécificités des tunnels.....</b>                                                                                                               | <b>16</b> |
| <b>3. PARAMÈTRES QUI INTERVIENNENT SUR LES COÛTS .....</b>                                                                                             | <b>18</b> |
| <b>3.1 Les fluides.....</b>                                                                                                                            | <b>18</b> |
| <b>3.2 Maintenance.....</b>                                                                                                                            | <b>20</b> |
| 3.2.1 Niveaux de maintenance.....                                                                                                                      | 20        |
| 3.2.2 Concepts de maintenance.....                                                                                                                     | 21        |
| 3.2.3 Coût .....                                                                                                                                       | 22        |
| <b>3.3 Le personnel.....</b>                                                                                                                           | <b>24</b> |
| 3.3.1 Degré de permanence et de surveillance.....                                                                                                      | 24        |
| 3.3.2 Nature du Poste de Contrôle Commande (PCC).....                                                                                                  | 24        |
| 3.3.3 Stratégie retenue pour la maintenance.....                                                                                                       | 27        |
| 3.3.4 Présence éventuelle de patrouilles voire d'équipes de première intervention.....                                                                 | 29        |
| 3.3.5 Type d'ouvrage (gratuit ou à péage).....                                                                                                         | 30        |
| 3.3.6 Récapitulatif.....                                                                                                                               | 30        |
| <b>4. COMMENT AGIR SUR LES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES.....</b>                                                                                              | <b>31</b> |
| <b>4.1 Conception : l'importance des choix.....</b>                                                                                                    | <b>31</b> |
| <b>4.2 Réalisation : l'exigence de qualité.....</b>                                                                                                    | <b>33</b> |
| <b>4.3 Exploitation : optimisation du fonctionnement.....</b>                                                                                          | <b>35</b> |

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.1 Contrat de fourniture d'énergie.....                                                 | 35        |
| 4.3.2 La maintenance.....                                                                  | 36        |
| 4.3.3 Le personnel.....                                                                    | 37        |
| 4.3.4 Conduite des installations.....                                                      | 37        |
| <b>4.4 L'évaluation des performances ("benchmarking").....</b>                             | <b>38</b> |
| <b>5. CONCLUSION.....</b>                                                                  | <b>39</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>                                                                        | <b>41</b> |
| <b>Annexe A1 : Indice d'actualisation.....</b>                                             | <b>43</b> |
| <b>Annexe A2 : Durées de vie.....</b>                                                      | <b>44</b> |
| <b>Annexe A3 : Recommandations pour effectuer des choix par famille d'équipements.....</b> | <b>46</b> |
| Alimentation électrique et distribution.....                                               | 46        |
| Eclairage.....                                                                             | 48        |
| Ventilation.....                                                                           | 54        |
| Equipements de contrôle-commande et de gestion du trafic.....                              | 57        |
| Les locaux.....                                                                            | 61        |
| Aspects transversaux.....                                                                  | 62        |
| <b>Annexe B : Réalisation : l'exigence de qualité.....</b>                                 | <b>64</b> |
| Alimentation électrique.....                                                               | 64        |
| Eclairage.....                                                                             | 64        |
| Ventilation.....                                                                           | 64        |
| Equipements de contrôle-commande et de gestion du trafic.....                              | 65        |
| Les locaux.....                                                                            | 67        |
| Aspects transversaux.....                                                                  | 67        |
| Documentation.....                                                                         | 67        |
| Présentation des installations.....                                                        | 68        |

# Préambule

Les tunnels coûtent cher. Ce qui apparaît comme une évidence au moment de la construction n'est pas moins vrai pendant toute la vie de l'ouvrage. Les particularités et les risques de la circulation routière en souterrain imposent en effet des dispositifs et équipements spécifiques : certains sont destinés à assurer une exploitation sûre dans le cadre d'un fonctionnement normal, d'autres sont mis en place pour permettre la protection et l'évacuation des usagers ainsi que l'intervention des services de secours, en cas d'incident, d'accident ou d'incendie. Tous ces dispositifs représentent non seulement des coûts d'investissement importants, mais aussi des coûts de fonctionnement et d'entretien particulièrement élevés. En outre, selon l'importance de l'ouvrage, des personnels plus ou moins nombreux sont nécessaires pour assurer des tâches de maintenance, de gestion du trafic et des équipements, voire de première intervention.

Le rôle de l'exploitant est d'assurer la continuité et la sécurité du fonctionnement du tunnel dans un contexte de coûts maîtrisés. Toutefois, une exploitation de qualité, aussi élevée soit elle, ne peut pas permettre d'atteindre une maîtrise des coûts satisfaisante si l'ouvrage a été mal conçu et/ou mal réalisé. Les coûts d'exploitation doivent donc d'abord être une préoccupation majeure des différentes phases du projet et du chantier avant de devenir une question d'exploitation.

Ce guide s'adresse donc en premier lieu aux maîtres d'œuvre afin qu'ils puissent tenir compte, au niveau de la conception et de la réalisation du tunnel, des facteurs qui auront plus tard une incidence forte sur les coûts d'exploitation.

Mais il s'adresse bien sûr aussi aux exploitants, qu'ils aient à interagir avec le maître d'œuvre pendant les phases d'étude et de construction d'un nouveau tunnel, ou qu'ils aient à gérer un ou des tunnels déjà construits. Il vise à leur donner des éléments pratiques et de réflexion pour maîtriser au mieux leurs coûts.

Bien que le contexte réglementaire ici décrit soit celui des tunnels du réseau national (route nationales et autoroutes concédées ou non), ce guide peut s'appliquer pratiquement à l'identique pour les tunnels des collectivités territoriales.

Dans un premier chapitre, ce guide précise le contenu des coûts d'exploitation et donne des ordres de grandeur. Il rappelle ensuite le contexte particulier de l'exploitation des tunnels routiers avant d'analyser les différents paramètres qui influent sur les coûts d'exploitation. Il formule enfin des recommandations pratiques sur la conception, la réalisation et l'exploitation d'un certain nombre d'équipements.

# 1. Coûts d'exploitation : part respective des différents composants

## 1.1 Que faut-il entendre par coûts d'exploitation

L'AIPCR<sup>1</sup> retient trois composantes pour les coûts d'exploitation :

- l'exploitation proprement dite,
- l'entretien,
- le réinvestissement.

Les coûts d'exploitation comprennent le coût total de la surveillance du trafic et du contrôle – commande des équipements ainsi que le coût de l'énergie électrique. Dans les coûts d'entretien sont incluses toutes les dépenses (personnel, consommables et balisage) relatives à l'entretien du tunnel et de ses équipements. Enfin, le réinvestissement comprend le coût annuel moyen du remplacement des équipements ayant atteint leur durée de vie.

Nous retiendrons dans le présent guide une définition différente, plus conforme aux pratiques actuelles dans le monde des tunnels routiers français. En effet les coûts d'exploitation n'y incluent pas les provisions constituées en vue du remplacement des équipements en fin de vie et sont répartis différemment.

Nous définirons comme coûts d'exploitation toutes les dépenses nécessaires pour assurer le fonctionnement des équipements d'un tunnel et garantir leur pérennité. Ils ne prennent pas en compte les amortissements ni les rénovations complètes d'une ou plusieurs familles d'équipements (changement complet de l'installation d'éclairage, mise en place d'un nouveau système de ventilation, etc.).

Sont aussi exclus :

- les dispositifs de second œuvre de génie civil<sup>2</sup> ;
- les charges financières et les remboursements d'emprunts.

Nous répartirons donc les coûts d'exploitation en trois grands postes, d'importance très variable selon le type de l'ouvrage :

- les fluides,
- la maintenance,
- le personnel.

Cette répartition offre une bonne lisibilité et c'est pourquoi elle sera utilisée dans la suite de ce document.

### **1.1.1 Les fluides**

Sous ce vocable sont regroupés les coûts relatifs à :

- l'énergie électrique,
- le fuel,
- l'eau,
- les liaisons téléphoniques ou de données.

---

<sup>1</sup> Association mondiale de la Route – Réduction du coût d'exploitation des tunnels routiers - Rapport et recommandations - 1999

<sup>2</sup> Regards de visite des systèmes de drainage et de collecte des eaux de chaussée, barbacanes, caniveaux, drains, fossés, bassins de décantation, chaussée, trottoirs, etc.

La quasi totalité des équipements installés en tunnel fonctionne en utilisant de l'énergie électrique qui est achetée à un fournisseur. Selon la puissance nécessaire pour assurer le bon fonctionnement des équipements installés dans l'ouvrage, l'alimentation se fait en haute tension (20 kV) ou basse tension (430 V). Très généralement, la livraison est faite en haute tension si l'ouvrage est équipé d'une ventilation.

Dans certains tunnels, un groupe électrogène a été mis en place pour sécuriser l'alimentation électrique. Dans ce type de situation l'exploitant peut parfois utiliser le groupe électrogène à la place du distributeur pour les périodes pendant lesquelles le coût du kWh fourni par celui-ci est supérieur au coût du kWh produit par le groupe électrogène. Le montant de la dépense en énergie comprend donc le paiement de l'énergie électrique fournie par un distributeur auquel s'ajoute le coût d'achat du fuel.

La consommation en eau d'un tunnel couvre les besoins liés au lavage de l'ouvrage et à l'alimentation du réseau incendie du tunnel, lorsqu'il y en a un. Le plus souvent, cette dépense reste modeste.

L'utilisation des liaisons téléphoniques propres à un tunnel y compris les sites techniques et le poste de contrôle-commande ne conduit pas à des dépenses importantes. Toutefois, pour quelques tunnels équipés de postes d'appel d'urgence sans réseau d'appel d'urgence spécifique à l'itinéraire (chaque poste nécessite un abonnement) ou lorsque des liaisons (phonie ou données) ont dû être réalisées entre le tunnel et un local déporté via des lignes spécialisées, le poste "liaisons téléphoniques" peut devenir assez important.

### **1.1.2 La maintenance**

Le terme de maintenance dont il est question ici est pris uniquement au sens de la terminologie normalisée<sup>3</sup> à savoir : ensemble des tâches à conduire pour permettre à un équipement de rendre le service qu'on attend de lui au moment où il est sollicité. Il s'applique quasi exclusivement aux équipements. Il se distingue du terme d'entretien qui est couramment employé dans le domaine du génie civil et qui, dans la pratique habituelle, définit l'ensemble des actions visant à garder un patrimoine en bon état.

L'entretien du gros œuvre d'un tunnel présente des similitudes avec celle d'autres ouvrages mais elle possède, outre les difficultés liées aux interventions (moyens d'accès, interruption du trafic, etc.) une particularité due au fait que les structures en contact avec le terrain peuvent subir des pathologies spécifiques. Quant aux équipements ils imposent une maintenance continue pour assurer leurs fonctionnalités. Pour fixer des ordres de grandeur il est courant de dire que les équipements représentent 15 % du coût de l'ouvrage mais 85% des soucis à l'exploitation.

Le présent document aborde uniquement la maintenance des équipements ; il ne traite pas de l'entretien du génie civil.

Les équipements participent pour une part importante à la sécurité et doivent pour cette raison faire l'objet de soins très attentifs et continus.

En termes de fréquences d'interventions et de moyens à mettre en œuvre, les interventions de maintenance en tunnel sont fréquentes et contraignantes dans la mesure où :

- les matériels mis en œuvre dans le tunnel proprement dit subissent la pollution due au passage des véhicules, ce qui peut provoquer une corrosion importante des métaux,

<sup>3</sup> Norme NF EN 13306 Terminologie de maintenance – Indice de classement NFX 60-319.

- la très grande diversité des équipements installés conduit à avoir un nombre de constructeurs important ; chacun d'entre eux ayant des prescriptions particulières, les interventions sur un système composé de plusieurs sous-ensembles d'origines différentes peuvent souvent devenir complexes,
- les conditions d'accessibilité, notamment pour les matériels implantés dans l'espace réservé à la circulation, peuvent être difficiles,
- la gêne apportée au trafic doit être la plus faible possible.

Les actions à conduire sur les équipements peuvent être réparties ainsi :

- des actions qui visent à atténuer, autant que faire se peut, les effets agressifs de l'ambiance propre au tunnel ; elles consistent en des visites régulières (contrôles visuels des équipements en tunnel et dans les locaux techniques, etc.) et des interventions de nettoyage (balayage, dépoussiérage et lavage) ;
- des actions de maintenance traditionnelles, par famille d'équipements, qui se rapprochent des tâches conduites dans des processus de type industriel.

### **1.1.3Le personnel**

Un tunnel doté d'équipements ne peut pas être exploité sans intervention humaine, si minime soit elle. Selon les caractéristiques de l'ouvrage et la nature de l'itinéraire, les tâches à exécuter sont plus ou moins complexes mais dans tous les cas il convient de :

- gérer le trafic dans l'ouvrage,
- assurer la sécurité des usagers,
- entretenir les équipements mis en œuvre.

L'accomplissement de toutes ces missions peut conduire à avoir du personnel :

- d'exploitation, plus particulièrement affecté à la gestion du trafic, du contrôle-commande des équipements et de la sécurité des usagers,
- de maintenance, pour assurer l'entretien (y compris le suivi des travaux sous-traités<sup>4</sup>) de tous les systèmes installés dans le tunnel,
- de première intervention, chargé de fournir une première aide aux usagers en difficulté dans l'ouvrage (panne, accident, etc.),
- chargé de toutes les tâches administratives et de gestion propres à toute structure.

La part de maintenance qui est sous-traitée a une incidence non négligeable sur la taille de l'effectif.

### **1.1.4Assurances**

Ce paragraphe ne concerne pas les tunnels situés sur le réseau non concédé car l'Etat est son propre assureur.

Pour les autres ouvrages le coût des diverses assurances doit être pris en compte dans les coûts d'exploitation.

---

<sup>4</sup> La part de maintenance qui est sous-traitée a une incidence non négligeable sur la taille de l'effectif.

## 1.2 Données chiffrées

Les coûts des équipements d'un tunnel varient surtout en fonction de l'usage du tunnel, donc de la nature et du mode d'exploitation de l'itinéraire sur lequel l'ouvrage est implanté. Cette dépendance affecte généralement deux facteurs :

- le niveau global d'équipement lié principalement à la nature de l'ouvrage : tunnel interurbain peu circulé ou, à l'opposé, tunnel urbain très fortement circulé,
- la qualité et surtout le degré de complexité des matériels utilisés : équipements assez rustiques pour les tunnels faisant l'objet d'une exploitation très légère (niveau D1, voire D2, au sens de la circulaire n°2000-63<sup>5</sup>) ou équipements très sophistiqués pour les tunnels urbains intégrés à un réseau d'exploitation avec un haut niveau de service (niveau D4, voire D3, au sens de la circulaire n°2000-63).

### 1.2.1 Coûts bruts

Plutôt que de donner des ratios qui présenteraient un caractère trop théorique, il apparaît préférable de présenter des coûts constatés sur des ouvrages de complexité et de longueur variées. Les montants qui sont fournis proviennent<sup>6</sup> de différents types de tunnels en exploitation. Toutefois, compte tenu de la taille de l'échantillon la base de l'étude n'a pas de valeur statistique et les résultats obtenus sont à considérer comme des ordres de grandeur.

Les données qui sont présentées dans le tableau ci-dessous ne présentent pas toutes le même degré de fiabilité.

Les chiffres qui concernent l'énergie sont extrêmement fiables et cela pour deux raisons :

- chaque tunnel dispose de point(s) de livraison spécifique(s) et très peu d'équipements extérieurs sont alimentés à partir des tableaux propres à un tunnel ;
- EDF, jusqu'il y a peu unique fournisseur d'énergie, fournit à la fin de chaque année un tableau récapitulatif sur lequel apparaissent notamment la consommation énergétique annuelle et le coût correspondant.

Les coûts de maintenance sont à manier avec plus de prudence car ils peuvent varier fortement d'une année sur l'autre ; par exemple lors du remplacement des batteries d'onduleurs (durée de vie de l'ordre de 5 ans) ou lors d'une opération de changement systématique des lampes (durée de vie de l'ordre de 2 à 3 ans) le montant annuel du poste maintenance sera nettement plus élevé que pour une année sans opération de ce type. Il faut aussi identifier la vétusté de l'installation car globalement une installation très jeune ou très ancienne coûte plus cher que pendant sa période de vie utile<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> Circulaire interministérielle n° 2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national.

<sup>6</sup> Coûts TTC en Euros pour l'année 2001

<sup>7</sup> Pour tout matériel en général on parle de période de jeunesse, vie utile et période d'usure. C'est pourquoi le taux de défaillance est fonction du temps est souvent représenté avec une courbe dite « en baignoire ». Pour certains matériels soumis dès le début de leur emploi à l'usure (par exemple, pièces en rotation) le taux de défaillance est fonction du temps. Dans ce cas là, il existe une période de jeunesse et ensuite le taux augmente de manière exponentielle avec le temps.

On peut essayer de répartir le coût de la maintenance d'un équipement sur sa durée de vie, mais comme en tunnel le nombre d'équipements est très important et qu'ils ont tous des durées de vie théoriques différentes, la tâche est délicate. De plus, en tunnel les durées de vie constatées<sup>8</sup> sont rarement celles spécifiées par les constructeurs et elles sont très variables d'un ouvrage à l'autre. Toutes ces raisons font que cette piste est rarement explorée.

Il faut aussi noter que souvent les opérations de surveillance et de contrôle visuel sont considérées comme des actions de viabilité et de fait leurs coûts ne sont pas portés dans la rubrique maintenance.

Les données relatives au personnel sont encore plus délicates à utiliser dans la mesure où :

- il est rare d'obtenir des chiffres, même sur la masse salariale globale,
- lorsque des données sont disponibles, il est difficile de répartir le personnel quand l'exploitant ne gère pas seulement le tunnel mais aussi l'itinéraire sur lequel l'ouvrage est situé.

Si les coûts de personnel sont rarement communiqués, il est parfois possible d'obtenir des informations sur le personnel en termes d'effectif et d'affectation par nature de tâches (surveillance, maintenance, viabilité, péage, etc.). C'est à partir d'éléments de cette nature combinés avec des coûts salariaux moyens par catégorie de personnel que les coûts "personnel" qui apparaissent dans le tableau ci-dessous ont été reconstitués. Il faut indiquer que, pour les ouvrages à péage, les péagers n'ont pas été pris en compte.

| Type d'ouvrage                                                              | Coûts d'exploitation annuels ttc en Euros             |             |                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|-----------------|-----------|
|                                                                             | Energie                                               | Maintenance | Personnel       | TOTAL     |
| Tunnel interurbain bidirectionnel<br>(L = 0,35 km)                          | 13 303<br>(Consommation annuelle<br>: 196 304 kWh)    | 16 000      | nd <sup>9</sup> | nd        |
| Tunnel interurbain bidirectionnel<br>(L = 1,4 km)                           | 14 790                                                | 35 800      | 33 000          | 83 590    |
| Tunnel interurbain bidirectionnel<br>(L = 4,8 km)                           | 145 700<br>(Consommation annuelle<br>: 2 118 000 kWh) | 374 000     | 813 000         | 1 332 700 |
| Tunnel interurbain autoroutier<br>unidirectionnel à 2 tubes (L = 0,8<br>km) | 52 124<br>(Consommation annuelle<br>: 819 782 kWh)    | 28 000      | nd              | nd        |
| Tunnel interurbain autoroutier<br>unidirectionnel à 2 tubes (L =<br>3,2 km) | 101 337<br>(Consommation annuelle<br>: 1 659 363 kWh) | 179 000     | nd              | nd        |
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2<br>tubes (L = 0,9 km)                     | 43 500                                                | 84 300      | 31 100          | 158 900   |

<sup>8</sup> Les équipements installés en tunnel ont très souvent des durées de vie réelles inférieures aux valeurs fournies par les constructeurs mais cela n'est pas une règle générale. En effet, les sources lumineuses qui sont alimentées par des circuits électriques issus d'onduleurs ont des durées de vie supérieures.

<sup>9</sup> non disponible

|                                                                                 |                                                       |           |           |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2 tubes (L = 1,4 km)                            | 121 761<br>(Consommation annuelle : 1 794 595 kWh)    | 110 000   | nd        | nd        |
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2 tubes (L = 2,5 km)                            | 134 500                                               | 149 400   | 729 000   | 1 012 900 |
| Tunnels urbains unidirectionnels avec une longueur cumulée des tubes de 18,2 km | 904 000                                               | 889 000   | 1 465 000 | 3 258 000 |
| Tunnel transfrontalier bidirectionnel (L = 12,9 km)                             | 1 264 383<br>(Consommation annuelle : 16 504 143 kWh) | 1 120 000 | nd        | nd        |

Les différents exemples fournis ci-dessus montrent nettement l'importance des sommes mises en jeu. La maîtrise des coûts d'exploitation, **à niveau de service constant**, est donc un objectif très important et les gains éventuels, même s'ils sont de l'ordre de quelques pour cent, pourront être la source d'économies non négligeables car ils concerneront des dépenses élevées.

### 1.2.2 Influence des principaux constituants

A partir des coûts bruts présentés précédemment (§ 1.2.1.), pour les tunnels où les trois principaux constituants du coût annuel d'exploitation sont disponibles, la part respective de chacun par rapport au coût total a été calculée et les résultats obtenus apparaissent dans le tableau ci-dessous.

| Type d'ouvrage                                                                   | Coût d'exploitation annuel |                        |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|
|                                                                                  | Part de l'énergie          | Part de la maintenance | Part du personnel |
| Tunnel interurbain bidirectionnel de 1 414 m                                     | 18 %                       | 43 %                   | 39 %              |
| Tunnel interurbain bidirectionnel de 4 800 m                                     | 11 %                       | 28 %                   | 61 %              |
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2 tubes de 880 m                                 | 27 %                       | 53 %                   | 20 %              |
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2 tubes de 2 500 m                               | 13 %                       | 15 %                   | 72 %              |
| Tunnels urbains unidirectionnels avec une longueur cumulée des tubes de 18 200 m | 28 %                       | 27 %                   | 45 %              |

Les valeurs qui apparaissent dans le tableau ci-dessus montrent que :

- la part de l'énergie est la plus faible et se situe, en moyenne, vers 20% ;
- la part de la maintenance est souvent plus importante : en moyenne 30 %
- le poste personnel est le plus souvent prépondérant.

### 1.2.3 Coûts rapportés à la valeur des équipements de l'ouvrage

Lorsque les coûts d'exploitation d'un ouvrage sont connus il est souvent intéressant de les rapporter au coût total des équipements qui y sont installés. Toutefois, il est très difficile de disposer de cette donnée, ce qui nous a conduit à calculer les coûts des équipements à partir de prix de référence.

Ces prix sont à déterminer pour chaque famille d'équipements (éclairage, ventilation, télésurveillance, etc.) et comprennent les coûts de fourniture, de pose et de mise en ordre de marche ; ils sont établis en fonction des caractéristiques et/ou des performances propres à chaque famille d'équipements (par exemple, la longueur de l'ouvrage, le niveau d'éclairage, la largeur de la chaussée et le nombre de files de luminaires pour ce qui concerne l'éclairage de section courante ou bien la puissance électrique installée et la puissance secourue par groupe électrogène pour déterminer le montant du poste Alimentation électrique).

Les ratios obtenus sont à considérer comme des ordres de grandeur compte tenu des incertitudes liées à leur élaboration.

| Type d'ouvrage                                                                  | Coûts d'exploitation annuels<br>(en Euros) | Valeur des équipement<br>(en Euros) | Coûts d'exploitation annuels en pourcentage de la valeur des équipements |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Tunnel interurbain bidirectionnel<br>(L = 1,4 km)                               | 83 590                                     | 2 090 000                           | 4 %                                                                      |
| Tunnel interurbain bidirectionnel<br>(L = 4,8 km)                               | 1 332 700                                  | 13 577 000                          | 10 %                                                                     |
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2 tubes<br>(L = 0,9 km)                         | 158 900                                    | 5 285 000                           | 3 %                                                                      |
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2 tubes<br>(L = 2,5 km)                         | 1 012 900                                  | 17 768 000                          | 6 %                                                                      |
| Tunnels urbains unidirectionnels avec une longueur cumulée des tubes de 18,2 km | 3 258 000                                  | 77 235 000 <sup>10</sup>            | 4 % <sup>11</sup>                                                        |

<sup>10</sup> Dans cet exemple de tunnels urbains très complexes, le coût des équipements a été calculé avec des prix d'ordre. Ces prix sont des prix globaux d'ouvrages terminés rapportés au mètre selon les caractéristiques fonctionnelles de ceux-ci.

<sup>11</sup> Les prix d'ordre conduisent à des estimations plus élevées que les prix de référence ; ce pourcentage est donc à considérer comme une valeur par défaut.

Les différents ratios obtenus traduisent une dispersion forte mais on peut établir une typologie qui permet de retrouver une meilleure cohérence. La classification proposée (à titre indicatif) fait référence aux degrés de surveillance définis par l'instruction technique<sup>12</sup> et est établie ainsi :

- type A : tunnels relevant d'un niveau de surveillance de degré D1 (permanence simple) ou D2 (permanence avec moyens d'action) ;
- type B : tunnels relevant d'un niveau de surveillance de degré D3 (surveillance humaine non permanente) ou D4 (surveillance humaine permanente) ;
- type C : tunnels très spécifiques en raison, par exemple de leur longueur ou de leur statut d'ouvrage transfrontalier.

Avec cette typologie on obtient alors les résultats suivants :

| Classe d'ouvrage | Coûts d'exploitation annuels en pourcentage de la valeur des équipements<br>(valeurs calculées) |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Type A           | 4 %                                                                                             |
| Type B           | 3 %, 6 % et 4 %                                                                                 |
| Type C           | 10 %                                                                                            |

Dans le tableau ci-dessus, pour l'ouvrage de type A, les coûts d'exploitation annuels, rapportés dans le tableau, représentent 4 % de la valeur des équipements et sont issus d'un tunnel qui offre un niveau d'exploitation satisfaisant, sans plus, compte tenu des ressources qui lui sont affectées. Un bon niveau d'exploitation doit pouvoir être atteint en consacrant un peu plus de moyens à l'exploitation, c'est à dire en atteignant un ratio de 5 % .

Pour les ouvrages de "type B" les coûts d'exploitation annuels du tunnel interurbain unidirectionnel (L = 2,5 km) atteignent 6 % de la valeur des équipements. Cette valeur est assez nettement supérieure aux autres résultats obtenus pour les ouvrages de ce type, ce qui pourrait être perçu comme une indication de coûts d'exploitation mal maîtrisés. Or l'ouvrage concerné est un tunnel qui fait l'objet d'une exploitation de bon niveau avec un exploitant qui dispose de ressources suffisantes. Ce ratio de 6 % est donc à conserver. Les autres ratios sont révélateurs d'ouvrages qui souffrent d'une rareté de crédits d'exploitation.

Pour le seul exemple d'ouvrage de "type C" dont nous disposons, les coûts d'exploitation annuels atteignent 10 % de la valeur des équipements. Cette valeur est élevée mais, comme précédemment, elle ne doit pas conduire à penser que l'ouvrage concerné est mal exploité en termes de coûts. En effet, cet ouvrage est un tunnel qui fait l'objet d'une exploitation de bon niveau avec un exploitant qui dispose de ressources suffisantes ; en outre les coûts le concernant sont extrêmement fiables y compris sur les postes maintenance et personnel. Ce ratio de 10 % n'est donc pas à écarter mais bien au contraire à considérer comme très représentatif.

<sup>12</sup> Annexe N°2 à la circulaire interministérielle n° 2000-63 du 25 août 2000 – Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation).

Compte tenu des remarques précédentes et de la classification retenue les ratios suivants peuvent être proposés :

| Classe d'ouvrage                            | Coûts d'exploitation annuels en pourcentage de la valeur des équipements<br>(valeurs proposées) |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Type A<br>(niveau de surveillance D1 ou D2) | 4 à 5 %                                                                                         |
| Type B<br>(niveau de surveillance D3 ou D4) | 5 à 6 %                                                                                         |
| Type C<br>(niveau de surveillance D4)       | 8 à 10 % voire au-delà pour des ouvrages exceptionnels                                          |

## **2.Contexte réglementaire et spécificités des tunnels**

### **2.1Le contexte réglementaire**

#### **2.1.1Les principaux textes**

Un tunnel du réseau routier national étant forcément situé sur un itinéraire il doit être exploité avec le même niveau de service que celui-ci en application des règles du schéma directeur d'exploitation de la route (SDER) qui visent à assurer une bonne fluidité du trafic. Toutefois, il est aussi soumis à des textes réglementaires spécifiques plus orientés vers la sécurité à offrir à l'usager (notamment les circulaires interministérielles n° 2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national et n° 2000-82 du 30 novembre 2000 sur la réglementation de la circulation des véhicules transportant des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers du réseau national)<sup>13</sup> qui peuvent imposer des exigences plus contraignantes pour le tunnel que celles fixées par le SDER pour l'itinéraire.

#### **2.1.2Le schéma directeur d'exploitation de la route**

Le cadre de référence pour l'action des services du ministère de l'Équipement et des sociétés concessionnaires d'autoroutes en matière d'exploitation de la route est fixé par la circulaire n° 97-52 du 28 mai 1997 relative au schéma directeur d'exploitation de la route (SDER), complétée par la circulaire n° 99-14 du 9 mars 1999 relative au SDER - Démarche pour l'organisation du travail.

Pour l'exploitation de la route le SDER distingue trois grands domaines de missions :

- le maintien de la viabilité qui recouvre l'ensemble des interventions sur le terrain destinées à maintenir ou à rétablir le plus rapidement possible les conditions d'utilisation de la voie les plus proches de la situation normale ;
- la gestion du trafic, qui regroupe l'ensemble des dispositions visant, dans le cadre d'objectifs prédéfinis, à répartir et contrôler les flux de circulation, afin d'éviter l'apparition ou d'atténuer les effets des perturbations occasionnelles ou répétitives ;
- l'aide aux déplacements, qui comprend l'ensemble des dispositions destinées à améliorer le confort et la sécurité des usagers, grâce à la diffusion d'informations prévisionnelles ou événementielles sur les conditions de circulation.

#### **2.1.3Le schéma directeur d'information routière**

Une décision du comité interministériel à la sécurité routière, en date du 25 octobre 2000, a établi un schéma directeur d'information routière (SDIR). Ce schéma s'inscrit dans un contexte de développement de la société de l'information et d'attente des usagers. Il répond à des enjeux de sécurité routière, d'exploitation et de gestion du trafic et aussi de mise en œuvre des politiques de déplacement.

Le SDIR a trois objectifs :

- élaborer une information en temps réel sur la sécurité et les conditions générales de circulation sur un réseau stratégique,

---

<sup>13</sup>

Dans l'attente du décret d'application de la loi du 3 janvier 2002 sur la sécurité des infrastructures et systèmes de transport, actuellement en préparation, et de la transposition de la directive européenne 2004/54/CE du 29 avril 2004 concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen. Ces textes conduiront à imposer des exigences aux tunnels des collectivités territoriales.

- favoriser l'accès à cette information en la mettant à disposition du plus grand nombre,
- faire circuler une information synthétique pour les gestionnaires de la route et les autorités.

Ce schéma est en cours de déploiement sur le réseau national. Par rapport au SDER, il amène une gradation dans l'aide apportée à l'utilisateur mais de manière un peu moins marquée..

#### **2.1.4 La circulaire interministérielle relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national (circulaire n° 2000-63 du 25 août 2000)**

Cette circulaire s'applique aux tunnels routiers du réseau national, y compris les autoroutes concédées, dont la longueur (ou dont la longueur d'au moins un tube lorsque l'ouvrage en comporte plusieurs) est supérieure à 300 mètres. Elle comporte une annexe 2 intitulée "Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation)" qui renferme un chapitre consacré à l'exploitation<sup>14</sup>.

Dans cette annexe 2, l'exploitation est définie comme l'ensemble des tâches nécessaires pour assurer la continuité et la sécurité du fonctionnement d'un tunnel ; elle peut, suivant les cas, comprendre tout ou partie des fonctions suivantes :

- gestion du trafic (notamment surveillance par des personnels dans un poste de contrôle-commande et éventuellement en tunnel, intervention en cas de besoin par la signalisation et éventuellement des personnels se rendant sur place) ;
- gestion technique (notamment surveillance et entretien du génie civil, et surtout contrôle-commande et maintenance des équipements).

Suivant les besoins découlant des caractéristiques du tunnel et de son trafic, les fonctions de permanence et de surveillance éventuelle en salle seront assurées selon l'un des quatre degrés suivants qui offrent des qualités de réponse croissantes :

- Degré D1 - Permanence simple,
- Degré D2 - Permanence avec moyens d'action,
- Degré D3 – Surveillance humaine non permanente,
- Degré D4 – Surveillance humaine permanente.

---

<sup>14</sup>

## 2.2 Spécificités des tunnels<sup>15</sup>

L'exploitation d'un tunnel ne se limite pas aux tâches traditionnelles que sont la viabilité, la gestion du trafic et l'aide aux déplacements. Outre certaines obligations réglementaires (contrôles, par des organismes agréés, des installations électriques, des extincteurs, des monte-charges, des ascenseurs, etc.), l'exploitant doit aussi assumer d'autres obligations qui visent à assurer à l'utilisateur des conditions de parcours satisfaisantes en situation normale (qualité de l'air, éclairage, etc.) et en cas d'incident (mise en œuvre des procédures adéquates) ; relevant essentiellement de la sécurité, ces obligations peuvent être complétées par des dispositions qui visent à fournir du confort à l'utilisateur.

### Niveau de sécurité

Le niveau de sécurité offert à l'utilisateur dans un tunnel est défini lors des études de conception en fonction de réglementation et de recommandations précises. Une fois ce niveau fixé, les solutions retenues en matière d'équipements à mettre en œuvre sont choisies sur la base d'analyses technico-financières visant à réduire autant que faire se peut les coûts d'investissement et de fonctionnement. En d'autres termes, tous les équipements liés à la sécurité présents dans un tunnel sont nécessaires ; leur maintien en fonctionnement n'est pas négociable et les latitudes offertes sur les coûts d'entretien sont faibles.

En termes de sécurité, la notion de niveau de service conduit à établir un cadre de référence très simple :

- l'exploitant doit conduire toutes les actions de contrôle-commande et de maintenance visant à assurer un fonctionnement satisfaisant de tous les équipements mis en place pour garantir le niveau de sécurité requis dans l'ouvrage ;
- il convient de définir, pour les différentes familles d'équipements présentes dans les ouvrages, quelles sont les limites de fonctionnement qui peuvent être admises sans que la sécurité offerte aux usagers atteigne un niveau insuffisant. Lorsqu'un ou plusieurs dispositifs sont défaillants, le niveau d'exploitation est dégradé et des dispositions doivent être prises en conséquence ; la mesure ultime consiste en une fermeture de l'ouvrage.

Des "niveaux de service" que peut présenter un tunnel donné peuvent donc être établis à partir des conditions d'état de ses équipements et du personnel d'exploitation disponible. Lorsque équipements et personnel sont en mesure d'assurer le service qu'ils doivent rendre, on peut considérer que les conditions nominales d'exploitation sont atteintes. En cas de défaillance, totale ou partielle, d'un ou plusieurs équipements, ou d'indisponibilité de personnel, des dispositions peuvent être prises<sup>16</sup> jusqu'à un certain seuil de dégradation ; ce seuil peut être associé aux conditions minimales d'exploitation. Au-delà de ce seuil, la sécurité n'étant plus à un niveau suffisant, l'ouvrage doit être fermé à la circulation.

Les "niveaux de service" précédents sont directement liés à la disponibilité d'équipements ou de personnels mis en place pour répondre à des impératifs de sécurité, et les actions à conduire pour rester dans les conditions nominales relèvent plus du domaine de la maintenance que de celui de la gestion de la route. Établir une classification à partir de ces "niveaux de service", ne présente

<sup>15</sup> Les niveaux d'exploitation définis dans RECTUR (Recommandations pour la conception des tunnels urbains à gabarit réduit) ne sont pas abordés dans ce paragraphe.

<sup>16</sup> Equipes d'intervention en attente aux têtes d'ouvrage, restriction de la capacité de l'ouvrage, insufflation permanente d'air frais, etc.

donc pas d'intérêt particulier car elle ne pourrait pas être rapprochée de la classification SDER qui, globalement, vise à qualifier la fluidité du trafic.

### **Niveau de confort**

Le niveau de service minimal propre à un tunnel étant défini, il est possible de mettre en œuvre des dispositions supplémentaires visant à fournir du "confort" à l'utilisateur. Cette notion de confort peut être définie comme couvrant tout ce qui est fourni à l'utilisateur pour améliorer les conditions de son transit en tunnel, mais qui n'est pas strictement nécessaire pour assurer sa sécurité. Deux types de dispositions peuvent répondre à cette définition : celles qui sont relatives aux équipements installés dans l'ouvrage et celles qui sont relatives au niveau d'utilisation qui est fait de certains dispositifs. Quelques exemples sont indiqués ci-après (liste non exhaustive).

➤ *Equipements installés :*

- piédroit peints ;
- niveaux d'éclairage de section courante plus élevés que strictement nécessaires ;
- réception de radios FM grand public<sup>17</sup> lorsque la réglementation ne les rend pas obligatoires ;
- PMV affichant des messages de type climatique (brouillard en sortie, pluie, etc.) ;
- animations lumineuses ou peintes ;
- mise en valeur têtes (éclairage, plantations, etc.).

➤ *Niveau d'utilisation :*

- utilisation de niveaux d'éclairage de section courante plus élevés que strictement nécessaires ;
- lavages fréquents du tunnel (parois et chaussée) ;
- entretien des têtes (éclairage, plantations, etc.).

Il faut noter que, même dans des dispositions de "confort", la sécurité n'est jamais absente.

On peut définir des niveaux de confort offerts à l'utilisateur en fonction de la présence d'une ou plusieurs des dispositions listées ci-dessus, mais la notion de confort étant perçue différemment par chacun, il est difficile d'établir une classification. En tout état de cause une telle classification ne s'inscrirait pas dans celle prévue par le SDER.

---

<sup>17</sup>

En plus de la radio spécifique à l'itinéraire lorsqu'elle existe (107.7 par exemple) et de l'éventuel dispositif d'incrustation de messages de sécurité.

### 3. Paramètres qui interviennent sur les coûts

#### 3.1 Les fluides

Le coût des fluides est facilement identifiable car ils sont vendus par des entreprises extérieures (distributeur d'énergie électrique, distributeur d'eau, opérateurs en téléphonie, société pétrolière) qui fournissent des prestations clairement définies avec des prix précis.

Comme nous l'avons déjà dit, la plus grande partie des équipements installés en tunnel utilise de l'électricité. La consommation en énergie électrique est importante et la dépense correspondante est élevée. Lorsque le tunnel comporte un groupe électrogène, cette dépense inclut non seulement le paiement du distributeur d'électricité mais aussi l'achat du fuel.

Comme le coût des autres fluides (eau, téléphone) reste assez faible rapporté au montant de la facture d'électricité, on peut dire qu'en règle générale, la part due à l'énergie est prépondérante.

La maîtrise de la facture d'énergie est donc une préoccupation importante de chaque gestionnaire de tunnel routier.

Les cinq principaux systèmes consommateurs d'énergie dans un tunnel sont :

- l'éclairage,
- la ventilation sanitaire,
- le désenfumage,
- les équipements de sécurité (signalisation, télésurveillance, etc.) et les auxiliaires,
- le pompage (dans les tunnels immergés ou à fortes venues d'eau).

L'éclairage contribue beaucoup à la consommation totale d'énergie : les puissances installées sont loin d'être négligeables (quelques dizaines de kW en zone d'entrée et quelques dizaines de kW par km en section courante) et les durées de fonctionnement sont longues (de l'ordre de 3 000 heures, dont souvent la moitié à demi-régime, pour l'éclairage de renforcement et de l'ordre de 8 800 heures, dont souvent la moitié à demi-régime, pour la section courante).

La diminution des polluants émis par les véhicules entraîne une diminution des besoins en ventilation sanitaire : ce type d'équipement contribue donc moins à la consommation d'énergie<sup>18</sup>. Dans certains ouvrages unidirectionnels la ventilation est même très rarement sollicitée car l'effet de pistonement se combine à la baisse de la pollution émise par les véhicules, et les niveaux de pollution atteints en tunnel restent inférieurs aux seuils de démarrage de la ventilation mais l'évolution de la réglementation sur les niveaux admissibles de NOx pourra conduire à une hausse des besoins lors d'une rénovation.

A l'inverse, même si les puissances installées sont plus modestes, la ventilation des dispositifs de sécurité accessibles à l'usager (niches, abris) entraîne une consommation importante, souvent supérieure à celle de la ventilation sanitaire, dans la mesure où ce type d'équipement fonctionne en permanence.

Le système de désenfumage met généralement en jeu des puissances très élevées. Jusqu'à l'ouverture totale du marché de l'énergie électrique à la concurrence<sup>19</sup> on pouvait considérer que dans la mesure où le fonctionnement du désenfumage est, heureusement, très rare, son influence

---

<sup>18</sup> L'évolution de la réglementation sur les niveaux admissibles de NOx pourra conduire à une hausse des besoins lors d'une rénovation complète d'une installation de ventilation.

<sup>19</sup> Juillet 2004

sur la facture énergétique se réduisait aux périodes d'essais (ce qui pouvait toutefois être non négligeable si les essais étaient fréquents). Désormais, pour un distributeur d'énergie<sup>20</sup>, la mise à disposition permanente de la puissance nécessaire pour le désenfumage (puissance qui n'est pas utilisée en mode d'exploitation "normal" mais dont il faut pouvoir disposer instantanément en cas de besoin) est prise en compte pour fixer la puissance souscrite, ce qui, indirectement, conduit à facturer cette mise à disposition. En exploitation "normale" l'exploitant va donc payer sa consommation et la mise à disposition de la puissance nécessaire en désenfumage ; en cas d'utilisation du désenfumage sa facture sera augmentée du montant de la sur-consommation correspondante.

Les équipements de sécurité (caméras, panneaux de signalisation, éclairage des niches, etc.) ont tous des puissances unitaires faibles (quelques dizaines de Watts), mais ils fonctionnent en permanence : ils contribuent donc de manière significative à la facture énergétique.

D'autres matériels moins "visibles" fonctionnent aussi en permanence : il s'agit des auxiliaires (baies techniques, amplificateurs, relayage basse-tension, etc.). Lorsqu'à l'énergie consommée par les auxiliaires, on ajoute les pertes par dissipation thermique dans les transformateurs et les onduleurs, on peut obtenir une consommation comparable voire supérieure à celle de la ventilation sanitaire.

Dans une installation de pompage, les puissances installées sont importantes (quelques dizaines de kW par station) mais, le plus souvent, les quantités d'eau à évacuer sont faibles et de fait les pompes sont peu utilisées. Pour des ouvrages équipés de pompage, la consommation de cet équipement est inférieure à celle de la ventilation sanitaire.

Le tableau ci-dessous résume l'impact des grandes familles d'équipements (à l'exception du désenfumage) en termes de consommation électrique, en fonction de la longueur et du type d'ouvrage (uni ou bidirectionnel). Les indications fournies sont à considérer comme des tendances générales car les caractéristiques d'un ouvrage particulier peuvent conduire à des constats différents.

|                                | <b>Influence relative des équipements sur la consommation électrique</b> |                    |                               |                |                       |  |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------|--|
|                                | <b>L ≤ 500 m</b>                                                         |                    | <b>500 m &lt; L ≤ 3 000 m</b> |                | <b>L &gt; 3 000 m</b> |  |
|                                | uni et bidirectionnel                                                    | uni                | bidirectionnel                | uni            | bidirectionnel        |  |
| Eclairage                      | <i>Très forte</i>                                                        | <i>Forte</i>       | <i>Moyenne</i>                | <i>Moyenne</i> | <i>Faible</i>         |  |
| Ventilation <sup>21</sup>      | <i>Nulle</i>                                                             | <i>Très faible</i> | <i>Moyenne</i>                | <i>Faible</i>  | <i>Forte</i>          |  |
| Équipements de sécurité        | <i>Très faible</i>                                                       | <i>Faible</i>      | <i>Faible</i>                 | <i>Moyenne</i> | <i>Moyenne</i>        |  |
| Auxiliaires et pertes diverses | <i>Très faible</i>                                                       | <i>Faible</i>      | <i>Faible</i>                 | <i>Moyenne</i> | <i>Moyenne</i>        |  |
| Pompage                        | <i>Faible</i>                                                            | <i>Faible</i>      | <i>Faible</i>                 | <i>Faible</i>  | <i>Faible</i>         |  |

<sup>20</sup> EDF A noter que les offres des autres distributeurs ne sont pas connues actuellement.

<sup>21</sup> Y compris la ventilation permanente des niches et des abris.

**Nota** : Les indications ci-dessus n'ont qu'une valeur comparative à l'intérieur d'une même colonne (ainsi par exemple, l'énergie électrique consommée par l'éclairage est plus importante lorsque la longueur du tunnel croît, mais sa part relative dans la consommation totale décroît).

Une étude<sup>22</sup> réalisée sur les consommations d'électricité de 64 tunnels a permis de calculer le coût annuel du kWh de chaque ouvrage en divisant le montant en euros HT de la facture d'énergie par la consommation en kWh sur une année. Une analyse statistique a ensuite établi :

- que le coût moyen actuel<sup>23</sup> du kWh est de 6,8 centimes d'euro ;
- que pour près de 80 % des ouvrages, le coût du kWh est inférieur ou égal à 7,5 centimes d'euro.

## 3.2 Maintenance

### 3.2.1 Niveaux de maintenance

Les opérations de maintenance des équipements sont extrêmement variées mais elles peuvent être classées en fonction de leur technicité. La norme FD X 60-000 "Maintenance industrielle – Fonction maintenance"<sup>24</sup> présente, entre autres, les différents niveaux de maintenance suivants :

#### 1<sup>er</sup> niveau

actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien (ronde de surveillance d'état, graissages, relevé de valeurs d'état, tests de lampes sur pupitre, contrôle d'encrassement des filtres, etc.) ;

→ ce type d'opération peut être effectué par l'utilisateur du bien avec, le cas échéant, les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation.

#### 2<sup>ème</sup> niveau

actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien, intégrés au bien ou extérieurs, d'utilisation ou de mise en œuvre simple (contrôle de paramètres sur des équipements en fonctionnement, réglages simples, contrôle des organes électriques de coupure et de protection, remplacement par échange standard de pièces, etc.) ;

→ ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance.

Un **personnel est qualifié** lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes.

#### 3<sup>ème</sup> niveau

opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes (contrôles et réglages impliquant

<sup>22</sup> Analyse statistique des consommations électriques des tunnels routiers, Juin 1998, C. Trémeaux, CETU.

<sup>23</sup> Calculé en 1998 sur 64 tunnels, le coût moyen a été calculé de nouveau en 2001 sur une quinzaine d'ouvrages avec pour résultat une valeur sensiblement identique.

<sup>24</sup> Publiée en Mai 2002 par l'AFNOR – Indice de classement X 60-000 – Statut : fascicule de documentation

l'utilisation d'appareils de mesure externes aux biens, visite de maintenance préventive sur des équipements complexes, diagnostic d'état avec usage d'équipements de soutien portatifs et individuels, dépannage par usage de moyens de mesure et de diagnostics individuels, .etc.) ;

→ ce type d'opération de maintenance peut être effectué par un technicien qualifié, à l'aide de procédures détaillées et des équipements de soutien prévus dans les instructions de maintenance.

#### 4<sup>ème</sup> niveau

opérations dont les procédures imposent la maîtrise d'une technologie ou d'une technique particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés (révisions partielles ou générales ne nécessitant pas un démontage complet, analyse vibratoire, thermographie infrarouge, relevé de paramètres techniques avec analyse des données, etc.) ;

→ ce type d'opération de maintenance est effectué par un technicien ou une équipe spécialisée à l'aide de toutes les instructions de maintenance générales ou particulières.

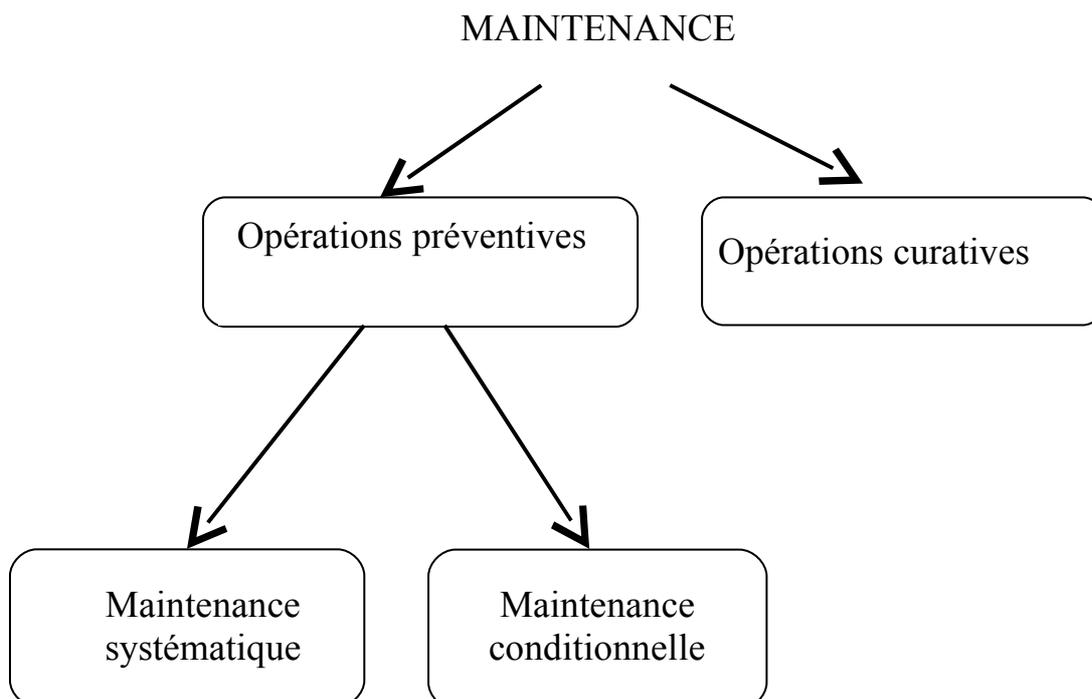
#### 5<sup>ème</sup> niveau

opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels (révision générale avec démontage complet, réparations importantes réalisées par le constructeur, etc.).

→ Par définition, ce type d'opération de maintenance (rénovation, reconstruction) est effectué par le constructeur.

### 3.2.2 Concepts de maintenance

Différents concepts de maintenance existent : curatif (intervention en cas de panne de l'équipement), préventif systématique (intervention selon un planning prédéfini) et préventif conditionnel (intervention en fonction de l'évolution d'un ou plusieurs paramètres).



Compte tenu du rôle des équipements en termes de niveau de sécurité et de service offert à l'utilisateur, une politique de maintenance sérieuse ne peut pas être bâtie en retenant une démarche curative ; il convient, dans tous les cas, de retenir une approche préventive.

Le choix entre maintenance systématique et conditionnelle est à apprécier en fonction des moyens humains et techniques dont on dispose ; une démarche de type conditionnel permet d'optimiser au mieux les interventions et le stock de pièces de rechange ; à l'inverse elle impose un suivi précis des équipements en place, avec notamment des contrôles de performances et des essais réguliers.

La mise en œuvre d'une politique de maintenance privilégiant le préventif ne garantit pas d'éviter des actions de type curatif ; elle permet cependant que ces interventions soient rares.

### **3.2.3 Coût**

En résumé, la maintenance est un poste coûteux, souvent supérieur au poste "fluides" (voir § 1.2.1) car :

- le mauvais état d'un dispositif modeste, par son coût ou sa technicité, peut entraîner la défaillance d'un système complet ; c'est le cas notamment des capteurs qui participent au fonctionnement automatique de certains ensembles (luminancemètre pour l'éclairage, analyseurs de l'atmosphère pour la ventilation, disjoncteur d'alimentation des automates pour la gestion technique centralisée, etc.) ; ces aspects sont à surveiller avec un soin particulier ;
- la très grande diversité des équipements conduit à avoir un nombre de constructeurs important chacun d'entre eux ayant des prescriptions particulières et les interventions sur un système composé de plusieurs sous-ensembles d'origines différentes peuvent devenir complexes ;
- certains équipements présents en tunnel sont fabriqués en petite quantité, ce qui conduit souvent à avoir un coût unitaire des pièces de rechange élevé ;
- les conditions d'intervention dans l'espace circulé sont délicates et il convient de prendre toutes les dispositions nécessaires pour assurer la sécurité des agents de maintenance (balisage, signalisation temporaire, etc.) ;
- l'utilisation de véhicules particuliers (camion nacelle, fourgon avec plate-forme aménagée, etc.) est nécessaire car l'accessibilité aux équipements situés au-dessus de l'espace circulé est difficile ;
- le nettoyage et le lavage des équipements mis en œuvre dans le tunnel proprement dit doivent être faits régulièrement et soigneusement car les équipements subissent la pollution due au passage des véhicules qui peut provoquer, dans certains cas, une corrosion importante des métaux, conduisant à une réduction de leur durée de vie ;
- les opérations de maintenance sont souvent faites de nuit car les interventions doivent perturber le moins possible le trafic ;
- les équipements présents sont de plus en plus sophistiqués ; ils réclament des soins attentifs et les pièces de rechange sont chères ;

certaines actions présentent un caractère obligatoire (essais des trappes de désenfumage, contrôle du dispositif de fermeture, etc.) ;

l'exploitant doit parfois entretenir le matériel spécifique mis à la disposition des pompiers.

Actuellement, les exploitants s'efforcent d'une part de rationaliser leurs interventions et d'autre part de privilégier la maintenance préventive par rapport à la maintenance curative ce qui conduit, toutes choses égales par ailleurs, à une réduction des coûts. Toutefois, cette diminution est contrecarrée par la présence de plus en plus marquée d'équipements "électroniques" au détriment des équipements "électromécaniques". Un équipement plus sophistiqué offre des possibilités de fonctionnement très larges mais il exige davantage d'entretien et requiert des compétences techniques très pointues. Et si depuis plusieurs années les coûts d'entretien sont assez stables pour les tâches traditionnelles (graissage, nettoyage, etc.), ils ont tendance à augmenter pour des actions techniquement plus complexes. Globalement, les coûts d'entretien ont donc augmenté ces dernières années.

Le tableau ci-dessous donne des pourcentages annuels entre le coût **d'entretien préventif** et le coût d'investissement pour des grandes familles d'équipements ; les données fournies sont à considérer comme des ordres de grandeur, car les spécificités de certaines installations peuvent conduire à des valeurs différentes.

| Equipement               | Coût d'entretien préventif sur coût d'investissement | Remarques                                                                                                            |
|--------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alimentation électrique  | 2 %                                                  | Le changement des batteries des onduleurs (très onéreux) s'effectue environ tous les 5 ans                           |
| Ventilation              | 1 %                                                  | L'absence de trappes de désenfumage télécommandées conduit à une valeur plus faible                                  |
| Eclairage                | 0,5 %                                                | Le remplacement des sources s'effectue sur des intervalles pouvant aller de 2 à 8 ans selon les circuits d'éclairage |
| Exploitation et sécurité | 1 %                                                  |                                                                                                                      |

Aux valeurs fournies ci-dessus il convient d'ajouter le coût de **l'entretien curatif**. Ce coût est très variable et est directement lié à la qualité de la maintenance préventive effectuée ; rapporté au coût d'investissement, il est souvent estimé à 0,5 % mais il peut être plus élevé si l'entretien préventif est mal effectué ; il peut aussi diminuer fortement dans le cas inverse. En termes d'optimisation du coût de l'entretien, c'est sûrement le poste sur lequel les possibilités de gain sont les plus importantes.

Autre coût à prendre en compte dans l'entretien : le lavage<sup>25</sup>. Il convient de compter :

0,30 € à 0,53 € / m<sup>2</sup> HT pour un nettoyage avec brossage et jet sous pression ;  
0,15 € à 0,30 € / m<sup>2</sup> HT pour un lavage avec jet sous pression sans brossage.

Enfin, il convient de signaler que, même si les coûts d'entretien sont élevés, ils représentent dans tous les cas une somme très inférieure à celle qu'il faudra pour remplacer prématurément des équipements qui auront été peu ou pas entretenus. D'un point de vue financier, **la solution qui**

<sup>25</sup> Voir Revêtements de piédroits en tunnel routier', novembre 1999, Note d'information n°10, Centre d'études des tunnels.

**consiste à ne pas maintenir est la pire de toutes** : l'absence d'entretien conduit en quelques années à une telle dégradation des équipements que leur remplacement devient indispensable.

### **3.3 Le personnel**

Rappelons que les tâches à accomplir dans un tunnel peuvent être nombreuses (surveillance, entretien, patrouille, etc.) et, de fait, demander un personnel important. Toutefois, la nature et la taille de l'effectif nécessaire pour exploiter un ou plusieurs ouvrages peuvent varier dans des fourchettes assez larges en fonction des paramètres suivants :

- degré de permanence et de surveillance (voir annexe 2 de la circulaire interministérielle N° 2000-63 du 25 août 2000),
- existence et nature du Poste de Contrôle Commande (spécifique à l'ouvrage ou propre à l'itinéraire) ainsi que le nombre et la complexité des ouvrages à exploiter,
- stratégie retenue pour la maintenance notamment en termes de sous-traitance,
- présence éventuelle de patrouille voire d'équipes de première intervention,
- type d'ouvrage (gratuit ou à péage).

#### **3.3.1 Degré de permanence et de surveillance.**

Il a une incidence directe sur le nombre de personnes à prévoir pour assurer le contrôle-commande des équipements. Le degré D4 impose au minimum<sup>26</sup> d'avoir un effectif de sept personnes pour pouvoir réaliser une permanence 24 h sur 24.

Pour un degré D3 le nombre de personnes peut varier car il dépend de la plage horaire pendant laquelle sera assurée une permanence humaine ; à titre d'exemple, pour assurer une surveillance humaine en deux postes de 8 h avec une astreinte en dehors des périodes couvertes par les deux postes, un effectif de six personnes est nécessaire.

Les degrés D1 ou D2 conduisent à avoir un service qui assure une permanence 24 heures sur 24 (avec ou sans moyens d'action) pour recevoir les appels téléphoniques d'urgence ainsi que les éventuelles alarmes automatiques.

Ce service peut être distinct de l'exploitant auquel cas il n'y a pas d'impact en termes de personnel car l'effectif de la permanence n'est pas compté avec celui du tunnel.

Si c'est l'exploitant qui assure la permanence cette tâche sera assurée par le personnel dont il dispose ce qui ne devrait pas amener d'augmentation de son effectif.

Rappelons que pour un degré D3, hors période de présence humaine, des dispositions de types D1 ou D2 doivent être prises.

#### **3.3.2 Nature du Poste de Contrôle Commande (PCC).**

##### **➤ Tunnels dotés d'un poste de contrôle commande spécifique**

Lorsque le contrôle commande d'un tunnel est effectué depuis un Poste de Contrôle Commande (PCC) spécifique, il s'agit très souvent d'un tunnel très équipé qui à lui seul forme une entité identifiable en terme d'exploitation. Ce type d'ouvrage possède, souvent à proximité immédiate, non seulement un PCC spécifique mais aussi des services de maintenance et des équipes chargées d'intervenir dans l'ouvrage. Dans ce cas le personnel assure uniquement des tâches

<sup>26</sup> Il peut être nécessaire de disposer d'un effectif supérieur à sept personnes afin d'assurer un encadrement et pour certains ouvrages de prévoir un renfort mobilisable très rapidement.

propres au tunnel et les effectifs sont souvent importants puisqu'ils peuvent comprendre des personnes chargées :

- du contrôle-commande des équipements et de la gestion du trafic,
- de la surveillance et des interventions sur le terrain (patrouille, balisage pour des incidents ou pour des interventions d'entretien, etc.),
- des interventions de premiers secours dans certains longs tunnels (accident, incendie),
- de la maintenance de premier niveau (visite de contrôle, changement de pièces usées), les autres tâches de maintenance étant supposées sous-traitées,
- de la gestion (budgets, contrats de sous-traitance, etc.),
- du péage pour les ouvrages payants.

Le tableau ci-après présente les effectifs de quelques ouvrages qui ont en commun d'être exploités à partir d'un PCC spécifique ; une classification sommaire a été effectuée en retenant les rubriques suivantes : surveillance, entretien, interventions terrain et administratif ; **les agents affectés au péage n'apparaissent pas.**

| Type d'ouvrage                                                                                 | Personnel    |           |                       |               |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|-----------------------|---------------|-------|
|                                                                                                | Surveillance | Entretien | Interventions terrain | Administratif | TOTAL |
| Tunnels urbains unidirectionnels <sup>27</sup> avec une longueur cumulée des tubes de 12 500 m | 10           | 7         | 18                    | 15            | 50    |
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2 tubes de 2 500 m                                             | 9            | 4         | 9                     | 5             | 27    |
| Tunnel interurbain bidirectionnel de 4 800 m                                                   | 7            | 4         | 5                     | 4             | 20    |
| Tunnel bidirectionnel transfrontalier de 8 600 m                                               | 14           | 8         | 30                    | 2             | 54    |
| Tunnel bidirectionnel transfrontalier de 12 900 m                                              | 12           | 40        | 98                    | 30            | 180   |
| Tunnel bidirectionnel transfrontalier de 11 600 m                                              | 32           | 45        | 96 <sup>28</sup>      | 23            | 196   |

<sup>27</sup> A l'exception d'un ouvrage bi-directionnel de 550 m de long.

<sup>28</sup> Y compris les pompiers présents en permanence sur le site. En comptant que 7 personnes sont nécessaires pour assurer une présence 24 h sur 24, avec en permanence 10 personnes présentes [(3 personnes x 3 sites) + 1 coordinateur], cela conduit à 70 personnes.

Le tableau qui suit a été élaboré à partir des informations présentées ci-dessus. Il contient des ratios obtenus en divisant l'effectif par le nombre de km de tube. Deux types de calculs ont été effectués : le premier en retenant toutes les rubriques (surveillance, entretien, interventions terrain et administratif), le second sans le personnel affecté aux interventions terrains.

| Type d'ouvrage                                                                   | Effectif total | Effectif sans les agents interventions terrain | Effectif par km de tube | Effectif par km de tube (hors agents interventions terrain) |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Tunnels urbains unidirectionnels avec une longueur cumulée des tubes de 12, 5 km | 50             | 32                                             | 4                       | 2,6                                                         |
| Tunnel urbain unidirectionnel à 2 tubes de 2, 5 km                               | 27             | 18                                             | 5,4                     | 3,6                                                         |
| Tunnel interurbain bidirectionnel de 4, 8 km                                     | 20             | 15                                             | 4,2                     | 3,1                                                         |
| Tunnel bidirectionnel transfrontalier de 8, 6 km                                 | 54             | 24                                             | 6,3                     | 2,8                                                         |
| Tunnel bidirectionnel transfrontalier de 12, 9 km                                | 180            | 82                                             | 14                      | 6,4                                                         |
| Tunnel bidirectionnel transfrontalier de 11,6 km                                 | 196            | 100                                            | 16,9                    | 8,6                                                         |

Dès lors que les agents d'interventions ne sont pas comptés, le constat est de :

- 3 agents par km en général ;
- 6 à 9 agents par km pour deux tunnels bidirectionnels longs à fort trafic poids lourds et posant des problèmes spécifiques d'exploitation et de sécurité.

➤ ***Tunnels gérés depuis le centre de contrôle commande de l'itinéraire***

Tous les tunnels très équipés ne sont pas gérés depuis un PCC spécifique, certains le sont depuis un PCC éloigné qui a en charge la gestion d'une partie d'itinéraire. Le ou les tunnels sont alors, en termes de trafic, considérés comme des points singuliers avec une densité d'équipements très forte rapportée au reste de l'itinéraire à l'air libre. Dans ce cas, il est parfois possible d'évaluer la part du personnel affectée à des tâches de maintenance de premier niveau propres aux tunnels ; en revanche, il est plus difficile de procéder à une répartition pour les tâches :

- de gestion du trafic,
- de contrôle-commande des équipements,
- de balisage pour interventions,
- de gestion administrative.

Une répartition au prorata de la longueur des tunnels rapportée à la longueur totale de l'itinéraire minimise la spécificité des ouvrages souterrains, mais d'un autre côté une répartition basée sur la densité des équipements installés surestime trop les besoins de ces derniers par rapport à l'air libre.

En général, dans ce type de PCC on retrouve un degré de permanence et de surveillance D4 ce qui conduit à avoir au moins sept personnes pour assurer les tâches de surveillance.

Pour ce qui est du domaine maintenance, l'effectif nécessaire est très directement lié au nombre de tunnels entretenus depuis un même PCC et à la complexité des équipements installés, mais il y a rarement moins de trois à quatre personnes affectées aux tâches d'entretien.

Enfin, pour ce qui concerne les tâches d'interventions et les tâches administratives, l'affectation d'une partie plus ou moins importante du personnel au(x) tunnel(s) ou au reste de l'itinéraire à l'air libre est extrêmement difficile.

#### ➤ **Tunnels ne disposant pas d'un centre de contrôle commande**

Certains tunnels moyennement équipés ne sont pas gérés depuis un PCC mais disposent d'un local technique à proximité, local où sont concentrés les équipements et/ou des informations sur leur état. Très souvent des alarmes de synthèses techniques sont élaborées et envoyées à l'entité territoriale en charge de l'ouvrage. Le personnel directement affecté à ce type de tunnel est très réduit dans la mesure où :

- la surveillance du trafic et le contrôle-commande des équipements ne sont pas assurés ; les fonctions de permanence (de niveau D1 ou D2) sont assurées par un service extérieur dont elles ne représentent qu'une très petite part de l'activité ;
- quelques tâches de maintenance de premier niveau<sup>29</sup> peuvent être confiées à un agent formé à cet effet ; les tâches de niveau supérieur sont le plus souvent confiées à des prestataires extérieurs,
- les tâches de balisage pour intervention et de gestion administrative sont réalisées par l'entité qui exploite l'itinéraire sur lequel se trouve le tunnel.

Enfin, les tunnels peu ou pas équipés font uniquement l'objet de visites régulières pour inspecter le génie civil ou les équipements. Ces tâches étant soit sous-traitées, soit demandant un investissement en temps très faible, on peut considérer qu'il n'y a pas de personnel spécifiquement affecté à ce type d'ouvrage.

### **3.3.3 Stratégie retenue pour la maintenance**

Aucun exploitant n'assure lui-même toutes les actions de maintenance nécessaires à son tunnel. Une partie plus ou moins grande de celles-ci est sous-traitée. La part de sous-traitance est fortement liée à l'effectif (nombre et compétences) dont l'exploitant dispose (ou peut disposer), mais aussi à l'importance et à la nature des équipements installés.

Très schématiquement, l'exploitant peut, pour un nombre et une complexité d'équipements donnés, rencontrer deux types de situations : soit il dispose d'un effectif imposé et il adapte sa stratégie à cet effectif et aux compétences présentes (ou qui peuvent être acquises moyennant de la formation) ; soit il élabore une stratégie de sous-traitance et, ensuite, il se dote du personnel avec les compétences requises pour réaliser les tâches qui lui restent. En tout état de cause, même si de très nombreuses prestations sont sous-traitées, il est nécessaire de disposer d'un personnel compétent et suffisant pour pouvoir assurer un suivi technique et financier des entreprises sous-traitantes. Généralement trois ou quatre personnes suffisent à assurer ces suivis<sup>30</sup>.

---

<sup>29</sup> Voir § 3.2.1

<sup>30</sup> Cas de tunnels très équipés (éclairage, ventilation, équipements de sécurité et de gestion du trafic, etc.) pour des ouvrages moins bien équipés ces chiffres sont à revoir à la baisse.

Dans le premier cas, la stratégie retenue pour la maintenance a peu d'influence sur l'effectif car elle est établie en fonction de celui qui existe.

Dans le second cas, selon la part de maintenance sous-traitée, la taille de l'effectif va varier dans des proportions qui peuvent facilement aller du simple au triple. Au minimum on retrouve trois ou quatre personnes mais, chez un exploitant qui sous-traite fort peu de tâches, l'effectif chargé de l'entretien peut atteindre une douzaine de personnes voire plus.

Lorsque l'exploitant a la possibilité, dans certaines limites, de rechercher du personnel avec des compétences techniques très pointues (électriciens, automaticiens, etc.), il peut définir sa stratégie selon les trois approches suivantes :

- pour tous les équipements, assurer en interne certains niveaux de maintenance et sous-traiter la réalisation des autres niveaux (schéma n°1) ,
- sous-traiter l'entretien complet d'une ou plusieurs familles d'équipements , (schéma n°2)
- combiner les deux approches précédentes (schéma n°3).

|                        |   | Famille d'équipements (liste non exhaustive) |           |             |            |       |          |
|------------------------|---|----------------------------------------------|-----------|-------------|------------|-------|----------|
|                        |   | Alimentation électrique                      | Eclairage | Ventilation | Télévision | Radio | etc..... |
| Niveaux de maintenance | 1 | X                                            | X         | X           | X          | X     | X        |
|                        | 2 | X                                            | X         | X           | X          | X     | X        |
|                        | 3 | Sous-traitance                               |           |             |            |       |          |
|                        | 4 | Sous-traitance                               |           |             |            |       |          |

*Schéma n°1 : sous-traitance par niveaux*

|                        |   | Famille d'équipements (liste non exhaustive) |           |                |                |                |                |
|------------------------|---|----------------------------------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                        |   | Alimentation électrique                      | Eclairage | Ventilation    | Télévision     | Radio          | etc.....       |
| Niveaux de maintenance | 1 | X                                            | X         | Sous-traitance | Sous-traitance | Sous-traitance | Sous-traitance |
|                        | 2 | X                                            | X         |                |                |                |                |
|                        | 3 | X                                            | X         |                |                |                |                |
|                        | 4 | X                                            | X         |                |                |                |                |

*Schéma n°2 : sous-traitance par famille d'équipements*

|                        |   | Famille d'équipements (liste non exhaustive) |           |             |                |                |          |
|------------------------|---|----------------------------------------------|-----------|-------------|----------------|----------------|----------|
|                        |   | Alimentation électrique                      | Eclairage | Ventilation | Télévision     | Radio          | etc..... |
| Niveaux de maintenance | 1 | X                                            | X         | X           | Sous-traitance | Sous-traitance | X        |
|                        | 2 | X                                            | X         | X           |                |                | X        |
|                        | 3 | Sous-traitance                               |           |             |                |                | X        |
|                        | 4 | Sous-traitance                               |           |             |                |                | X        |

*Schéma n°3 : sous-traitance combinée*

La plupart des stratégies mises au point par les exploitants combinent une approche par niveau et par famille d'équipement. Beaucoup d'exploitants assurent une maintenance de "premier niveau", au sens de la norme (cf. § 3.2.1). En effet, cette maintenance ne requiert pas une technicité forte. L'exécution, par des agents de l'exploitant de tâches de niveau supérieur dépend des éléments (complexité des installations, technicité du personnel, etc.) qui ont été évoqués plus haut ; un exploitant disposant d'un effectif suffisant et compétent sous-traitera beaucoup moins que s'il dispose d'un personnel réduit et peu formé.

Dans les structures d'exploitation mises en place récemment et qui peuvent recruter le personnel nécessaire, la tendance est de :

- sous-traiter le lavage et le nettoyage mais conserver toutes les tâches de contrôle visuel (indicateurs de défauts, voyants, relevés de valeurs) de l'état des équipements ;
- sous-traiter l'entretien complet des équipements les plus complexes (télé-surveillance, radio-retransmission, réseaux de données, etc.) ;
- assurer la maintenance de premier et deuxième niveau et sous-traiter les tâches de niveaux 3 et/ou 4 des équipements plus traditionnels (ventilation, alimentation électrique, etc.) ;
- conserver la maîtrise des sous-traitants en disposant d'un personnel réduit mais suffisamment qualifié.

### **3.3.4 Présence éventuelle de patrouilles voire d'équipes de première intervention**

L'exploitation d'un tunnel peut, en fonction des caractéristiques particulières de l'ouvrage, du trafic, de la nature des équipements installés et/ou de l'itinéraire sur lequel il s'insère, conduire à disposer de personnel amené à intervenir dans l'ouvrage pour aider les usagers.

En règle générale, les missions confiées aux agents d'intervention sont les suivantes :

- surveiller le trafic dans l'ouvrage ;
- assurer la protection des usagers victimes d'un incident dans l'ouvrage ;
- intervenir rapidement sur les lieux en cas d'accident, prendre les premières mesures de sauvegarde et préparer l'arrivée des secours ;
- évacuer les véhicules en panne ou accidentés à l'extérieur du tunnel ;
- en cas de début d'incendie procéder à une première attaque du feu (extincteurs).

Souvent l'exécution de ces missions est réalisée par des patrouilles qui assurent la majeure partie du temps des tâches de surveillance mais qui, en cas de besoin, sont capables d'apporter une aide à l'utilisateur, voire de lutter contre un début d'incendie. L'effectif affecté à des patrouilles est très variable selon le mode de surveillance (24 h sur 24, 2 x 8, etc.) et selon le délai minimal d'intervention sur site retenu par l'exploitant. Actuellement on note toutefois, dans des ouvrages particulièrement équipés, que 5 à 10 personnes peuvent être affectées à ces patrouilles.

Dans les ouvrages bidirectionnels très longs, ces patrouilles peuvent être complétées par des équipes de lutte contre l'incendie propres à l'exploitant. On a alors, à chaque extrémité de l'ouvrage<sup>31</sup>, une présence continue d'équipes constituées de 2 à 3 personnes et l'effectif peut alors facilement atteindre plusieurs dizaines de personnes. Ces équipes peuvent être constituées par des agents embauchés et formés par l'exploitant ou par des pompiers professionnels mis à disposition de l'exploitant dans le cadre de conventions établies avec les services de secours

---

<sup>31</sup> Et au centre de l'ouvrage pour ce qui concerne le tunnel du Mont-Blanc

locaux. Quelle que soit la solution retenue, l'impact de ces équipes est, en termes de coût, extrêmement fort.

### **3.3.5 Type d'ouvrage (gratuit ou à péage).**

La nature d'un ouvrage (gratuit ou à péage) a bien évidemment une incidence sur la taille de l'effectif. Toutefois, le nombre de personnes à affecter à des tâches de péage peut varier énormément d'un tunnel à l'autre en fonction notamment du nombre d'accès, du nombre de voies, et de la nature du trafic. Il est donc très difficile de fournir des chiffres précis ; les effectifs sont du même ordre que ceux retenus pour des itinéraires à l'air libre.

### **3.3.6 Récapitulatif**

Le tableau ci-dessous contient des ordres de grandeur de l'effectif nécessaire pour exploiter un tunnel très équipé de degré de permanence et de surveillance D3 ou D4; pour des ouvrages moins équipés les besoins en personnel sont plus modestes. Ces éléments sont à manier avec précaution car, nous l'avons vu précédemment, le degré de permanence et de surveillance, la nature du PCC, la stratégie de maintenance et la présence éventuelle de patrouille voire d'équipes de première intervention influent fortement sur la taille de l'effectif.

| <b>Tâches</b>                    | <b>Ordres de grandeur de l'effectif</b> | <b>Commentaires</b>                                                                                         |
|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Surveillance                     | 6 à 8                                   | Si le tunnel peut être exploité depuis un PCC existant, il n'y aura pas besoin de personnel supplémentaire  |
| maintenance                      | de 4 à plus de 12                       | La fourchette basse correspond a une stratégie de maintenance qui fait beaucoup appel à la sous-traitance   |
| patrouilles                      | de 0 à 10                               | Pas de personnel spécifique si le tunnel est situé sur un itinéraire parcouru par des patrouilles           |
| Equipes de première intervention | Plusieurs dizaines                      | La présence de ces agents répond à des exigences de sécurité propres aux tunnels bidirectionnels très longs |

Aux valeurs fournies ci-dessus il convient d'ajouter le personnel administratif et les péagers pour les tunnels qui perçoivent un péage.

En termes d'optimisation de l'effectif, il n'est pas possible d'agir sur les patrouilles ni sur les équipes de première intervention dont la présence est liée au niveau de service de l'itinéraire et/ou à la sécurité à assurer dans le tunnel. Pour ce qui concerne la surveillance et la maintenance, il est recommandé de regrouper l'exploitation de plusieurs tunnels et de faire appel à des entreprises extérieures dans le cadre d'une sous-traitance maîtrisée pour des interventions complexes qui demandent des compétences techniques très pointues.

## 4. Comment agir sur les différents paramètres

La maîtrise des coûts d'exploitation ne relève pas uniquement des actions que peut conduire l'exploitant. Les choix faits lors de la conception et, dans une moindre mesure, la qualité de la mise en œuvre ont une incidence bien plus importante.

L'AIPCR a estimé le niveau d'influence des phases de conception, de réalisation et d'exploitation sur les coûts de maintenance. Les fourchettes retenues apparaissent dans le tableau ci-dessous :

| Phase concernée | Niveau d'influence |
|-----------------|--------------------|
| Conception      | 60 à 80 %          |
| Réalisation     | 10 à 30 %          |
| exploitation    | 10 à 30 %          |

Il apparaît très clairement que la phase de conception a une influence très forte sur les coûts de maintenance (et donc sur les coûts d'exploitation). Pour un service rendu identique, une installation mal conçue, aussi bien exploitée soit-elle, sera toujours plus coûteuse qu'une installation dont la conception aura été très bien faite.

L'action sur les coûts d'exploitation doit donc viser les trois grandes phases de la vie d'un projet : conception, réalisation et exploitation.

### 4.1 Conception : l'importance des choix

Au stade de la conception, les diverses solutions possibles doivent être évaluées avec une prise en compte non seulement des investissements initiaux mais aussi des futurs coûts d'exploitation et des coûts de renouvellement. Cette démarche conduit donc à associer le plus tôt possible le futur exploitant (ou quelqu'un qui a une connaissance du domaine de l'exploitation) au projet ; en tout cas avant de lancer les appels d'offre pour les marchés d'équipements.

La présence du futur exploitant peut aussi permettre d'examiner les diverses solutions en fonction non seulement des besoins à satisfaire, mais aussi en tenant compte des conditions dans lesquelles les équipements mis en place seront exploités. Cela concerne notamment la maintenance dans la mesure où les éléments suivants (liste non exhaustive) peuvent influencer sur le choix d'une solution donc sur son coût :

- moyens humains et financiers dont on disposera,
- délais d'interventions qui seront retenus,
- taux de pannes qui seront admis par famille d'équipements,
- politique de sous-traitance retenue,
- etc.

Un équipement moins cher à l'investissement peut coûter plus cher en maintenance car il va tomber en panne plus souvent et des temps d'approvisionnement ou de réparation plus longs qu'un équipement plus cher à l'achat. Très généralement, des moyens de maintenance modestes associés à des exigences d'interventions raisonnables conduiront à privilégier le choix d'une solution de très bonne qualité, donc plus coûteuse qu'une solution de qualité standard.

Quelle que soit la solution retenue, les futurs coûts d'exploitation doivent être évalués le plus précisément possible ; il ne faut pas se limiter au coût prévisionnel de l'énergie, il convient aussi

d'évaluer le coût d'entretien des équipements (pièces de rechange, main d'œuvre, balisage, etc.) ainsi que le coût du personnel.

Pour évaluer aujourd'hui la valeur de dépenses qui vont être effectuées dans l'avenir à des dates différentes il convient de ramener ces dépenses à des sommes équivalentes disponibles aujourd'hui. Pour ce faire, on doit utiliser l'actualisation. Cette méthode consiste à ramener le coût d'une dépense réalisée dans N années à sa valeur actuelle. Pour cela un taux d'actualisation "i" a été défini ; il permet de déclarer équivalents 1 euro disponible aujourd'hui et  $(1+i)^N$  euros disponibles dans N années.

Ainsi l'équivalent aujourd'hui du total des dépenses d'exploitation qui seront effectuées dans un an  $C_{exp(1)}$ , dans deux ans  $C_{exp(2)}$ , dans N années  $C_{exp(N)}$ , est :

$$C_{exp(\tau)} = C_{exp(1)} \times \frac{1}{(1+i)} + C_{exp(2)} \times \frac{1}{(1+i)^2} + \dots + C_{exp(N)} \times \frac{1}{(1+i)^N}$$

En admettant que  $C_{exp(1)} = C_{exp(2)} = C_{exp(N)}$  on obtient :

$$C_{exp(\tau)} = C_{exp(1)} \times \sum_1^N \frac{1}{(1+i)^N}$$

avec

- $C_{exp(1)}$  : le coût d'exploitation annuel supposé identique chaque année,
- N : la durée de vie de l'équipement exprimée en années,
- i : le taux d'actualisation <sup>32</sup>

Le calcul du coût complet d'une solution s'obtient donc en ajoutant au coût d'investissement initial ( $C_{ini}$ ) le coût d'exploitation total actualisé sur une période égale à la durée de vie du système soit :

$$C = C_{ini} + C_{exp(\tau)}$$

Des valeurs de coefficients d'actualisation permettant de ramener aujourd'hui une dépense qui sera effectuée dans N années sont données en annexe A1 ; de plus, lorsque les dépenses annuelles sont identiques, la somme de ces mêmes coefficients sur une durée donnée est fournie.

En phase de conception, pour chaque grande famille d'équipements (alimentation électrique, éclairage, ventilation, etc.) le coût complet (C) des diverses solutions possibles doit être établi. Ce calcul du coût complet obtenu en sommant le coût d'investissement initial et le coût d'exploitation total actualisé sur une période égale à la durée de vie du système est utilisable pour des solutions qui ont des durées de vie proches<sup>33</sup>.

Lorsque la comparaison doit se faire entre des solutions qui ont des durées de vie notablement différentes l'usage est de prendre comme référence la plus longue des durées de vie et d'ajouter le coût de renouvellement qui s'impose pour les solutions ayant des durées de vie inférieures. Par exemple pour comparer une solution avec une durée de vie N avec une solution de durée de vie N/2, le coût complet de la seconde solution sera calculé ainsi :

<sup>32</sup> Le taux d'actualisation est déterminé par le Commissariat Général au Plan. Il est actuellement fixé à 8 % (§ 3.2 de l'instruction-cadre du 25 mars 2004 relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport) mais un groupe de travail a été constitué récemment pour revoir cette valeur.

<sup>33</sup> En toute rigueur, pour des solutions avec des durées de vie proches, la comparaison devrait se faire sur une durée identique ; cela conduirait, par exemple, à comparer sur 90 ans des solutions ayant des durées de vie respectives de 9 et 10 ans. On ne procède pas comme cela car avec cette démarche on actualiserait des dépenses faites sur un futur beaucoup trop lointain ; on préfère comparer sur une durée moyenne : 9,5 ans dans l'exemple précédent

$$C = C_{ini} + C_{exp(N/2)} + C_{N/2} + C_{exp(N/2 \text{ à } N)}$$

avec

$C_{ini}$  : le coût d'investissement initial,

$N/2$  : la durée de vie de l'équipement exprimée en années,

$C_{exp(N/2)}$  : le coût d'exploitation total actualisé sur une durée qui va de l'origine à  $N/2$  années,

$C_{N/2}$  : le coût actualisé du nouvel investissement réalisé après  $N/2$  années, par exemple, si le nouvel investissement est identique à l'investissement initial, on a  $C_{N/2} = C_{ini} \times \frac{1}{(1+i)^{N/2}}$

$C_{exp(N/2 \text{ à } N)}$  : le coût d'exploitation total actualisé sur une durée qui va de  $N/2$  années à  $N$  années.

Le choix entre différentes solutions techniquement équivalentes se fait en comparant le coût complet de chacune ; on retient ensuite la moins coûteuse. Lorsque deux solutions sont très proches en termes de coût complet, il est recommandé de retenir celle dont le coût d'exploitation est le plus faible, le financement de celui-ci étant généralement plus difficile que celui de l'investissement.

Rappelons que, en règle générale, les équipements d'un tunnel, notamment ceux qui sont installés dans l'espace circulé, ont des durées de vie moindres que celles indiquées par les constructeurs ; certains toutefois ont des durées de vie supérieures (cas des sources d'éclairage qui sont alimentées à partir de circuits issus d'un onduleur et qui ne subissent pas de micro-coupure ni de variation de tension).

## 4.2 Réalisation : l'exigence de qualité

La réalisation et la mise en œuvre des équipements d'un tunnel doit faire l'objet de soins particuliers. Outre la vérification des matières premières et des composants utilisés, il convient de s'assurer que l'installation des différents systèmes est faite de telle sorte que l'exploitant ne soit pas obligé d'intervenir plus que de besoin.

Il faut tout d'abord s'assurer que :

- les spécifications techniques des différents matériels sont conformes aux prescriptions du cahier des charges ;
- les normes en vigueur et les règles de l'art ont été respectées,
- les essais (en usine, en plateforme et sur site) ont été réalisés de manière satisfaisante,
- les performances fonctionnelles propres à chaque système (niveaux d'éclairage, débits de ventilation, etc.) sont atteintes.

Le respect des exigences ci-dessus est absolument nécessaire mais il n'est pas suffisant. Il convient aussi, lors de la mise en œuvre des équipements d'un tunnel, d'avoir une forte exigence de qualité qu'il s'agisse de la fabrication ou de la pose.

Cette exigence vise d'une part à maintenir les performances des équipements dans le temps et d'autre part à garantir leur pérennité.

Une fabrication de mauvaise qualité peut réduire les performances des équipements ; c'est le cas, par exemple, lorsque les joints d'un luminaire sont mal mis en place (l'optique se salira et l'appareil sera moins performant) ou lorsque des conduits de ventilation ont des fuites (le débit attendu ne sera pas atteint).

De même, une installation qui n'est pas faite avec soin peut conduire à réduire la pérennité des équipements. Les exemples ci-dessous illustrent ce cas de figure :

- dégradation du revêtement de protection d'un matériel lors de sa pose (rayures, éraflures, chocs, etc.) ce qui va créer un point faible qui pourra être à l'origine de la corrosion de ce matériel ;
- pas de remise en état d'une protection après sciage ou perçage ce qui aura les mêmes conséquences que précédemment ;
- raccordement d'une armoire électrique avec des presses-étoupes qui ne permettent pas de conserver l'indice de protection initiale de l'armoire ;
- etc.

Enfin, l'exigence de qualité vise aussi à faciliter les futures opérations de maintenance : tenant et aboutissant des câbles repérés, armoires étiquetées, dispositifs contenus dans les armoires identifiés, etc.

Certains points particuliers sur lesquels il faut être vigilant durant la phase de réalisation apparaissent dans l'annexe B.

## 4.3 Exploitation : optimisation du fonctionnement

### 4.3.1 Contrat de fourniture d'énergie

Pour une consommation électrique donnée<sup>34</sup> le montant de la facture peut varier assez fortement selon le type de contrat souscrit avec le fournisseur d'énergie.

En France<sup>35</sup>, depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2004 les professionnels, les entreprises et les collectivités locales peuvent choisir librement leur fournisseur d'énergie.

Actuellement, la plupart des ouvrages en exploitation sont alimentés par EDF. Toutefois, cette situation va évoluer avec l'apparition de nouveaux distributeurs d'énergie. Les offres proposées par ces derniers n'étant pas encore suffisamment connues, il n'est pas possible de procéder à une comparaison avec celles d'EDF.

Cependant, dans ses grands principes, la démarche à conduire pour optimiser un contrat d'alimentation en énergie électrique restera la même :

- estimation des puissances atteintes pour chaque période tarifaire du distributeur. Cette estimation doit être faite en pondérant les puissances installées (tous les équipements ne fonctionnent pas simultanément) ;
- estimation des durées de fonctionnement pour chaque période spécifique au distributeur (semaine, dimanche, jour, nuit, etc.) ; plusieurs scénarios peuvent être retenus ;
- calcul des coûts, en fonction des hypothèses retenues (puissances, durées et périodes de fonctionnement), pour les diverses grilles tarifaires proposées par chaque distributeur.

Attention toutefois à s'assurer que :

- le réseau du distributeur et le contrat choisis permettent bien de répondre à un appel soudain et important de puissance (cas du désenfumage) ;
- le contrat choisi peut être renégocié (à la hausse ou à la baisse) tous les ans ou à l'échéance ;
- le niveau de service offert (continuité d'alimentation en période de forte consommation, nombre de coupures annuelles, durée moyenne d'une coupure, etc.) est comparable pour toutes les offres.

Il est extrêmement difficile d'estimer avec précision la consommation énergétique d'un ouvrage avant sa mise en service : la démarche présentée ci-dessus est donc à renouveler régulièrement durant les premières années d'exploitation de l'ouvrage. C'est pendant ces années que les gains réalisés sont les plus importants. Ensuite, peu à peu, la marge de progression diminue car l'ouvrage atteint son régime de croisière avec en parallèle un contrat de plus en plus optimisé.

Certains ouvrages peuvent, lorsque la fiabilité des arrivées d'énergie électrique n'a pas été jugée satisfaisante, être équipés d'un (ou plusieurs) groupe électrogène ; composé d'un alternateur

---

<sup>34</sup> Le fonctionnement des équipements est supposé optimisé.

<sup>35</sup> Pour les Etats membres de l'Union Européenne le marché intérieur de l'électricité est régi par une directive adoptée le 19 décembre 1996 par le Conseil Européen. En France, la transposition de cette directive s'est concrétisée par le vote au Parlement de la loi N° 2000-18 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité.

entraîné par un moteur thermique, il doit être alimenté en carburant. Compte tenu des puissances mises en œuvre (de l'ordre de 1 000 à 2 000 kVA) il s'agit de fuel. L'utilisation de cet équipement, initialement prévue lors d'une défaillance de l'alimentation électrique normale peut être envisagée pour les périodes où le coût du kW.h vendu par le fournisseur d'énergie est supérieur au coût du kW.h produit par le groupe électrogène.

#### 4.3.2 La maintenance

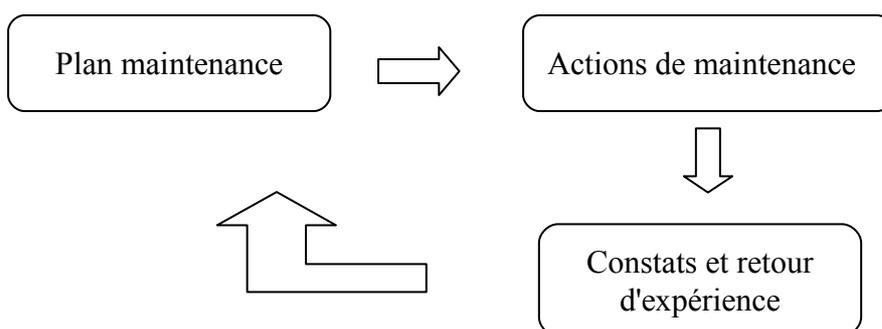
Maintenir c'est effectuer diverses opérations (dépannage, visite, réparation, amélioration, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité du service offert à l'utilisateur. C'est aussi assurer un nettoyage régulier de tous les sites spécifiques à un tunnel (intérieur de l'ouvrage, locaux techniques, issues de secours, etc.). Bien maintenir c'est assurer la maintenance au coût optimum ; pour être atteint cet optimum doit prendre en compte :

- la sécurité à offrir à l'utilisateur ce qui amène à privilégier une **maintenance préventive**,
- les moyens humains et financiers disponibles, ce qui conduit à avoir une politique de sous-traitance adaptée.

Dans tous les cas de figure l'exploitant doit s'assurer de la qualité du travail fourni et conserver le savoir faire. Il doit maîtriser sa sous-traitance et toutes les prestations qui sont confiées à des entreprises extérieures doivent être suivies avec la plus grande vigilance. Le sous-traitant doit avoir des objectifs de maintenance précis qui peuvent être complétés par des indicateurs qui permettront à l'exploitant d'apprécier le travail effectivement fait par le sous-traitant.

L'exploitant peut optimiser sa maintenance en :

- utilisant des outils de gestion informatique (GMAO),
- planifiant le plus possible des regroupements d'intervention (le coût de mise en œuvre du balisage et/ou de la fermeture est ainsi réparti sur plusieurs tâches d'entretien),
- mettant en place des indicateurs de suivi internes,
- créant un cercle vertueux d'amélioration des procédures de maintenance (le plan maintenance doit être évolutif et se nourrir des constatations faites sur le terrain au cours du temps).



Le problème posé par l'utilisation la plus efficiente possible des moyens de maintenance peut trouver une réponse dans la mutualisation. En effet, certaines tâches de maintenance peuvent être mutualisées lorsqu'elles nécessitent :

- un investissement matériel lourd (matériel de lavage d'un tunnel par exemple) ;
- une formation longue sur un matériel qui est présent en peu d'exemplaires dans le tunnel (analyseurs de CO, opacimètres, etc.) ;

- l'utilisation de certains matériels spécifiques d'emploi peu fréquent (matériel de thermographie des armoires électriques, analyseurs de réseaux, etc.).

Toute action de mutualisation implique de conduire une réflexion sur l'organisation du travail et la programmation des interventions d'entretien (pour éviter les conflits liés à des demandes simultanées).

Des gains peuvent aussi être envisagés en conduisant des actions de regroupements au niveau :

- d'achats groupés (sources lumineuses),
- de stock commun pour certaines pièces de rechange onéreuses.

#### **4.3.3 Le personnel**

Pour un effectif donné, supposé avoir reçu la formation initiale nécessaire et disposant des qualités requises, le responsable de l'exploitation d'un tunnel doit s'attacher à :

- maintenir les compétences (formation continue, analyses d'évènements survenus, etc.) ;
- conserver le savoir-faire (procédures précises; traçabilité des actions conduites, dispositions permettant la transmission du savoir) ;
- favoriser les échanges internes (entre services) et externes (sous-traitants, services de secours, forces de l'ordre).

#### **4.3.4 Conduite des installations**

Quelle que soit la nature de l'installation, un équipement dont le fonctionnement est asservi à des paramètres extérieurs doit disposer d'un système de commande performant pour adapter à tout moment l'offre au besoin, de façon à économiser l'énergie et réduire les coûts d'exploitation.

En tunnel, les installations de ventilation et d'éclairage sont bien évidemment équipées de tels dispositifs. Les systèmes mis en œuvre sont performants et fiables, mais ils doivent faire l'objet d'une surveillance attentive au niveau des capteurs : des capteurs défaillants ou mal réglés peuvent provoquer des fonctionnements non justifiés de la ventilation et/ou de l'éclairage et entraîner des dépenses inutiles. L'exploitant doit donc vérifier très régulièrement leur état et notamment s'assurer que :

- le positionnement des cellules de commande de l'éclairage de renforcement est correct ;
- l'horlo-contacteur qui commande le changement des différents régimes de section courante est bien réglé ;
- les capteurs de pollution (analyseurs de CO, opacimètres) ne sont pas encrassés.

Il doit aussi procéder fréquemment à :

- un étalonnage individuel de chaque capteur ;
- une vérification de la transmission des informations depuis chaque capteur jusqu'au système de supervision ;
- un contrôle des valeurs des paramètres de fonctionnement retenus (en mode normal et en mode travaux) pour les installations.

#### 4.4L'évaluation des performances ("benchmarking")

Pour s'assurer que son tunnel est bien exploité, pour un service rendu à l'utilisateur donné, à un coût satisfaisant, l'exploitant dispose notamment des moyens suivants :

- le suivi des coûts ;
- les échanges avec d'autres exploitants ;
- la comparaison avec des ouvrages équivalents.

La grande majorité des exploitants a mis en œuvre des indicateurs et des tableaux de bord qui permettent de suivre, en interne, les dépenses liées à l'exploitation de leur(s) tunnel(s). Ce mode de suivi des coûts a ses limites car il permet seulement de contrôler que (toutes choses égales par ailleurs) les dépenses ne varient pas notablement d'une année sur l'autre ou, lorsqu'il y a variation, il fournit des éléments permettant d'identifier la cause de cette variation.

Un autre moyen dont disposent les exploitants pour évaluer et améliorer la gestion de leur(s) ouvrage(s) est celui que constituent les rencontres entre des professionnels confrontés aux mêmes soucis. Ces rencontres permettent d'améliorer l'exploitation des tunnels par la mise en commun d'expériences heureuses ou malheureuses. Le CETU anime et assure le secrétariat du Groupe de Travail Francophone des Exploitants de tunnels routiers (GTFR) ; ce groupe est un lieu d'échange où sont abordés tous les problèmes liés à l'exploitation d'un tunnel.

Enfin, autre outil à la disposition des exploitants : la comparaison des coûts d'exploitation d'un tunnel donné avec ceux constatés dans des ouvrages équivalents (démarche souvent appelée "benchmarking"). Cet outil est très intéressant car il peut permettre d'identifier un ouvrage qui a des coûts plus bas ou plus élevés que d'autres ; cette situation étant détectée, il est alors possible de rechercher si elle est justifiée par les particularités de l'ouvrage ou si elle est la manifestation d'une exploitation plus ou moins efficace. Malgré cela, l'usage du benchmarking est peu répandu car les tunnels sont très différents les uns des autres (caractéristiques, trafic, mode d'exploitation). Plusieurs travaux ont été engagés pour aboutir à une classification (par exemple, par rapport à la longueur et au Trafic Moyen Journalier Annuel) mais sans grand succès : tant que la mise au point d'un système de classification des ouvrages satisfaisant n'aura pas abouti, l'usage du benchmarking restera modeste.

## 5. Conclusion

Les équipements présents dans les tunnels routiers sont de plus en plus nombreux et de plus en plus sophistiqués, ce qui tend à augmenter non seulement les coûts d'investissement mais aussi les coûts de fonctionnement, notamment en énergie, mais aussi en entretien (fréquence et complexité technique plus élevées des interventions de maintenance) voire, pour certains ouvrages, en moyens humains (surveillance humaine permanente et parfois équipes de première intervention).

Dans ce contexte d'augmentation des coûts, l'exploitant doit réaliser l'adéquation optimale entre les moyens dont il dispose et les besoins réels de l'exploitation afin de garantir à l'utilisateur un niveau de service suffisant.

Les sommes mises en jeu sont importantes et la maîtrise des coûts d'exploitation, à niveau de service constant, est donc un objectif très important pour l'exploitant ; les gains éventuels, même s'ils sont de l'ordre de quelques pour cent, pourront être non négligeables en valeur absolue.

Toutefois, la maîtrise des coûts d'exploitation ne relève pas uniquement des actions que peut conduire l'exploitant. Les choix faits lors de la conception et, dans une moindre mesure, la qualité de la mise en œuvre ont une incidence bien plus importante.

---

---



## ANNEXES

## Annexe A

### Importance des choix en conception

~~~~~

A1 : Indice d'actualisation

A2 : Durées de vie

A3 : Recommandations pour effectuer des choix par famille d'équipements

Annexe A1 : Indice d'actualisation

~~~~~  
Dans le tableau ci-dessous le taux d'actualisation "i" retenu est de 8%.

Les données qui apparaissent dans la colonne  $1/(1+i)^N$  doivent être utilisées si les dépenses d'exploitation ne sont pas identiques d'une année sur l'autre. Chaque dépense effectuée à l'année N doit être affectée du coefficient  $1/(1+i)^N$  ; en sommant les dépenses effectuées pendant toutes les années de vie de l'équipement on obtient le coût d'exploitation actualisé.

La colonne Sigma ne peut être utilisée que si les dépenses annuelles d'exploitation sont supposées constantes ; elle contient la somme des coefficients  $1/(1+i)^N$  pour i variant de 1 à N.

| année N | $1/(1+i)^N$ | Sigma |
|---------|-------------|-------|
| 1       | 0,926       | 0,926 |
| 2       | 0,857       | 1,783 |
| 3       | 0,794       | 2,577 |
| 4       | 0,735       | 3,312 |
| 5       | 0,681       | 3,993 |
| 6       | 0,630       | 4,623 |
| 7       | 0,583       | 5,206 |
| 8       | 0,540       | 5,747 |
| 9       | 0,500       | 6,247 |
| 10      | 0,463       | 6,710 |
| 11      | 0,429       | 7,139 |
| 12      | 0,397       | 7,536 |
| 13      | 0,368       | 7,904 |
| 14      | 0,340       | 8,244 |
| 15      | 0,315       | 8,559 |
| 16      | 0,292       | 8,851 |
| 17      | 0,270       | 9,122 |
| 18      | 0,250       | 9,372 |
| 19      | 0,232       | 9,604 |
| 20      | 0,215       | 9,818 |

## Annexe A2 : Durées de vie

~~~~~

Durées de vie réellement constatées dans les installations déjà en service.

Famille	Sous-ensemble	Durée de vie moyenne en années	Remarque(s)
Alimentation/distribution électrique			
	Cellules 20 KV	20	
	Transformateurs	30	
	Câbles	25	
Alimentation de secours			
	Groupe électrogène	25	Révisions intermédiaires
	Onduleur	15	
	Batterie plomb étanche	5	
	Batterie nickel-cadmium	20	
Eclairage			
	Luminaires	20	
	Chemins de câbles	20	
	Boîtes de dérivation	20	
Ventilation			
	Accélérateurs	20	Révisions intermédiaires
	Ventilateurs (en station)	25	Y compris équipements annexes (registres, insonorisation)
Pompage			
	Pompes	20	
Gestion technique centralisée			
	Capteurs de pollution	10 à 15	Suivant le type d'équipement
	Capteurs de luminance	15	
	Automates	10	Peut être obsolète au bout de 5 à 6 ans

Télesurveillance			
	Caméras	15	Peut être obsolète au bout de 8 à 10 ans
	moniteurs	10	
Signalisation			
	Boucles de comptage	10	
	Panneaux fixes	20	
	Panneaux variables	15	
Téléphonie			
	Postes en tunnel	15	
	Poste centralisateur	25	
Radio retransmission			
	Câble rayonnant	25	
	émetteurs	20	
	antennes	20	

Annexe A3 : Recommandations pour effectuer des choix par famille d'équipements

~~~~~

Les équipements installés dans les tunnels routiers et leurs abords sont très différents les uns des autres, dans leur nature, leur utilisation et leur complexité. D'une manière schématique on peut distinguer :

- les équipements généraux ou équipements lourds (à base de mécanique, électromécanique et courants forts) : alimentation et distribution électrique, éclairage, réseau d'eau de lutte contre l'incendie, etc.
- les équipements plus sophistiqués de gestion (à base de courants faibles) : capteurs, équipements d'automatisme et de télétransmission, dispositifs de supervision, télésurveillance et détection automatique d'incident, signalisation dynamique, réseau d'appel d'urgence, radio-transmissions, comptage, etc.

Ces équipements ne sont pas tous systématiquement installés dans les tunnels routiers. Le niveau d'équipement varie en effet fortement suivant les caractéristiques de l'ouvrage (caractère urbain ou non urbain, deux tubes unidirectionnels ou tube bidirectionnel, etc.).

### **Alimentation électrique et distribution**

L'alimentation électrique des équipements d'un tunnel<sup>36</sup> doit être conçue de manière à n'avoir qu'un seul contrat et avec un seul point de livraison auprès du distributeur d'énergie. En effet, le distributeur fait payer un coût de raccordement pour chaque point de livraison. De plus il est nécessaire de prévoir du matériel de protection et de comptage pour chaque site de livraison. Avoir plusieurs points de livraison conduit d'une part à un investissement initial plus important et d'autre part à avoir plus d'équipements à maintenir.

### **Transformateurs**

L'utilisation de transformateurs secs plutôt que des transformateurs à huile est recommandée. Ce type d'appareil ne présente pas de risque de fuites ni de risques d'inflammation, son entretien est plus simple (pas d'analyse d'huile à faire) et il n'est pas nécessaire de construire un bac de rétention.

Il convient de ne pas sur-dimensionner la puissance unitaire des transformateurs à cause des pertes à vide. Ces pertes sont des pertes actives (exprimées en kW) dissipées dans un transformateur lorsqu'il est alimenté sous sa tension nominale mais ne débite aucune charge.

### **Tableaux basse tension**

La conception des tableaux basse tension doit se faire en visant un objectif de sûreté de fonctionnement de l'ensemble et un objectif de sécurité des agents intervenant sur les installations. Ces deux objectifs peuvent être atteints notamment en cloisonnant les différentes unités fonctionnelles contenus dans le tableau. Différentes formes de tableaux sont possibles suivant l'indice de service<sup>37</sup> retenu.

Pour des tableaux généraux basse tension, il est recommandé de retenir une forme avec séparation des jeux de barres et des unités fonctionnelles ; il en est de même pour des coffrets

<sup>36</sup> Voir Dossier pilote des tunnels – document Equipements – Fascicule Alimentation électrique (septembre 1994)

<sup>37</sup> Cet indice permet de prendre en compte l'exploitation, la maintenance et l'évolutivité.

divisionnaires, mais compte tenu du coût de ce type de séparation on peut envisager une forme un peu moins cloisonnée.

Lorsque les tableaux basse tension sont équipés de nombreux départs (par exemple pour une installation comportant de nombreux accélérateurs de puissance unitaire identique), il est intéressant de prévoir des disjoncteurs montés sur tiroirs débrochables. Le coût de ce type de matériel est plus élevé que pour du matériel standard, mais cela permet de dépanner plus facilement, avec beaucoup moins de risque pour le personnel, et surtout plus rapidement, ce qui conduira à des interventions moins coûteuses.

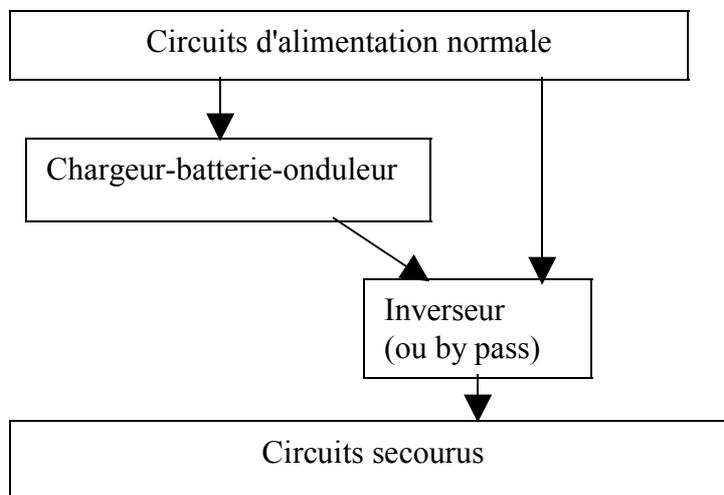
Les voyants et afficheurs doivent être étiquetés et disposés en face avant des armoires.

#### Alimentation(s) de secours

La mise en place d'un dispositif d'alimentation de secours conduit à installer soit un groupe électrogène (pour des puissances à secourir de plusieurs centaines de kVA) soit des ensembles chargeur-batterie-onduleur (pour des puissances de quelques dizaines de kVA). Un groupe électrogène a pour tâche d'assurer un secours de puissance pour pallier une défaillance de l'alimentation normale alors qu'un ensemble chargeur-batterie-onduleur alimente les équipements essentiels de sécurité.

Le choix d'un groupe électrogène ne doit pas se faire uniquement en fonction du niveau de puissance à secourir mais aussi en fonction du temps (estimé) pendant lequel le groupe sera amené à fonctionner.

La mise en œuvre d'un dispositif de by-pass permettant d'isoler totalement l'ensemble chargeur-batterie-onduleur réduit les temps d'intervention (donc les coûts) lors des opérations d'entretien effectués sur cet équipement.



Le choix du type de batterie est lui aussi très important. Il convient de préférer les batteries qui, pour une durée de vie comparable, demandent le moins d'entretien. La technologie au "plomb étanche" répond bien à cette exigence : par rapport aux batteries "plomb ouvert" qui demandent une surveillance du niveau de l'électrolyte, et si nécessaire un complément en eau distillée, une batterie au plomb étanche ne demande aucun entretien particulier. Attention toutefois aux conditions d'emploi car la durée de vie de ce type de batterie est donnée pour une température de l'ordre de 25 °C et une utilisation à des températures différentes la réduit fortement. Pour fixer les idées, la durée de vie diminuera de moitié si la température ambiante est en permanence à  $\pm 10^\circ$  C de la valeur de référence. Il convient donc de disposer l'ensemble chargeur-batterie-onduleur dans un local chauffé et climatisé. Dernier point, ce type d'équipement peut être conçu sous forme

modulaire (en rack) : cette technologie est intéressante car elle permet d'avoir des interventions plus rapides en cas de panne.

### **Eclairage**

Dans la plupart des tunnels la pénétration naturelle de la lumière extérieure ne permet pas d'avoir des conditions lumineuses suffisantes pour assurer la visibilité d'obstacles éventuels. Il est donc indispensable d'installer un éclairage artificiel<sup>38</sup> qui offre aux usagers, de jour comme de nuit, des conditions de visibilité et de confort qui soient satisfaisantes.

Ce type d'équipement doit être conçu avec une grande attention car il est coûteux à l'investissement, mais surtout en exploitation où il représente une part non négligeable des dépenses de consommation électrique (les puissances installées sont loin d'être négligeables surtout en zone d'entrée) et d'entretien. En effet, l'entretien de l'éclairage représente une sujétion très lourde tant par le nombre d'heures qu'il nécessite annuellement que par la fréquence des interventions. Celles-ci sont rendues très difficiles par la circulation et engagent la sécurité des usagers et du personnel. Il convient donc, dès les études préliminaires, de prendre toutes les dispositions permettant de le faciliter.

### **Type d'installation**

Les tunnels sont équipés d'appareils d'éclairage à flux dirigé, qui projettent la lumière émise par les sources vers la chaussée et la base des piédroits. Deux types d'installation sont utilisées :

- le système dit symétrique où le flux lumineux des appareils est symétrique par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage. Ce système est utilisé dans tous les cas en section courante. En zone d'entrée il convient plutôt aux tunnels dont la vitesse d'approche est faible.
- le système à contre-flux où les appareils projettent la lumière vers les usagers dans des conditions qui évitent de les éblouir. Ce système n'est adapté qu'aux zones d'entrée, mais il y présente des avantages sérieux en exploitation dès que la vitesse des usagers est relativement élevée (à partir de 90 km/h).

### **Régimes de fonctionnement**

#### **➤ Nombres**

Traditionnellement dans une installation d'éclairage les différents régimes sont obtenus :

- en allumant ou en éteignant un nombre croissant de sources,
- en faisant varier le flux d'un nombre fixe de sources,
- en mixant les deux possibilités précédentes.

La courbe des luminances qu'il convient de mettre en œuvre en entrée a été établie pour certaines valeurs de luminances du site ; ces luminances peuvent diminuer, mais tant que le seuil de passage au régime inférieur n'est pas atteint, le régime "supérieur" reste en service : l'installation fournit donc "trop" de luminance, mais on ne peut pas en fournir moins sous peine de ne plus satisfaire aux besoins. La solution qui consiste à multiplier le nombre de régimes, pour assurer une régulation la plus fine possible en ayant le niveau de renforcement en service le plus proche du niveau nécessaire, atteint ses limites rapidement car la multiplication des régimes entraîne :  
une multiplication des circuits donc un coût d'investissement qui augmente (câbles, boîtes de dérivation supplémentaires, etc.) . L'optimum entre le gain sur la consommation et le surcoût à l'installation est obtenu pour une installation avec 2 ou 3 régimes ;  
l'utilisation de sources de faible puissance unitaire ayant un rendement lumineux moindre.

---

<sup>38</sup> Voir Dossier pilote des tunnels – document Equipements – Fascicule Eclairage (novembre 2000)

En section courante, on retrouve le plus souvent deux régimes : un régime diurne et un régime nocturne qui permet de garantir un niveau comparable à celui d'un éclairage public extérieur. Certains ouvrages disposent en plus d'un régime "économique" qui peut parfois être le régime minimal de sécurité de l'ouvrage ; ce régime est utilisé pendant les périodes nocturnes de faible trafic. Le gain financier est double : sur la facture électrique (impact faible car en période nocturne le coût unitaire du kWh n'est pas très élevé) et sur le renouvellement des sources (certaines seront moins sollicitées).

Pour diminuer le coût de l'énergie consommée sans augmenter le nombre de régimes, il faut s'orienter vers l'utilisation de dispositifs de variation. En section courante avec la mise en œuvre des tubes fluorescents compacts, l'éclairage de section courante peut être modulable de manière continue, ce qui permet d'exploiter le système avec le maximum de souplesse. En zone d'entrée l'utilisation de variateurs de tension peut s'envisager avec des sources sodium haute pression mais cela impose de mettre en place une régulation de l'éclairage de renforcement asservie à la luminance en continu. Ce système de variation présente une amplitude limitée et le rendement énergétique des sources chute fortement aux faibles régimes.

L'intérêt d'un régime économique ou d'un système de variation continue ou pseudo continue est donc à apprécier en fonction du surcoût à l'investissement et du gain possible sur les coûts de l'énergie et du renouvellement des sources.

➤ *Asservissement à la vitesse*

L'influence du paramètre "vitesse de référence" est très forte sur les niveaux de luminance à installer en zone de renforcement. Dans des ouvrages où le trafic est régulièrement congestionné, il est tentant de vouloir prendre en compte ce paramètre. L'utilisation de variateurs pour réaliser un asservissement aux conditions de trafic peut être envisagé, mais cette technique reste encore d'application très difficile car il faut que :

la circulation soit congestionnée de manière récurrente,  
les évolutions de trafic ne soient pas trop erratiques,  
la vitesse moyenne du trafic soit bien établie.

Au total, en termes d'améliorations possibles, les perspectives offertes par une action sur les régimes de fonctionnement restent faibles.

*Courbe des luminances à respecter*

En zone d'entrée, l'installation d'éclairage ne suit pas fidèlement la courbe des luminances qu'il convient de mettre en œuvre ; elle l'encadre par des paliers dont les valeurs se situent au-dessus. Lorsque l'implantation des luminaires de renforcement n'est pas soumise à des contraintes particulières (par exemple luminaires intercalés entre ceux de l'éclairage de section courante à intervalle fixe), il convient de suivre au mieux la courbe théorique des besoins.

*Commande*

La mise en œuvre d'un système de commande doit être particulièrement soigné. Qu'il s'agisse d'assurer la commande des régimes de section courante ou des régimes de renforcement il convient de retenir des dispositifs précis, fiables et robustes.

*Implantation*

Le choix de l'implantation des luminaires est très important car il conditionne, pour une grande part, les conditions d'intervention de l'exploitant sur son installation d'éclairage. Quelles qu'en soient les modalités, l'entretien en tunnel n'est possible, hormis le cas des galeries spéciales d'éclairage, qu'au moyen d'un engin à plate-forme permettant un accès direct. Il importe que cet engin apporte le minimum de gêne à la circulation si celle-ci ne peut être détournée de l'ouvrage lors de l'entretien, et les files de luminaires doivent être implantées en conséquence.

Le choix définitif doit tenir compte des autres équipements à mettre en œuvre et particulièrement de la signalisation.

Dans les deux tableaux qui suivent sont donnés, pour un système symétrique, des critères valables dans la grande majorité des ouvrages à équiper, en distinguant deux catégories de sections: celles où les luminaires peuvent être implantés au-dessus des voies et celles où l'implantation doit être latérale.

Il convient toutefois de souligner que, même si l'espace au-delà de la hauteur libre est suffisant, le choix d'une implantation latérale peut être judicieux. En effet, dans un profil circulaire des files lumineuses implantées latéralement en rein de voûte ont un rendement lumineux pratiquement aussi bon qu'au-dessus des voies ; on accède plus facilement aux sources et on n'a pas pour autant de serrurerie à surveiller et à nettoyer. Par ailleurs l'expérience montre que le risque d'accrochage des files lumineuses au-dessus des voies n'est pas négligeable même avec une bonne revanche de protection.

| Condition d'implantation                                                                                     | Type d'implantation des luminaires                                        | Avantage(s)                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Inconvénient(s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Tunnels concernés                                                                                                                                                                                                                                    | Remarque(s)                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| espace suffisant au-delà de la hauteur libre de l'ouvrage. pour implanter les luminaires au-dessus des voies | Au-dessus des voies de circulation sur plusieurs files                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- meilleur facteur d'utilisation possible pour les luminaires</li> <li>- dans le cas de sources Na Hp l'éblouissement est réduit ce qui permet un défilement<sup>39</sup> des luminaires beaucoup moins sévère et conduit donc à un rendement meilleur</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- franchissement des files lumineuses par certains équipements (accélérateurs, panneaux directionnels,..)</li> <li>- nécessité de prévoir dans certains cas une serrurerie importante ( pendarts, ou système de maintien des luminaires, de grande longueur )</li> <li>- risque d'accrochage des installations par des véhicules hors gabarit ou des bâches flottantes</li> </ul>                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- profil voûté sans gaines de ventilation</li> <li>- profil voûté avec gaines de ventilation</li> <li>- profil cadre sans gaines de ventilation</li> <li>- profil cadre avec gaines de ventilation</li> </ul> | Dans le cas d'un profil cadre la hauteur sous plafond est souvent une contrainte importante car elle peut conditionner le profil en long de la chaussée |
|                                                                                                              | Une seule file au-dessus des voies de circulation dans l'axe de l'ouvrage | Par rapport à la solution ci-dessus le coût est bien inférieur tant en investissement qu'en exploitation                                                                                                                                                                                                 | <p>L'inconvénient essentiel réside dans l'entretien qui nécessite la fermeture du tube concerné .Si on ne peut pas basculer la circulation sur un autre tube ou sur un itinéraire parallèle, ces difficultés d'exploitation peuvent imposer de décaler latéralement la file de luminaires</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le risque d'accrochage existe mais il est limité, notamment lorsque la file lumineuse est située au-dessus de la séparation des deux voies de circulation</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- profil voûté sans gaines de ventilation</li> <li>- profil voûté avec gaines de ventilation</li> <li>- profil cadre sans gaines de ventilation</li> <li>- profil cadre avec gaines de ventilation</li> </ul> | Solution souvent envisagée pour des raisons d'économie lorsque l'ouvrage est étroit et faiblement circulé                                               |

<sup>39</sup> Moyens employés pour dissimuler à la vue directe les lampes et les surfaces de luminance élevée afin de réduire l'éblouissement.

| Condition d'implantation                                    | Type d'implantation des luminaires                                                                                                                              | Avantage(s)                                                                                                                     | Inconvénient(s)                                                                                                                                                                                                              | Tunnels concernés                                                                                                                   | Remarque(s)                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| espace insuffisant au-delà de la hauteur libre de l'ouvrage | Bilatérale                                                                                                                                                      | - entretien facilité (luminaires plus accessibles, position de travail plus aisée, une seule voie de circulation à neutraliser) | - facteur d'utilisation moins bon que pour une installation au-dessus des voies<br>- difficulté pour maîtriser l'éblouissement des usagers par les sources Na Hp ce qui peut conduire à défiler les luminaires               | - profil voûté avec gaines de ventilation<br>- profil cadre sans gaines de ventilation<br>- profil cadre avec gaines de ventilation |                                                                                                                                                                                    |
| pour implanter les luminaires au-dessus des voies           | Unilatérale (pour les tunnels unidirectionnels il est préférable de mettre les luminaires à gauche pour éviter l'effet de masque engendré par les poids lourds) | Par rapport à la solution ci-dessus le coût est bien inférieur tant en investissement qu'en exploitation                        | - facteur d'utilisation moins bon que pour une installation au-dessus des voies<br>- difficulté pour maîtriser l'éblouissement des usagers par les sources Na Hp ce qui peut conduire à défiler <sup>40</sup> les luminaires | - profil voûté avec gaines de ventilation<br>- profil cadre sans gaines de ventilation<br>- profil cadre avec gaines de ventilation | Solution ne pouvant pas être utilisée si la chaussée présente plus de deux voies en raison de la difficulté à obtenir une uniformité transversale des éclairagements satisfaisante |

<sup>40</sup> Action qui consiste à dissimuler à la vue directe les lampes et les surfaces de luminance élevée afin de réduire l'éblouissement

### Sources lumineuses

Des considérations liées aux conditions d'utilisation en tunnel et aux niveaux d'éclairage à obtenir ont conduit à retenir jusqu'à présent :

les lampes fluorescentes, de différents diamètres, tubulaires ou compactes,  
les lampes à vapeur de sodium basse pression,  
les lampes à vapeur de sodium haute pression.

A noter qu'il existe des lampes à induction qui satisfont aux contraintes spécifiques des tunnels mais qui ne sont pas utilisés en France à ce jour.

D'une manière très générale, le tube fluorescent convient bien à la section courante pour des raisons de confort visuel, de rendu des couleurs et d'aspect ; il n'est pas utilisé en zone de renforcement car les différentes sources existantes ne sont pas très puissantes et les flux émis ne sont pas suffisants pour assurer des niveaux élevés. Il existe des versions compactes extrêmement intéressantes car elles permettent d'utiliser des luminaires courts donc faciles à manipuler.

Les sources sodium basse pression ont un excellent rapport lumen/watt : elles sont donc très intéressantes en termes de consommation d'énergie. Toutefois le recours à ce type de source n'est pas très économique car l'expérience montre que leur renouvellement est onéreux. De plus, bien que leur monochromatisme soit peu gênant dans les ouvrages où les piétons ne sont pas admis ou dans les ouvrages interurbains, l'ambiance lumineuse offerte à l'utilisateur par les sources sodium basse pression n'est pas très agréable. Autre point qui est en défaveur de ces sources : leur encombrement. Les dimensions des sources sont importantes et imposent d'utiliser des luminaires volumineux, donc lourds et difficiles à manœuvrer lors des opérations d'entretien. Ce type de source est donc de moins en moins utilisé en tunnel.

Les sources sodium haute pression offrent un rapport lumen/watt convenable, une large gamme avec des flux unitaires élevés, et apportent un confort visuel satisfaisant (mais moindre qu'avec des tubes fluorescents). L'emploi de sources sodium haute pression de faible puissance est donc possible pour les ouvrages urbains à fort niveau d'éclairage en section courante ou pour les tunnels de grande largeur.

En section courante l'optimum consiste donc à utiliser des tubes fluorescents compacts ou des sodium haute pression dans les ouvrages urbains (grande largeur et forts niveaux de section courante).

En zone de renforcement, afin de limiter le nombre de luminaires, il convient d'utiliser des sources de puissance unitaire élevée. Compte tenu des remarques faites précédemment sur les sources sodium basse pression, les seules lampes qui conviennent sont celles à vapeur de sodium haute pression en prenant soin de réduire au maximum les effets d'éblouissement par un défilement.

### Luminaires

L'ensemble formé par le luminaire et son système d'accrochage sur chemin de câbles (ou sur pendants) doit pouvoir être démonté sans outil. Chaque luminaire doit être équipé d'un ou plusieurs cordons flexibles terminés chacun par une fiche électrique mâle. Cette fiche mâle se connecte sur une fiche électrique femelle avec capot ; ainsi lors d'une intervention qui consiste à déposer un luminaire pour le réparer en atelier le capot se rabat et protège la fiche femelle de l'ambiance du tunnel.

Les luminaires utilisés dans les tunnels sont soumis à des conditions particulières d'utilisation et doivent répondre à des caractéristiques mécaniques et photométriques très spécifiques.

Le choix des luminaires doit donc se faire en prenant en compte non seulement les caractéristiques photométriques nécessaires mais également les conditions d'environnement (corrosion, encrassement) et les conditions d'exploitation toujours difficiles.

L'étanchéité est absolument nécessaire pour assurer la conservation des qualités tant mécaniques qu'optiques des luminaires. On retient un indice minimal de protection IP 65 suivant la norme NFC 71-000 (NF EN 60 598-1).

Il faut veiller à la durée de vie des lampes et tout particulièrement à la protection des équipements (luminaires, câbles, supports, chemin de câbles, boîtes de dérivation,.....) vis à vis de l'ambiance très corrosive qui règne dans un ouvrage souterrain. Il importe de souligner que la corrosion, qui dépend de très nombreux facteurs, peut varier fortement d'un tunnel à l'autre.

### Chaussée <sup>41</sup>

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. Pour obtenir un niveau de luminance permettant une bonne perception, il faut des niveaux d'éclairage d'autant plus importants que le revêtement est plus sombre.

C'est pourquoi il est nécessaire de porter une attention particulière aux caractéristiques photométriques de la chaussée et à leur maintien dans le temps, en particulier lors d'une réfection. S'il est concevable de retenir pour celles-ci des valeurs moyennes lors du projet d'éclairage au niveau de l'étude préliminaire, il faut en revanche que le type de revêtement soit choisi lors du projet d'ouvrage d'art et que le dimensionnement de l'éclairage en tienne compte

Une chaussée éclaircie (chaussée à granulats clairs ou très clairs mais à liant bitumineux foncé) est un peu plus chère qu'une chaussée de type  $R_2$ <sup>42</sup> (chaussée qui se rencontre fréquemment en tunnel) mais elle entraîne une légère diminution des coûts d'exploitation ; le bilan financier global (investissement plus coût d'exploitation actualisé sur la durée de vie du revêtement) ne conduit pas à un avantage très marqué pour ce type de chaussée. Cela étant elle permet d'améliorer les conditions de confort offertes à l'utilisateur.

Une chaussée claire (chaussée dont à la fois les granulats et le liant sont clairs) présente, après quelques mois de circulation, des caractéristiques spéculaires (paramètre de specularité  $S_1$ ) très proches d'une chaussée  $R_2$  mais avec une clarté nettement supérieure (coefficient de luminance moyenne  $Q_0$  de l'ordre de 0,10 alors qu'il est de 0,07 pour une chaussée  $R_2$ ). Toujours avec comme référence une chaussée  $R_2$ , une chaussée claire présente un coût beaucoup plus élevé, mais elle peut entraîner des gains intéressants sur les coûts d'exploitation, notamment sur les zones d'entrée où les niveaux à mettre en œuvre sont importants. Le bilan financier global est identique à celui d'une chaussée  $R_2$  dès lors que le coût de la chaussée claire est trois fois plus élevé ; lorsque le coût de la chaussée claire diminue, l'intérêt de ce type de revêtement augmente (et inversement).

Il convient donc, lors de la conception d'une installation d'éclairage :  
d'analyser l'intérêt de mettre en œuvre des revêtements clairs ou éclaircis,  
de tenir compte des choix faits en matière de chaussée dans le dimensionnement de l'éclairage.

### Ventilation

La ventilation en tunnel a pour objectif en situation normale d'exploitation de maintenir le taux de pollution de l'air au-dessous des niveaux admissibles. En cas d'incendie, elle a pour rôle de mettre

<sup>41</sup> Dans ce texte ce vocable ne recouvre que la couche supérieure de surface (revêtement)

<sup>42</sup> Revêtement standard de la classe 2 de la classification de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE).

les usagers à l'abri des fumées pour qu'ils puissent évacuer et, dans un second temps, de permettre l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie. Certains tunnels ne nécessitent pas de ventilation mécanique (on parle alors de ventilation naturelle) ; pour ceux qui en demandent une, on distingue deux systèmes principaux :

- le longitudinal, pour lequel des ventilateurs (généralement suspendus et appelés accélérateurs) poussent la masse d'air du tunnel ;
- le transversal, pour lequel on injecte et/ou on extrait de l'air à intervalles réguliers dans le tunnel au moyen de gaines de ventilation.

Le choix du système de ventilation<sup>43</sup>, dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels les coûts d'investissement et d'exploitation. En effet, la puissance électrique absorbée par une installation de ventilation peut facilement atteindre plusieurs centaines de kW. Le coût d'exploitation d'une ventilation ne se limite pas aux coûts d'énergie : comme tout système, ce matériel demande à être entretenu. Compte tenu de sa complexité et du haut niveau de performances dont il est souvent doté, les coûts d'entretien sont importants.

#### Règles générales

Quel que soit le système de ventilation retenu (longitudinal ou transversal), il convient tout d'abord d'essayer de standardiser le plus possible l'installation en installant autant que faire se peut du matériel de caractéristiques semblables. Par ailleurs, il faut soigner l'accessibilité aux différents équipements mis en œuvre, tant dans le tunnel lui-même que dans les locaux techniques.

#### Système longitudinal

Certaines limites sont à respecter en termes de performances des accélérateurs :

- éviter les machines à vitesse de rotation élevée ( une vitesse de 3 000 t/mn conduit à une usure rapide du matériel),
- plus la vitesse de soufflage est élevée, plus la puissance unitaire des machines utilisées (à encombrement comparable) peut être importante ; cela conduit à installer moins de machines, en revanche, le rendement énergétique de chaque machine est moins bon. Le bon compromis se situe aux environs de 30 m/s.

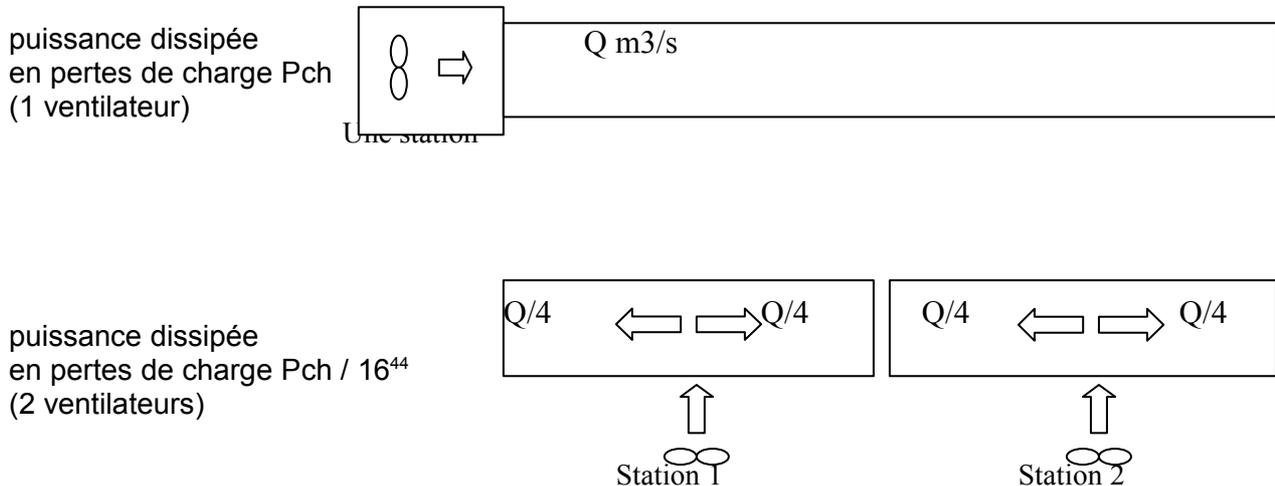
L'implantation a une incidence non négligeable sur le rendement de l'accélérateur : l'idéal est d'avoir, entre la machine et le plafond, une distance au moins égale à un demi-diamètre de la machine, même dans un tunnel à profil cadre,

---

<sup>43</sup> Voir Dossier pilote des tunnels – document Equipements – Fascicule Ventilation (paru en 2003)

### Systeme transversal

Dans ce type de ventilation, les pertes de charge linéaires varient avec le carré de la vitesse et l'inverse de la section de la gaine : pour un débit donné le nombre de ventilateurs mis en œuvre et le mode de distribution (en bout ou en té) ont une forte influence sur la puissance électrique qui sera appelée.



La prise en compte de la variation des pertes de charge avec le carré de la vitesse conduit, en système transversal, à répartir les ventilateurs sur plusieurs sites, mais il faut aussi viser à rassembler géographiquement le matériel pour faciliter les interventions de maintenance qui seront faites par l'exploitant. Entre ces deux exigences contradictoires il convient de trouver un compromis. Pour fixer les idées on peut donner les ordres de grandeur suivants : un tunnel creusé bidirectionnel, ventilé en transversal, aura une seule station de ventilation si sa longueur est de l'ordre de 1 000 mètres ; le même ouvrage avec une longueur de 2 à 3 000 m sera pourvu de deux stations de ventilation.

### Variateurs

Les variateurs permettent de démarrer les ventilateurs en douceur ce qui réduit d'une part les sollicitations mécaniques sur les machines et d'autre part les appels de courant de démarrage sur les circuits d'alimentation électrique.

Ils permettent surtout d'ajuster de manière plus fine les débits d'air en fonction des besoins alors que les solutions avec des moteurs bi-vitesses (voire des solutions jouant sur le nombre de machines en fonctionnement) n'autorisent qu'un mode de fonctionnement plus grossier. Les variateurs sont quasiment toujours utilisés pour les ventilateurs de soufflage.

Il convient toutefois de prendre toutes les précautions nécessaires vis à vis des perturbations harmoniques que ce type de matériel peut générer.

### Systeme de-commande

En règle générale, un système de ventilation est mis en place pour répondre à deux objectifs :

44

Des pertes de charge singulières, notamment en station de ventilation, pondèrent la différence portant sur les seules pertes linéaires en galerie .

assurer aux usagers en tunnel une qualité de l'air satisfaisante en termes de sécurité (présence de CO et de NOx) et de confort (opacité),  
permettre en cas d'incendie d'extraire les fumées produites par celui-ci .

La plus grande partie du temps, il ne faut satisfaire qu'au premier objectif et pour cela fournir un débit d'air suffisant dans le tunnel ; il convient de limiter le plus possible la dépense en énergie électrique, pour réduire les coûts d'exploitation, ce qui impose de fournir la quantité d'air nécessaire, ni plus ni moins<sup>45</sup>, aux instants où cela est nécessaire. Il convient donc de mettre en œuvre un système de régulation suffisamment performant pour maintenir des conditions ambiantes correctes pour les usagers en tunnel en fonction des paramètres suivants :

la toxicité de l'air : le traceur usuel est le monoxyde de carbone (CO), complété maintenant par les oxydes d'azote (NOx),  
l'opacité de l'air est le paramètre représentatif des conditions de visibilité de l'utilisateur et du confort général,  
la vitesse du courant d'air en tunnel peut représenter un danger physique pour les piétons, elle doit donc être limitée ; on retient 8 m/s (tunnel bidirectionnel) et 10 m/s (tunnel unidirectionnel).

En cas d'incendie les actions de désenfumage doivent être les plus rapides possibles avec des débits d'extraction très importants concentrés sur les zones du sinistre. Une fois que l'incendie a été détecté les commandes sont lancées par des procédures plus ou moins automatiques. Même si ensuite il est possible d'agir sur les séquences de désenfumage préétablies, il n'y a en général pas à proprement parler de régulation.

Un bon système de commande automatique de ventilation doit à la fois être rationnel et économique, en s'adaptant au mieux aux besoins. Il doit être adapté à la nature de l'ouvrage, uni ou bidirectionnel, et surtout il doit pouvoir prendre en compte, et traiter correctement, la spécificité des différents seuils de pollution : certains sont ponctuels et d'autres sont en valeur moyenne géographique.

Enfin, il importe de souligner que, quel que soit le système de contrôle-commande utilisé, aussi performant et sophistiqué soit-il, il ne pourra pas remplir sa tâche correctement si les différentes valeurs qui lui sont fournies sont erronées. L'enjeu majeur en termes d'optimisation du fonctionnement d'un système de ventilation se situe au niveau des capteurs de pollution : il est donc primordial d'une part de mettre en œuvre des capteurs de très bonne qualité (fiabilité, robustesse, résistance à l'ambiance des tunnels, etc.) et d'autre part de leur assurer une maintenance correcte (nettoyage, étalonnage, etc.).

## **Equipements de contrôle-commande et de gestion du trafic**

### **Signalisation**

Par rapport aux portions d'itinéraires à l'air libre, les tunnels se distinguent par leur faible niveau d'éclairage et leur géométrie confinée. Cependant les mêmes types de signalisation verticale qu'à l'air libre sont utilisés :

signalisation de police,  
signalisation des dispositifs de sécurité accessibles par l'utilisateur,  
signalisation directionnelle y compris les signaux d'affectation de voies (SAV),  
panneaux à messages variables (PMV).

<sup>45</sup> On rappelle que la puissance électrique consommée en kW par un ventilateur est proportionnelle au cube du débit d'air insufflé en m<sup>3</sup>/s.

En général, l'espace disponible dans l'ouvrage est suffisant pour mettre en place les signaux de police et des dispositifs de sécurité. Cela est moins vrai lorsqu'il faut mettre en place une signalisation de direction car elle est souvent plus encombrante. Il convient donc de traiter le problème dès les premières phases d'études et en prenant en compte l'ensemble de l'itinéraire sur lequel se situe le tunnel.

Tous les équipements de signalisation doivent être homologués ; pour pouvoir installer un produit non homologué il convient de déposer une demande d'expérimentation auprès de la Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière (DSCR). Les graphismes et les couleurs doivent être conformes aux dispositions du code de la route et doivent présenter une tenue dans le temps d'au moins 10 ans.

Les équipements équipés de sources lumineuses doivent être munis d'un dispositif permettant l'accès rapide aux sources et accessoires. Lorsqu'il est fermé, ce dispositif est soustrait à l'ambiance du tunnel.

Tous les équipements de signalisation alimentés en énergie électrique doivent être équipés d'un dispositif de coupure de l'alimentation implanté à proximité de l'équipement.

Il est souhaitable que l'ensemble formé par un panneau et son système d'accrochage sur le piédroit (ou au plafond) puisse être démonté sans outil. Chaque panneau doit être équipé d'un cordon flexible terminé par une fiche électrique mâle qui se connecte sur une fiche électrique femelle avec capot ; ainsi lors de la dépose d'un panneau pour une réparation en atelier le capot se rabat et protège la fiche femelle de l'ambiance du tunnel.

Les équipements de signalisation utilisés dans les tunnels sont soumis à des conditions particulières d'utilisation ; de fait les matériaux utilisés doivent présenter de très bonnes caractéristiques en termes de résistance à la corrosion et d'étanchéité (voir paragraphe 4.2.6).

#### Réseau d'appel d'urgence (RAU)

Les postes d'appel d'urgence (PAU) renferment des composants électroniques qui peuvent être sensibles à l'ambiance qui règne en tunnel. Il est donc recommandé de munir de portes les plus étanches possibles les niches dans lesquelles sont implantés des PAU ; cette recommandation est valable que les niches soient ventilées ou pas.

Un réseau d'appel d'urgence est l'objet de tests fréquents ; pour éviter que ces essais soient une charge trop lourde pour l'exploitant il convient de prévoir un dispositif de test à distance.

Le plus souvent un réseau d'appel d'urgence est réalisé avec une artère principale sur laquelle sont raccordés d'une part un poste centralisateur des appels et d'autre part les PAU ; il convient que les dérivations, situées au droit de chaque PAU dans des chambres de tirage, soient facilement accessibles (dallettes en béton, tampons en fonte, etc.).

#### Télésurveillance

Lorsqu'elle est réalisée, la couverture télévisée d'un tunnel doit être totale sur toute la longueur de l'ouvrage ; elle est souvent complétée par une ou deux caméras extérieures pour visualiser les têtes. Lorsqu'un système de détection automatique d'incident par analyse des images vidéo est mis en œuvre, une couverture totale n'est pas suffisante : il est nécessaire d'avoir des zones de chevauchement.

Les caméras intérieures sont fixées sur des supports permettant leur réglage en site et en azimut. Elles sont implantées de préférence sur les piédroits : l'accessibilité est meilleure qu'avec une implantation au-dessus de la chaussée. Elles doivent être orientées dans le sens de la circulation

sans engager le gabarit routier. Les caméras extérieures sont supportées par des dispositifs pouvant être fixés sur des mâts de type "éclairage public".

En termes de câblage, chaque caméra intérieure est équipée d'une alimentation électrique et d'une liaison pour le signal vidéo ; chaque caméra extérieure possède en plus une liaison par câble multipaires pour la commande avant/arrière du zoom et les mouvements de la tourelle.

Comme pour beaucoup d'équipements, une intervention de dépannage consiste à démonter le plus rapidement possible la caméra défailante puis à la réparer ensuite en atelier : il convient donc de pouvoir déconnecter rapidement et facilement l'ensemble des liaisons. Pour cela il est recommandé d'utiliser :

- un cordon flexible terminé par une fiche électrique mâle qui va se connecter sur une fiche électrique femelle avec capot (la fiche femelle est fixée sur le piedroit) ;
- un câble co-axial terminé par une fiche normalisée (BNC) ;
- un câble multipaires terminé par un connecteur multibroches pour les caméras extérieures.

Pour transporter le signal vidéo depuis une caméra jusqu'à la baie vidéo, il est recommandé d'utiliser deux types de liaison :

- un câble co-axial terminé par deux fiches normalisées (BNC) entre la sortie vidéo de la caméra et le coffret qui renferme l'interface optique : un câble co-axial est moins fragile qu'une fibre optique pour assurer ce type de liaison ; certes les performances d'un câble co-axial sont moins bonnes que celles d'une fibre optique mais cela n'est pas gênant dans la mesure où la longueur est assez faible (quelques dizaines de mètres) ;
- un câble à fibres optiques entre chaque coffret et la baie vidéo pour deux raisons : premièrement la distance de cette liaison peut atteindre plusieurs milliers de mètres et les performances d'une fibre optique en termes de qualité de transmission d'un signal vidéo peuvent éviter l'emploi d'amplificateurs ; deuxièmement parce qu'une fibre optique est insensible aux perturbations qui peuvent être rayonnées par les différents câbles qui circulent dans l'espace réservé au transit des liaisons.

Les caméras utilisées dans les tunnels sont soumises à des conditions particulières d'utilisation ; de fait les matériaux utilisés doivent présenter de très bonnes caractéristiques en termes de résistance à la corrosion et d'étanchéité (voir paragraphe 4.2.6). Ces prescriptions peuvent s'appliquer à la caméra elle-même ou au coffret qui la contient.

### Radio retransmission

Lorsque la décision est prise d'assurer une continuité des transmissions radio dans un ouvrage donné la fréquence utilisée par l'exploitant doit être systématiquement retenue. Ensuite le choix entre les différents services de sécurité (pompiers, police, SAMU, etc.) est à effectuer.

Il convient tout d'abord d'identifier les services qui seront réellement amenés à intervenir dans le tunnel ainsi que ceux pour lesquels la perte de liaison radio n'est pas admissible même lorsqu'ils seront simplement en transit dans l'ouvrage. Il faut veiller à retransmettre uniquement les fréquences dont l'absence aurait une incidence négative sur la sécurité.. En effet les équipements de radio retransmission ont un coût tant en investissement qu'en exploitation et il convient de ne pas équiper au-delà des exigences imposées par la sécurité à garantir à l'utilisateur.

Parallèlement au choix des services pour lesquels la continuité va être assurée, des mesures sont nécessaires pour vérifier que les services que l'on envisage de retransmettre peuvent être captés à proximité de l'ouvrage.

Très schématiquement une installation de radio-retransmission en tunnel peut être décomposée ainsi :

- un ensemble de capture qui comprend les antennes (si les signaux arrivent sous forme hertzienne). Il y a autant d'antennes que de fréquences à retransmettre. Elles sont le plus souvent disposées sur un pylône ou sur le sommet d'un bâtiment situé à proximité du tunnel ;
- un ensemble d'émission / réception vers l'extérieur qui comprend des émetteurs/récepteurs HF ou hautes fréquences (ou des interfaces BF ou basses fréquences si les signaux arrivent en liaisons cuivres) et des consoles opérateurs pour une éventuelle insertion de messages ;
- un ensemble d'émission / réception vers le tunnel qui comprend des émetteurs/récepteurs HF et un système de multicouplage ;
- un ensemble rayonnant en tunnel qui comprend des antennes ou des câbles rayonnants.

Les équipements de radio-retransmission relèvent d'un domaine très spécialisé dans lequel les marges de manœuvre offertes en termes de conception sont assez réduites. Toutefois, comme ces équipements ont un rôle très important dans la gestion quotidienne d'un tunnel et encore plus important en cas d'incendie dans l'ouvrage, il faut prendre le maximum de précautions pour que la disponibilité de l'installation soit élevée (haut niveau de qualité pour les produits mis en œuvre et maintenance bien faite) et qu'en mode d'exploitation normale le service attendu soit correctement rendu.

Il faut aussi considérer le risque d'incendie et les destructions qui peuvent alors survenir en tunnel sur les parties de l'installation exposées (câble, amplificateurs, etc.). L'architecture de l'ensemble de l'installation doit permettre de se garantir le plus possible contre une perte complète des fonctionnalités de la radio-retransmission (fixation du câble permettant d'éviter une chute sur la chaussée, tronçonnement du câble, basculement des ensembles d'émission/réception d'une tête sur l'autre, etc.). Enfin, lorsqu'un dispositif d'incrustation de messages est prévu, il convient de pouvoir assurer une diffusion spécifique pour chaque tube.

### Gestion technique centralisée (GTC)

L'architecture d'un système de GTC tunnel doit être conçue en respectant notamment les principes suivants :

- l'intelligence doit être le plus près possible des équipements ;
- la structure doit comporter plusieurs niveaux (niveau terrain pour la collecte et la mise en forme des informations, niveau automates programmables pour l'élaboration des automatismes locaux, niveau supervision) ;
- la complexité des traitements est croissante depuis le terrain jusqu'à la supervision ;
- les temps de réponses entre l'apparition d'un événement sur le terrain et sa prise en compte au niveau de la supervision doivent être extrêmement courts et les traitements statistiques effectués au niveau de la supervision ne doivent pas "ralentir" le système ;
- une redondance des équipements d'acquisition, de traitement, de transmission et de supervision doit être prévue à tous les niveaux ;
- un poste de contrôle-commande de secours est à prévoir dans un des sites techniques de l'ouvrage .

Au niveau de la supervision, outre les différentes consoles nécessaires aux opérateurs, il convient de prévoir :

- une console spécifique réservée à la gestion et à la surveillance du système de GTC;
- une (ou plusieurs) console(s) affectée(s) à la gestion des opérations de maintenance.

Les différents logiciels utilisés (automates, micros, supervision) doivent être des produits standards dont l'usage est répandu.

Les différents équipements mis en œuvre (automates programmables, micro-ordinateurs, serveurs, etc.) doivent être de fabrication standard avec le plus souvent possible une conception modulaire ou "en rack" qui permet des interventions de maintenance très rapides : on peut ainsi changer des cartes d'automates ou des sous-ensembles électroniques sous tension.

Tous les équipements du système de GTC doivent être pourvus de prises de tests facilement accessibles aux agents d'entretien.

Pour les différents réseaux qui constituent la GTC, il est recommandé d'utiliser des fibres optiques car elles permettent des débits très élevés et elles sont insensibles aux parasites.

### **Les locaux**

#### **Poste de contrôle-commande<sup>46</sup>**

Les performances actuelles des fibres optiques (faible atténuation et débit élevé) permettent de déporter le poste de contrôle-commande d'un ouvrage assez loin du site de cet ouvrage. On peut ainsi disposer dans un même lieu les moyens de surveillance (télésurveillance, RAU, GTC, etc.) de plusieurs tunnels, ce qui conduit à optimiser l'effectif affecté à la surveillance de ces ouvrages.

La centralisation des moyens de surveillance ne dispense cependant pas de prévoir des équipes d'intervention et/ou de maintenance qui soient géographiquement proches des différents ouvrages qui font l'objet d'une gestion centralisée.

Toutes les salles où sont disposés des équipements techniques, y compris la salle de contrôle-commande, doivent être équipées de faux-plancher pour permettre le passage des câbles, faciliter les interventions et les éventuelles extensions.

#### **Sites techniques**

Autant que faire se peut, l'accès à un site technique, pour des opérations d'entretien courant, doit pouvoir se faire sans gêner le trafic : les sites techniques uniquement accessibles depuis l'espace circulé du tunnel sont donc à proscrire. Lorsqu'il est impossible de faire autrement, un espace situé en dehors de la partie circulée, suffisant pour permettre le stationnement et le retournement, doit être prévu.

La surface des diverses salles doit être calculée de manière à offrir :

- de bonnes conditions de travail lors des interventions de maintenance ;
- une réserve de place pour d'éventuels équipements supplémentaires.

Toutes les salles d'un site technique doivent disposer d'une liaison phonique avec le poste de contrôle-commande et elles doivent notamment être pourvues des dispositifs suivants :

- éclairage, ventilation, chauffage,
- climatisation pour les salles qui renferment des équipements sensibles à la chaleur (composants électroniques, batterie),
- faux-plancher pour câbles (courants faibles) ou caniveaux à dalles pour les équipements plus lourds,
- peinture anti-poussière (sol, murs et plafond),

<sup>46</sup> Ce paragraphe ne traite pas de l'ensemble des salles, dépendances et ateliers qui constituent un centre d'exploitation

- détection incendie,
- contrôle d'accès.

Les sites techniques situés dans un tunnel doivent être alimentés par de l'air frais pris à l'extérieur de l'ouvrage ; ils doivent être en légère surpression par rapport à l'espace circulé du tunnel.

L'accessibilité à toutes les salles techniques doit être conçue pour permettre aux agents d'entretien d'intervenir sans difficulté avec du matériel de remplacement

### **Aspects transversaux**

#### **Protection contre la corrosion**

Tous les équipements métalliques présents en tunnel subissent l'action des polluants présents et sont donc soumis à une corrosion plus ou moins importante. Si des dégradations surviennent, elles sont pénalisantes quel que soit le matériel<sup>47</sup> : la pérennité de l'équipement considéré est réduite et les dégâts causés par la corrosion peuvent se révéler au moment précis où le matériel va être sollicité.

La protection d'un équipement peut être obtenue en choisissant un matériau dont les caractéristiques propres permettent une protection satisfaisante ou en choisissant un matériau qui demande à être protégé par un revêtement supplémentaire.

Dans tous les cas il convient de mettre en place une protection telle que l'équipement concerné puisse assurer, dans une ambiance donnée (espace circulé, locaux techniques intérieurs à l'ouvrage, gaines techniques, etc.), un fonctionnement satisfaisant pendant toute sa durée de vie sachant que :

- cette durée de vie n'a pas été établie pour des conditions de fonctionnement identiques à celles rencontrées en tunnel,
- elle diffère d'un équipement à l'autre.

Les protections les plus efficaces sont souvent les plus coûteuses. Mais tous les ouvrages n'ont pas besoin d'avoir la protection la plus efficace du marché, car ils n'appartiennent pas forcément tous à la même classe de corrosivité<sup>48</sup>. Aussi convient-il de prendre en compte le critère coût pour choisir une protection anti-corrosion. Cette démarche doit toutefois être effectuée en considérant qu'une protection coûteuse qui assurera une protection anti-corrosion pendant toute la durée de vie d'un équipement est préférable à une protection moins chère qui conduira à réduire la durée de vie d'un équipement.

De nombreux paramètres interviennent dans l'analyse technico-économique (nature de l'équipement, conception, épaisseur des composants, nombre de pièces à traiter, etc.) et il est difficile de donner des recommandations applicables dans tous les cas.

Enfin, il convient de noter que si l'espace le plus pollué est le tunnel proprement dit, certains sites qui en sont proches (locaux techniques, stations de relevage des eaux, etc.) ou qui communiquent avec lui par des gaines, ou des galeries (stations de ventilation), peuvent être l'objet d'une pollution. Les niveaux atteints sont beaucoup plus faibles que dans le tunnel, cependant les équipements disposés dans ces différents sites peuvent être corrodés : il importe donc de les protéger eux aussi contre la corrosion. Le niveau de protection choisi sera bien sûr adapté à l'ambiance et sera inférieur à ce qui aura été retenu pour le tunnel.

<sup>47</sup> Le risque créé par la corrosion vis à vis de la sécurité de l'utilisateur (chute d'un équipement ou d'une partie de celui-ci sur la chaussée) n'est pas traité dans ce paragraphe.

<sup>48</sup> La norme ISO 9223 – Corrosion des métaux et alliages – Corrosivité des atmosphères – Classification - permet de déterminer la classe de corrosivité de l'atmosphère d'un lieu donné.

### Protection contre la foudre

A priori les équipements d'un tunnel semblent être peu concernés par la protection contre la foudre ; il n'en est rien car la foudre peut tomber sur les réseaux électriques extérieurs qui alimentent les installations de l'ouvrage. De fait, tous les équipements d'alimentation et de distribution électrique doivent être protégés contre la foudre. Cela concerne tous les niveaux de l'installation : moyenne tension, basse tension et alimentation secourue. Les dispositifs électroniques (onduleur, automates programmables, micro-ordinateurs,..) doivent être équipés de protections adaptées à leurs caractéristiques spécifiques.

Il convient aussi de veiller particulièrement à la protection des équipements qui sont installés à l'extérieur du tunnel (caméra sur mât, capteurs de luminance, PMV alimentés depuis le tunnel, etc.). La foudre peut atteindre ces équipements et, en suivant les câbles qui assurent la liaison avec le tunnel, remonter jusqu'aux tableaux d'alimentation ou aux armoires de centralisation disposés dans les locaux techniques.

### Étanchéité des équipements

Pour garantir la conservation des performances des équipements installés dans un tunnel, il est recommandé de retenir les Indices de Protection (code IP au sens de la norme NF EN 60 529 Degrés de protection procurés par les enveloppes) suivants :

- IP 55 pour tout ce qui est installé dans l'espace circulé du tunnel, sauf pour les luminaires où il convient de retenir un IP 65 pour ne pas altérer les performances du miroir,
- IP 43 pour tout ce qui est installé en site technique.

### Capacité d'extension

Il convient de prévoir de la réserve dans les armoires électriques (TGBT, coffrets divisionnaires), sur les borniers et dans les différentes baies techniques (RAU, radio, télésurveillance, etc.) de l'ordre de 20% en termes de place disponible, dont 10 % de départs équipés.

## **Annexe B : Réalisation : l'exigence de qualité**

~~~~~

Cette annexe identifie simplement, de manière non-exhaustive, certains points particuliers sur lesquels il faut être vigilant durant la phase de réalisation.

Alimentation électrique

Il convient de vérifier tout particulièrement :

- l'étanchéité des armoires électriques après perçage (passage des câbles, voyants, afficheurs, etc.),
- l'étanchéité des boîtes de dérivation après mise en place des presse étoupes,
- le repérage de tous les câbles (tenant et aboutissant),
- l'étiquetage des voyants extérieurs et le marquage des composants (contacteurs et disjoncteurs) en cohérence avec les plans,
- le câblage et le repérage des borniers,
- la présence des plans de câblage dans toutes les armoires.

Eclairage

Il convient de demander des certificats sur la protection mise en œuvre sur les luminaires (type et mode de mise en œuvre de la peinture, autre moyen de protection ...) ainsi que sur les boîtes de dérivation.

Il importe aussi de vérifier :

- la qualité de fabrication des joints (joints continus et avec système de fermeture à pression répartie),
- l'étanchéité des luminaires et des boîtes de dérivation après mise en place des presse étoupes,
- l'absence de couples électrochimiques entre les luminaires et les systèmes de supportage,
- la sélectivité du fusible des appareils d'éclairage par rapport au disjoncteur de tête (pour chaque circuit).

Ventilation

Les fuites d'air qui peuvent apparaître sur les circuits de ventilation sont très pénalisantes ; il faut donc vérifier soigneusement l'étanchéité des galeries.

Concernant les ventilateurs il convient de s'assurer de l'équilibrage des masses tournantes et du filtrage des vibrations. Pour les machines qui sont alimentées avec des variateurs de vitesse avec des plages pré-déterminées, il faut vérifier que ces plages ne coïncident pas avec les fréquences de résonance des pales.

Enfin; il importe d'apporter un soin particulier à tous les dispositifs qui assurent la ventilation des issues de secours.

Equipements de contrôle-commande et de gestion du trafic

Signalisation

Aucun dispositif de signalisation verticale (police, service et directionnelle) ne doit engager le gabarit routier. Il faut s'assurer que les panneaux sont démontables sans outil ; ceux qui sont montés sur support mobile doivent être équipés d'un dispositif de rappel.

Il importe de vérifier :

- la qualité de fabrication des joints,
- l'étanchéité des panneaux après mise en place des presse étoupes,
- l'absence de couples électrochimiques entre les panneaux et les systèmes de supportage.

Réseau d'appel d'urgence (RAU)

L'étanchéité des portes des locaux, niches de sécurité ou issues de secours, dans lesquels sont implantés des Postes d'Appel d'Urgence (PAU) doit être réalisée avec soin. L'accessibilité aux parties internes du PAU doit être vérifiée.

Les boîtes de dérivation qui alimentent les PAU sont très généralement disposées sous plancher dans un espace susceptible de contenir de l'eau ; il convient donc de bien contrôler que :

- cet espace est facilement accessible (caillebotis ou dalles de béton facilement démontables);
- l'étanchéité de chaque boîte est bonne.

Télésurveillance

Aucune caméra ne doit engager le gabarit routier. En outre, il importe de vérifier :

- la solidité de la fixation de chaque caméra dans une position donnée,
- la présence d'un dispositif qui permet de repérer le positionnement de chaque caméra (site et azimut),
- la bonne réalisation des dispositifs de déconnexion (câble d'énergie et câble vidéo),
- la présence d'une plaque disposée à la verticale de chaque caméra, sur le piedroit, et permettant son identification.

Radio retransmission

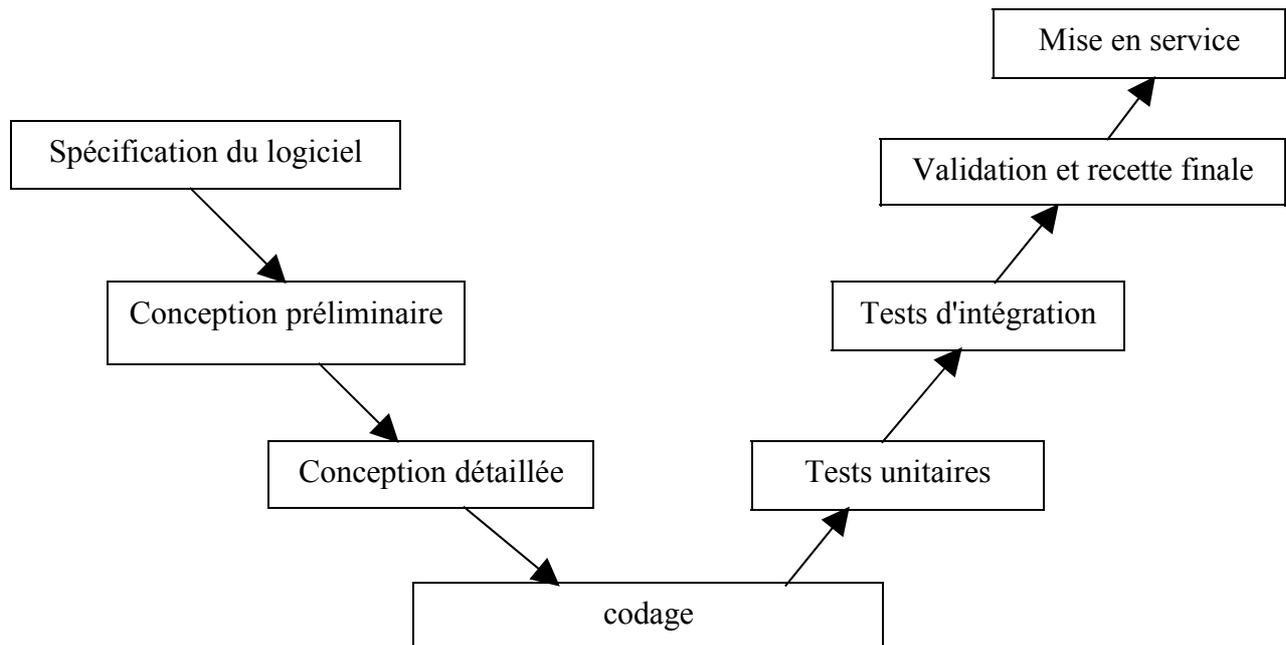
Pour chacune des fréquences retransmises le niveau de champ rayonné doit être suffisant en tout point de l'ouvrage.

Le câble rayonnant ne doit pas engager le gabarit routier et il doit être éloigné d'environ 50 cm de toutes parties métalliques (chemins de câbles, accélérateurs, etc.).

Gestion technique centralisée (GTC)

La réalisation des différents programmes doit être faite en suivant une méthode structurée avec de nombreuses lignes de commentaires ; toutes les variables utilisées (externes et internes) doivent être soigneusement identifiées.

La programmation doit suivre les différentes étapes qui constituent le cycle en "V" représenté ci-dessous.



Les borniers de regroupement des informations doivent être dans des compartiments distincts de ceux qui renferment les automates. Chaque borne doit être repérée et interruptible.

Les prises de tests doivent être disposées en face avant des armoires et clairement identifiées.

Toutes les informations issues de la GTC doivent être accessibles à l'exploitant sous un format informatique d'usage courant.

Autant que possible il est recommandé de mettre à disposition de l'exploitant les informations relatives aux rubriques suivantes (liste non-exhaustive) sous une forme appropriée (tableaux, courbes, camemberts, etc.) :

- données de trafic (TMJA, vitesse moyenne dans l'ouvrage, pointe de trafic, % de poids-lourds, etc.) ;
- utilisation des équipements par les usagers (nombre d'appels sur RAU, nombre d'utilisations des niches et issues de secours, etc.) ;
- pannes, incidents (y compris les alarmes DAI vraies ou fausses), accidents, incendies ;
- conditions de circulation (nombre de fermetures d'urgence, nombre d'heures de congestion, nombre et durée des fermetures programmées ou non, nombre de restrictions de voies, etc.) ;
- conditions offertes à l'utilisateur (nombre de luminaires en panne, lavage des piédroits et des dispositifs accessibles à l'utilisateur, qualité de la retransmission radio, etc.) ;
- service rendu à l'utilisateur (niveaux de pollution constatés) ;
- disponibilité des équipements de sécurité (tests effectués sur chaque type d'équipement, maintenance effectuée sur chaque type d'équipement, nombre de pannes par type d'équipement, etc.) ;
- temps de fonctionnement ou nombre de manœuvres des équipements ;
- consommation électrique (par point de livraison, par grande famille d'équipement) ;
- coûts (énergie, personnel, essais et actions de maintenance, sous-traitance).

Les locaux

Poste de contrôle-commande

Il importe de vérifier :

- la bonne implantation des équipements (absence de reflets parasites sur les écrans, accessibilité, etc.),
- l'absence de bruit gênant (imprimantes, climatiseur, etc.),
- l'identification et la connectique des consoles et moniteurs,
- L'implantation des câbles sous faux-plancher (repérage, fixation, cheminement).

Sites techniques

Il convient de s'assurer que :

- toutes les salles ont été revêtues d'une peinture anti-poussière,
- chaque salle est identifiée,
- le raccordement des câbles sur les armoires électriques et sur les baies techniques n'a pas dégradé l'indice de protection de ces dernières ;
- tous les trous et toutes les réservations faits pour le passage des câbles entre les différentes salles ont été obturés (plâtre, plaque de métal, etc.) ;
- l'étanchéité et le sens d'ouverture des portes sont corrects.

Issues de secours

Les issues de secours étant des éléments fondamentaux pour la sécurité tous leurs équipements doivent être contrôlés avec le plus grand soin.

Aspects transversaux

La mise en œuvre des diverses mode de protection contre la corrosion doit être contrôlée (épaisseur de galvanisation des chemins de câbles, nombre et nature des couches de peinture, etc.). Il convient aussi de s'assurer de :

- la présence de matériaux isolants pour éviter les couples électrochimiques entre les divers constituants d'un équipement,
- l'absence de toute altération survenue à la mise en place, rayures ou autres, sur les revêtements de protection,
- les conditions de remise en état des protections après perçage ou sciage.

En outre, il importe de vérifier que :

- les dispositifs de protection contre la foudre assurent bien la protection des différents équipements (moyenne tension, basse tension, dispositifs électroniques),
- l'étanchéité des équipements n'a pas été dégradée lors de leur pose,
- les armoires et baies techniques disposent bien des capacités d'extension requises.

Documentation

A l'issue des travaux un dossier de récolement doit être remis à l'exploitant. Ce dossier doit comprendre toutes les notes de calcul, tous les plans de câblage, tous les schémas de montage de l'ensemble des équipements.

L'exploitant doit aussi disposer :

- d'un cahier de conduite des installations,
- des fiches techniques et/ou dossiers d'utilisation des différents équipements,
- de la liste des opérations de maintenance à faire sur tous les équipements,
- des versions sources de tous les programmes (automatismes, supervision, etc.)

Deux points doivent être l'objet d'une attention particulière :

- les documents remis ne doivent pas être des photocopies de brochures plus commerciales que techniques,
- la documentation remise doit être à jour et faire apparaître toutes les modifications apportées durant la phase de réalisation par rapport aux solutions initialement retenues.

Présentation des installations

Les équipements installés dans un tunnel sont nombreux et très complexes, il convient donc que la phase de réalisation se termine par une formation complète du personnel d'exploitation.

Les points suivants doivent notamment être traités pour chaque famille d'équipements :

- principes de dimensionnement,
- solution retenue,
- matériel mis en œuvre,
- performances obtenues,
- modes de fonctionnement,
- entretien à assurer.