INRIA

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Un problème d'illumination inverse appliqué aux tunnels routiers

Eric Zéghers, Kadi Bouatouch

N° ????

Mars 1999

THÈME 3

Rapport de recherche

ISSN 0249-6399

Un problème d'illumination inverse appliqué aux tunnels routiers

Eric Zéghers, Kadi Bouatouch

Thème 3 — Interaction homme-machine,
images, données, connaissances
Projet SIAMES

Rapport de recherche n ???? — Mars 1999 — 38 pages

Résumé : Ce rapport décrit ume méthode de recherche des meilleures configurations dans les tunnels routiers satisfaisant à une contrainte de niveaux d'éclairements suffisants. L'objectif est d'être capable, en partant des niveaux d'éclairements requis sur la chaussée, de remonter aux caractéristiques des sources, des murs, de la chaussée les plus appropriées, ainsi que de déterminer le nombre de sources à utiliser et leurs placements dans le tunnel. Il s'agit donc conceptuellement d'un problème de simulation inverse dépendant de nombreux paramètres que nous avons traité de façon originale afin de rendre sa complexité raisonnable. L'obtention de la courbe de luminances minimales est basée sur la notion de contraste et de perception visuelle des objets tout en tenant compte des phénomènes d'éblouissements que subit un automobiliste à l'approche du tunnel (on pourra consulter la thèse [13] partie 3). Le logiciel développé permet d'obtenir la configuration de tunnel optimale par rapport à la définition d'une certaine fonction coût (par exemple de coût de revient minimal) et satisfaisant aux contraintes de niveaux requis

Mots-clé : Illumination inverse, tunnel, perception visuelle, radiosité, optimisation

(Abstract: pto)

Unité de recherche INRIA Rennes
IRISA, Campus universitaire de Beaulieu, 35042 RENNES Cedex (France)
Téléphone : 02 99 84 71 00 - International : +33 2 99 84 71 00
Télécopie : 02 99 84 71 71 - International : +33 2 99 84 71 71

Inverse Illumination Problem Applied to Tunnels

Abstract: This report addresses the problem of determining the best configurations (reflectances of walls, roadways and ceilings; kind, number and position of light sources) that fullfil requirements on the level of illuminance over the roadway within a tunnel. The targeted goal is: given required illuminance values over the entry zone of a tunnel that allow a driver to detect any obstacle on the roadway, how to illuminate the tunnel and which reflectances must have the tunnel's walls and ceiling as well as the roadway so as the resulting illuminances over the roadway be higher than the required values. This amounts to an inverse illumination problem which depends on many parameters. The required illuminance values, over the roadway at the enry zone of the tunnel, are obtained using notions of contrast and visual perception (glare, visibility level, etc.). The best configuration is obtained by minimizing a function expressing the cost of the tunnel.

Key-words: Inverse illumination, tunnel, visual perception,radiosity, optimization

1 Introduction

Les modèles globaux de simulation d'éclairage cherchent à reproduire le plus fidèlement possible la propagation des ondes lumineuses dans un environnement. L'objectif est d'élaborer, de calculer une scène virtuelle qui est conforme à ce qu'elle devrait être en réalité. Il s'agit donc de reproduire fidèlement les propriétés physiques de la matière et de la lumière. De nombreuses recherches ont portées et porteront encore dans ces domaines et des modèles performants comme la radiosité ont ainsi pu être développés même s'il reste encore beaucoup à faire.

Nous pensons que de nombreuses applications vont maintenant nécessiter l'intégration d'un humain "virtuel" dans de telles scènes simulées. Il semble en effet fort intéressant de pouvoir savoir comment un homme percevrait cet environnement, que l'on peut maintenant supposer proche d'un environnement réel (puisque physiquement valide), s'il était plongé dans celui-ci.

De telles applications concernent par exemple :

- *Le design :* Quelles seraient les sensations ressenties par un humain si la scène simulée existait vraiment? Aurait-il plutôt l'impression d'être dans une ambiance privée, calme, fortement lumineuse, génante... ?
- *Les salles de travail, l'éclairage des supermarchés...* Il est clair que l'on ne peut pas éclairer n'importe comment dans une salle de travail et qu'un éclairage trop agressif dans un magasin risque fort d'occasionner une fatigue intempestive.
- *Les tunnels routiers :* Un objectif peut être par exemple de savoir comment il faut éclairer un tunnel pour qu'un automobiliste puisse apercevoir un éventuel obstacle placé sur la chaussée suffisamment tôt pour pouvoir s'arrêter à temps. Cet objectif nécessite d'être capable de mesurer l'éblouissement occasionné au sujet et repose sur des notions de confort visuel.
- *Le codage de l'information :* Il est assez clair que, dans le domaine du codage de l'information, de nombreuses informations sont codées alors quelles ne sont pas détectées par le cerveau qui filtre de lui-même certaines informations. Celles-ci pourraient donc être négligées.

Et sans doute nombre d'autres applications! Et pourtant, il n'y a encore que peu de travaux réalisés dans cet axe de recherche car les aspects psycho-visuels, induit par l'intégration d'un humain "virtuel" sont difficilement quantifiables et dépendent en partie de chaque individu. Il existe toutefois un certain nombre de travaux dans le domaine de l'éclairagisme cherchant à analyser ces aspects. Nous pensons d'ailleurs que le couplage Éclairagisme-Synthèse d'Images devrait s'affirmer dans le futur et que de nombreux travaux devraient en résulter.

Il faut également remarquer, outre la difficulté apportée par l'aspect psycho-visuel, que la plupart de ces applications induisent de plus un problème de simulation d'éclairage inverse. Par exemple, dans l'application "design", on aimerait certainement pouvoir déterminer un environnement qui satisfait à une sensation recherchée. Dans les supermarchés, on aimerait disposer de l'éclairage qui gêne le moins (et sûrement de coût minimal). Et dans l'application tunnel, on aimerait pouvoir déterminer le tunnel le plus adéquat et satisfaisant aux niveaux requis.

Les travaux que nous avons menés sur les tunnels routiers ne sont donc qu'une application que nous pensons intéressante et qui pourrait initier quelques idées dans un domaine très vaste.

2 Précédents travaux en simulation d'éclairage inverse

Il n'y a encore à l'heure actuelle que très peu de travaux réalisés dans le domaine de la simulation d'éclairage inverse. Ceci s'explique par le fait que ces problèmes deviennent très vite extrêmement complexes et résultent en un coût prohibitif. On peut cependant citer les articles très intéressants de [10] et de [6] qui abordent le problème pour une application "design".

Nous allons maintenant situer notre problème par rapport à ces deux articles ce qui nous permettra de motiver notre approche.

Dans [10], le problème peut se formuler de la manière suivante :
Étant donné un ensemble de sources fixées a priori, déterminer les intensités lumineuses et les couleurs qui donnent une image résultat la plus proche possible de l'image cible dessinée (ou corrigée) par l'utilisateur, à l'aide d'une approche moindres carrés.
Notre problème est différent car on ne cherche pas à déterminer quelles intensités et quelles couleurs donner aux sources mais plutôt quels types de sources utiliser. Il faut en effet savoir qu'à l'heure actuelle, on ne peut pas faire varier continûment les intensités des sources dans un tunnel (contrainte matériel). Par contre, pour faire varier les niveaux d'éclairements sur la chaussée, on peut multiplier le nombre de sources (positionnées le long de 1, 2 ou 3 rampes d'éclairage) et on peut également modifier l'espacement entre les sources.
Une autre différence avec l'article [10] est que l'on ne cherche pas seulement à trouver les caractéristiques des sources mais également à déterminer le type de chaussée, le type de murs, le type de plafond à utiliser dans le tunnel ce qui multiplie le nombre de paramètres libres.

Dans l'article [6], l'objectif est cette fois de déterminer les intensités lumineuses, les réflectivités des matériaux et les sources lumineuses directionnelles en minimisant l'énergie ou bien en recherchant une ambiance particulière (privée, plaisante...). Là aussi, la finalité est "design" et l'utilisateur interagit au fur et à mesure de l'affichage d'images pour se diriger vers son objectif, vers la sensation recherchée.

Et c'est bien là, la différence essentielle avec notre problème car dans notre cas l'utilisateur n'est pas à même de diriger la recherche vers la meilleure configuration. En effet, sur quels critères pourrait-il s'appuyer puisqu'il ne s'agit pas ici de trouver une ambiance particulière mais de satisfaire à une courbe de luminances minimales à requérir tout en minimisant le coût de revient total? Nous nous retrouverions alors exactement comme cela se passe actuellement lorsque le concepteur de tunnels choisit les différents éléments du tunnel en fonction seulement de son expérience.

Dans le logiciel que nous avons développé, l'utilisateur peut par contre spécifier les différents paramètres, ce qui revient à restreindre l'espace des configurations et donc accélérer la rapidité de recherche vers la meilleure solution. Cette éventualité se présentant pour le concepteur quand on lui impose par exemple d'utiliser une chaussée de type particulier.

3 Description de la méthode mise en œuvre

Dans ce papier, nous allons aborder le problème de la simulation d'éclairage inverse, qui est dans le cas considéré très complexe de par le nombre de paramètres libres, à l'aide d' une approche descendante. À cette fin, une étude sur les réelles inconnues du problème est menée en section 6.2 aboutissant en la définition d'une configuration de recherche. Nous représentons alors l'espace des configurations possibles sous la forme d'une arborescence et nous définissons ensuite des heuristiques simples (sections 8.2 et 8.4) qui vont permettre d'élaguer au mieux ces arbres.Nous adoptons ensuite une méthode globale de recherche de type dichotomique pour exploiter au mieux ces heuristiques. Ainsi, seulement quelques simulations directes seront à réaliser pour parvenir à l'obtention de la (les) meilleure(s) configuration(s). L'algorithme décrivant la méthode utilisée est donné en section 8.6.

Il est toutefois bien connu qu'une simulation d'éclairage est toujours coûteuse en temps même dans un milieu aussi simple qu'un tunnel. Nous montrerons alors comment il est possible de tenir compte de la géométrie particulièrement simple des tunnels pour accélérer les temps de chaque simulation. Des résultats seront donnés au fur et à mesure, à partir d'un exemple particulier, pour mettre en valeur notre approche.

4 Obtention de la courbe de luminances minimales requise en zone d'entrée du tunnel et objectifs

Nous résumons brièvement dans un premier temps les principes du dimensionnement de l'éclairage en zone d'entrée de tunnel afin d'introduire et positionner le problème que l'on va aborder par la suite dans cet article. Pour une description plus détaillée, voir la thèse [13]. On pourra également consulter les recommandations de la Commission Internationnale de l'Éclairage (CIE) [5],[4], le rapport du Centre d'Études des TUnnels routiers (CETU) [3] et les articles très intéressants de Adrian [1], [2].

Pour commencer, quelques définitions et notions utiles.

- *Distance d'arrêt DA* : Distance minimale d'arrêt d'un véhicule. Elle tient compte du temps de réaction et de la distance de freinage.
- *Luminance de l'objet L_o* : Luminance de l'objet dans la direction d'observation à proximité immédiate de celui-ci pour éviter les déperditions dans l'atmosphère.
- *Luminance de fond L_f* : Luminance du fond sur lequel se détache l'objet. Dans l'étude des tunnels, le fond sur lequel se détache l'éventuel obstacle est principalement constitué de la chaussée. La luminance de la chaussée sera donc identifiée à cette luminance de fond.
- *Contraste intrinsèque C_{int}* : Le contraste d'un objet placé devant un fond est égal à $C = \frac{L_o - L_f}{L_f}$. Celui-ci est mesuré à une très faible distance de l'objet. Un objet sera d'autant plus visible que son contraste avec le fond sera important et inversement. Le contraste peut être **positif** ou **négatif**. Un objet vu en contraste positif apparaît plus clair que le fond.
- *Contraste seuil C_S* : C'est la valeur du contraste d'un objet en limite de visibilité. Ce contraste minimum dépend des conditions d'adaptations de l'œil de l'observateur et de la luminance de fond.
- *Luminance de voile équivalente L_{Seq}*: Elle est due aux multiples diffusions de la lumière dans le milieu acqueux de l'œil et traduit le phénomène d'éblouissement.

Il est possible d'approcher la valeur de luminance requise sur la chaussée au point **x** (voir figure 1) dans la zone d'entrée par la formule suivante :

$$L_f(x) = 2.4 \frac{L_{Seq}(d)}{(\frac{C_{int}}{C_S} - 1)} \text{ avec } x + d = DA \tag{1}$$

Cette formule fait apparaître les trois facteurs importants qui sont L_{Seq}, C_{int} et C_S. C_{int} est une valeur fixée a priori qui traduit le niveau de sécurité que l'on désire atteindre dans le tunnel. On impose ainsi que tout objet qui possède un contraste réel supérieur à C_{int} soit visible suffisamment tôt par le conducteur. Par ailleurs, une courbe moyenne donnant le contraste seuil C_S fixant la limite de visibilité d'un objet a été établie expéritalemment à partir de nombreuses mesures sur différents sujets. C_S est fonction des conditions extérieures de luminances dans lequel se trouve l'œil de l'observateur et dépend de l'angle de vue qui englobe l'objet. Quant à $L_{Seq}(d)$, cette luminance mesure l'éblouissement subit par l'œil à la distance **d** de la porte d'entrée du tunnel. Elle dépend des luminances présentes dans le champ visuel de l'observateur. C'est donc une notion très liée à la perception visuelle. Une méthode de calcul de $L_{Seq}(130)$, mathématiquement fondée, a été établie par Adrian [2] à

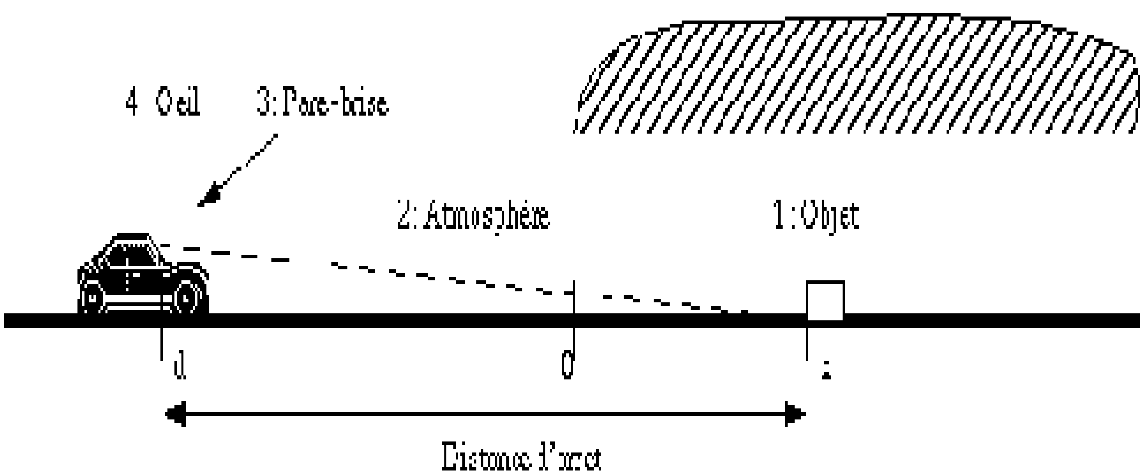

FIG. 1 – *Zone d'approche et zone d'entrée d'un tunnel*

partir de quelques mesures de luminances relevées sur le terrain. Nous avons étendu cette méthode (voir [13]) pour estimer $L_{Seq}(d)$ dans toute la zone d'approche du tunnel.

Nous avons par ailleurs étendu la notion de contraste $C = \frac{Lo-Lf}{Lf}$ à un niveau ponctuel afin de mieux rendre compte de celui-ci réellement. Cet affinement est important car il permet dans de nombreux cas de diminuer les niveaux à requérir jusqu'à 30%.

L'étude théorique menée dans [13] permet ainsi de déterminer une courbe de luminances minimales à requérir sur la chaussée dans la zone d'entrée du tunnel (voir figure 2).

Étant donné cette courbe de luminances requises, les objectifs que nous nous sommes alors fixés étaient :

1. Proposer un logiciel de simulation d'éclairage permettant d'obtenir une représentation virtuelle d'un tunnel et de son éclairage la plus proche possible de ce qu'il devrait être en réalité. Ceci est d'un intérêt crucial pour le concepteur de tunnel qui pourra ainsi visualiser le tunnel avant sa construction effective, obtenir certains renseignements très utiles comme les niveaux de luminances ou une évaluation de l'éblouissement (etc...) en certains points de la scène. Il disposera alors d'un outil permettant de détecter d'éventuels défauts et les qualités que pourraient présenter ce tunnel après construction.

2. Proposer un outil d'aide à la conception. L'objectif est de déterminer, tout en respectant les niveaux requis, les "meilleures configurations" (choix du revêtement, type de

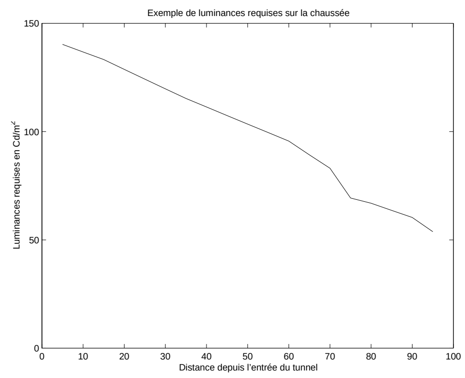

FIG. 2 – *Exemple de courbe de luminances requises sur la chaussée dans la zone d'entrée du tunnel*

sources, puissance d'émission ...) relatives au tunnel. Il s'agit évidemment là du point le plus délicat qui sera développé en détail dans cet article.

3. Proposer un outil de validation pour le concepteur de tunnel mais aussi par exemple pour les fabriquants de luminaires qui pourront ainsi évaluer les performances de leur luminaire vis à vis de la concurrence. Le logiciel pourra alors, s'il s'avère fiable, être un argument de poids dans différentes négociations de vente.

5 Logiciel de simulation d'éclairage et outil de validation

5.1 Le logiciel de simulation d'éclairage à la base de notre étude

Afin de pouvoir satisfaire à l'objectif premier, il est indispensable de disposer d'un logiciel qui simule correctement la propagation de la lumière. Rappelons que l'objectif n'est pas d'obtenir de "belles images" plus ou moins réalistes mais de simuler le plus fidèlement possible le modèle physique de la lumière. Cette condition apparaît tout à fait *sine qua non*, si l'on veut pouvoir interpréter des résultats qu'ils soient visuels ou numériques. Le logiciel utilisé est un logiciel de simulation d'éclairage développé à l'IRISA[1] de Rennes, basé sur le modèle de radiosité que nous avons étendu pour tenir compte de l'aspect directionnel des sources lumineuses et également pour disposer d'une bonne représentation spectrale de celles-ci.

1. Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires

5.2 Outil de validation

Nous désirons également que cet outil soit très simple d'utilisation. La mise à jour et l'incorporation de nouvelles données doit être à la portée de toute personne ayant-droit sur le logiciel. Toute information utile à l'utilisateur ainsi que tous les résultats obtenus doivent apparaître clairement via le logiciel. Ces conditions sont nécessaires si l'on désire que le logiciel ait quelque vocation commerciale et soit de plus un outil de poids pour la validation de différents choix. C'est pourquoi, nous avons consacré une partie assez importante à l'interface graphique de ce logiciel.

6 Étude de l'outil d'aide à la conception

6.1 Problème de simulation inverse

Le problème général dans lequel on cherche à déterminer l'environnement global du tunnel (sources utilisées, chaussée ...) à partir des niveaux de luminances connus sur la chaussée peut être vu comme un problème de simulation inverse. Toutefois pris dans sa globalité, en essayant d'instancier au fur et à mesure chaque paramètre, ce problème s'avère extrêmement complexe. Il faut par exemple savoir que très souvent plus d'une centaine de luminaires sont utilisés en zone d'entrée. Déterminer le positionnement et la puissance d'émission à associer à chaque source est un problème très difficile et semble même tout à fait déraisonnable à considérer sous cette forme.
Nous avons donc opté pour une recherche des meilleures configurations en réduisant au mieux l'espace des solutions au cours de l'exécution à l'aide de certaines heuristiques que nous allons définir en section 8.2.

Nous allons maintenant nous intéresser au problème plus spécifiquement et chercher à exiber les réelles inconnues pour le concepteur de tunnel ainsi que leurs domaines de valeurs.

6.2 Variables et données ayant une influence significative sur les luminances de chaussée

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer les paramètres spécifiables et les variables réellement inconnues pour le concepteur qui, dans un tunnel, ont une influence non négligeable sur les luminances de chaussée. On cherche ainsi à extraire les différents paramètres d'influence, à catégoriser les variables et les données liées à notre problème.

Il est par ailleurs intéressant de remarquer si ces variables sont discrètes ou continues ne serait-ce que pour savoir quelle technique d'optimisation adopter lors de la recherche des meilleures configurations.

- **Type et géométrie du tunnel**
  Il est clair que la forme du tunnel et les dimensions des surfaces le constituant ont une influence sur les luminances de la chaussée (par exemple, un plafond très haut aura moins d'influence sur la chaussée qu'un plafond bas). Il est important de noter que ces paramètres sont connus d'avance par le concepteur, il s'agit donc en fait de données. Ainsi, dans le logiciel développé, l'utilisateur choisit initialement une forme générale de tunnel et spécifie les dimensions réelles de celui-ci (ceci peut également se faire via un fichier de données décrivant le tunnel).

- **Chaussée, Murs, Plafond**
  Puisque les dimensions de ces surfaces sont connues. Les variables que nous appellerons **Chaussée, Murs, Plafond** (en abrégé **C, M, P**) sont caractérisées par leur spectre de réflectance associé.
  Nous rappelons en effet que les réflecteurs sont supposés **lambertiens**. Cette hypothèse peut sembler un peu forte et restrictive, et qu'il serait certainement intéressant de considérer les propriétés spéculaires de la chaussée puis d'estimer plus précisément la luminance réfléchie vers l'observateur. Toutefois, le caractère spéculaire de la chaussée évolue fortement avec le temps et est très difficile à contrôler rendant ainsi les résultats obtenus par simulation peu fiables. Il faut en effet savoir que, dans les tunnels, les surfaces se salissent très vite et la chaussée évolue alors rapidement vers une chaussée à réflection plutôt lambertienne. Il apparaît dès lors raisonnable de considérer celles-ci comme diffuses; les résultats s'avérant alors valides après un court laps de temps.

  Il faut également préciser qu'il n'existe que quelques types de **Chaussée, Murs, Plafond** utilisés dans les tunnels. Pour les chaussées, la CIE en a par exemple recensé 4 types principaux. Il faut toutefois savoir qu'il est possible de rajouter à ceux-ci des constituants les rendant plus ou moins clairs ce qui élargit la gamme de choix possibles. On peut cependant toujours en exiber quelques classes.

- **Source (et luminaire associé)**
  Une source (et son luminaire associé) est un objet très complexe. Il faut de nombreux paramètres qui ont une influence notable sur la chaussée pour la caractériser. Nous énumérons et discutons de ceux-ci.

  1. **Solide photométrique, distribution spectrale énergétique, puissance d'émission.**
     Les types de sources utilisées dans les tunnels sont en nombre restreint. Il s'agit donc d'une variable discrète. À un type de source donnée est associé sa puissance d'émission, son solide photométrique (c.à.d comment cette source émet en intensité dans les différentes directions de l'espace) et sa DSE (Distribution Spectrale

d'Energie). Il est d'ailleurs essentiel de disposer d'une bonne représentation spectrale pour simuler correctement les sources dans un tunnel. Ces sources ont parfois des DSE complètement discontinues comme par exemple les sources Sodium Basse Pression qui sont très utilisées dans les tunnels. Il ne serait alors être question de représenter ces sources avec une approche RVB qui raterait complètement leur émission spectrale. On pourra consulter [14] pour une selection appropriée des longueurs d'onde représentatives. Par ailleurs, la puissance d'émission de chaque type de source est fixe (il n'y a pas possibilité de faire varier continûment la puissance associée à une source dans un tunnel).

2. **Géométrie du luminaire**
   La géométrie du luminaire (longueur, largeur) est fixée a priori par le constructeur. C'est donc une donnée.

3. **Positionnement, Inclinaison**
   Dans les tunnels, il est possible de placer en différents endroits les sources. Elles sont soit au centre, soit sur les cotés du plafond (éventuellement sur les pieds-droits). Notons ce paramètre **Positionnement**.
   Le concepteur connait en général à l'avance ce positionnement, car souvent, à ce stade de l'étude, le tunnel est déjà construit ou sur plans et par suite difficilement modifiable. Ainsi, le tunnel peut alors ne pas disposer de suffisament de hauteur pour une installation au centre du plafond ou bien pour des raisons d'entretien il a été préalablement décidé d'installer les rampes sur les pieds-droits ou ... Nous considérerons donc encore ce paramètre comme une donnée fixée par l'utilisateur, quitte dans les cas particuliers où il y a plusieurs possibilités à relancer la simulation en modifiant ce paramètre et à comparer les résultats obtenus.
   L' **Inclinaison** est la façon dont est orientée le luminaire par rapport à la chaussée. Ce paramètre est également en général une donnée pour le concepteur de luminaire du fait de contraintes physiques liées à l'installation des luminaires dans les rampes.

4. **Espacement entre les sources**
   Les luminaires sont positionnés en ligne le long du tunnel. Nous définissons par la variable **Espacement**, l'espacement entre les centres des sources.
   Très souvent, comme dans le cas particulier du paramètre **inclinaison**, l'**Espacement** est imposé par les matériels (rampes) auquels sont fixés les luminaires. Nous considérerons donc ce paramètre comme connu quitte là aussi à faire varier cet **Espacement** en prenant quelques valeurs lorsque cela est possible.

   Il est clair qu'en rapprochant les sources entre elles, on augmente les niveaux de luminances sur la chaussée. La possibilité de faire varier cet **Espacement** le long des rampes serait donc très intéressante pour faire coïncider au plus près la courbe théorique de niveaux requis avec celle obtenue par simulation.

5. **Répartition**
   Dans les tunnels, les luminaires sont placés le long de rampes dont le nombre varie de 1 à 3. C'est par la multiplication du nombre de rampes que l'on fait varier les puissances d'émissions (on rappelle que l'espacement entre les sources est constant et que la puissance d'émission d'une source prise individuellement reste fixe).
   La variable **Répartition** sera définie comme étant le nombre de rampes utilisés sur les différentes parties associées du tunnel. On la représentera par un tableau ayant la forme suivante (ou condensée sans les entêtes dans les différentes figures qui suivront(à droite)) :

Distance depuis l'entrée	**Nombre de rampes**
0 à 30	3
30 à 85	2
85 à 120	1

ou bien

30	3
85	2
120	1

TAB. 1 – *Variable répartition*

6.3 Définition et univers des configurations

L'objet de ce paragraphe est de définir ce que nous appellerons par la suite une configuration.

Puisque le concepteur possède déja quelques connaissances sur le tunnel en cours d'étude, celles-ci seront spécifiées par l'utilisateur dans une phase d'initialisation. D'autre part, nous exploitons certaines contraintes liées aux matériels permettant de restreindre l'espace des variables.

De sorte que, notre problème se réduit à (voir paragraphe 6.2) :

- Déterminer **la chaussée, les murs, le plafond** à utiliser.
- Déterminer **le type de source** à utiliser.
- Déterminer **la répartition** (nombre de rampes et portions du tunnel associées).

Définition 1 *Soit $X \in \{C, M, P\}$. Nous définissons par ρ_X, la valeur moyenne de la fonction de réflectance dans le domaine du visible de la surface X :*

$$\rho_X = \frac{1}{400} \int_{380}^{780} S_X(\lambda)\ d\lambda \qquad (2)$$

avec $S_X(\lambda)$ le spectre de réflectance de la surface X.

Cette quantité traduit les propriétés moyennes en réflection de la lumière incidente pour la surface considérée dans le domaine du visible.

Définition 2 *Nous appellerons* **configuration** *un quadruplet $(S, \rho_C, \rho_M, \rho_P)$ où :*

$$\begin{cases} S \textit{ est le type de source considéré.} \\ \rho_C \textit{ est la réflectance moyenne de la chaussée.} \\ \rho_M \textit{ est la réflectance moyenne des murs.} \\ \rho_P \textit{ est la réflectance moyenne du plafond.} \end{cases}$$

L'**univers des configurations** est l'ensemble de toutes les configurations possibles. Cet ensemble est fini puisque toutes les variables d'une configuration sont à valeurs **dicrètes** et en nombre fini.

La simulation d'une configuration nous permettra d'instancier la variable **répartition**. La connaissance de cette variable et de l'espacement entre les sources permet alors de déterminer simplement le nombre total de luminaires utilisés dans les différentes portions de la zone d'entrée du tunnel.

7 La fonction coût

C'est par la minimisation de cette fonction que s'établira le classement des "meilleures configurations". Celle-ci peut être basée sur un simple calcul du prix de revient du tunnel comme pour l'exemple qui suit, ou de rentabilité au bout d'un certain laps de temps.

$$cout\,(S, \rho_C, \rho_M, \rho_P) = nbsources * P_S + P_{\rho_C} + 2 * P_{\rho_M} + P_{\rho_P}$$

$$\text{avec} \begin{cases} nbsources & : \text{ le nombre de sources pour la configuration} \\ P_S & : \text{ le prix de revient d'une source} \\ P_{\rho_C} & : \text{ le prix de revient de la chaussée.} \\ P_{\rho_M} & : \text{ le prix de revient d'un mur.} \\ P_{\rho_P} & : \text{ le prix de revient du plafond.} \end{cases}$$

Mais, elle peut aussi être plus complexe. Il est par exemple possible d'évaluer certaines grandeurs telles que l'éblouissement, le rendu des couleurs, etc. que perçoit le conducteur et d'affecter à ces grandeurs une fonction poids pénalisante ou valorisante puis de les inclure dans l'évaluation de la fonction coût modulant ainsi l'estimation du coût recherché. Minimiser la fonction coût ainsi définie permet alors de déterminer les meilleures configurations relativement à un objectif bien précis. On mesure alors tout l'intérêt d'avoir une idée assez précise sur les caractéristiques que l'on juge importantes du tunnel en cours d'étude.

8 Recherche de la meilleure configuration

L'objectif est de déterminer la configuration de coût minimal.

Afin de fixer les idées, nous allons désormais considérer un exemple particulier. Soit les variables suivantes et leur domaine de valeurs (voir tableau 2) (les valeurs données sont purement fictives et ne sont là qu'à titre indicatif). Les prix des surfaces Chaussée, Murs et Plafond (P_{C_j}, P_{M_k}, P_{P_l}) sont donnés au m^2. Le prix de revient d'une source (P_{S_i}) est donné à l'unité. Nous utilisons 5 types de sources, 7 types de chaussées, 6 types de murs et 6 types de plafond; soit un univers total de 1260 configurations possibles. Nous pensons d'ailleurs que dans la pratique, le cardinal de l'univers total des configurations sera rarement supérieur à celui de l'exemple.

Variables									**Total**
Source		S1	S2	S3	S4	S5			$nb_S = 5$
	P_{S_i}	8000	7000	6500	6000	5500			
Chaussée		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	$nb_C = 7$
	ρ_{C_j}	0.75	0.535	0.412	0.262	0.155	0.15	0.149	
	P_{C_j}	750	535	412	262	155	200	149	
Murs		M1	M2	M3	M4	M5	M6		$nb_M = 6$
	ρ_{M_k}	0.912	0.8	0.535	0.412	0.277	0.149		
	P_{M_k}	912	800	535	412	280	149		
Plafond		P1	P2	P3	P4	P5	P6		$nb_P = 6$
	ρ_{P_l}	0.912	0.8	0.75	0.412	0.32	0.28		
	P_{P_l}	912	800	750	412	510	280		

TAB. 2 – *Exemple initial*

Pour une recherche globale de la meilleure configuration, nous considérons les types de source l'un après l'autre, c'est à dire que nous fixons le type de source utilisé. Nous recherchons ensuite la meilleure configuration (choix de ρ_{C_j}, ρ_{M_k}, ρ_{P_l}) minimisant la fonction coût prédéfinie pour S_i fixé. L'univers des configurations peut alors être vu comme une forêt d'arbres à 3 niveaux (voir figure 3) pour chaque S_i. Les noeuds représentent les réflectances moyennes des surfaces. Une configuration étant ensuite représentée par un chemin de l'arbre. Les réflectances moyennes sont triées (par ordre décroissant) de sorte que les arbres apparaissent comme sur l'exemple.

Il est important de remarquer que la chaussée, les murs, le plafond ont une influence sur les niveaux de luminance de la chaussée qui n'est pas du même ordre. En effet, pour la chaussée l'influence principale est en réflexion directe, pour les murs après une réflexion

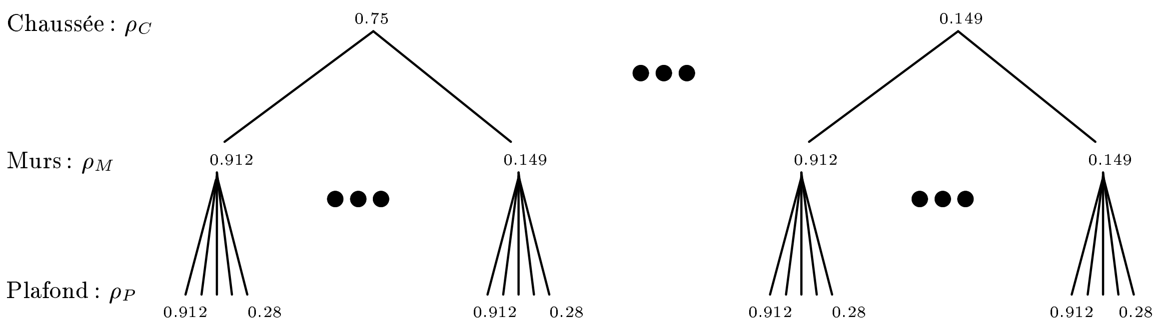

FIG. 3 – *Représentation de l'univers des configurations pour une source fixée*

et après deux réflexions pour le plafond. Nous dirons que globalement la chaussée a plus d'influence que les murs et qu'eux mêmes ont plus d'influence que le plafond (voir figure 4).

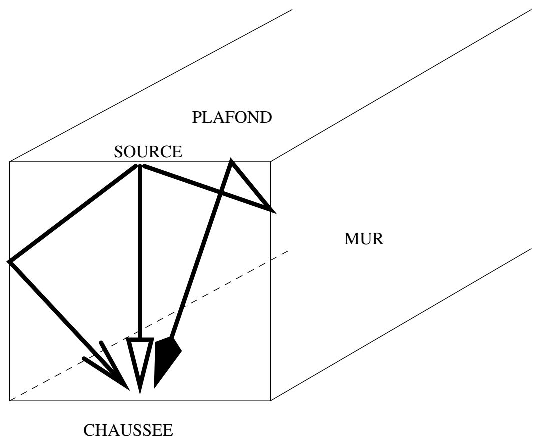

FIG. 4 – *Influence de la chaussée, des murs, du plafond sur les niveaux de luminance de la chaussée*

Cette remarque permet d'expliquer la disposition que nous avons adoptée des arbres en trois niveaux avec la chaussée au premier niveau, ensuite les murs et au dernier niveau le plafond. Les **répartitions** obtenues au niveau des feuilles seront alors plus homogènes et par suite les heuristiques proposées d'élagage des arbres seront plus efficaces lors de la recherche de la meilleure configuration qu'en utilisant une autre disposition.

8.1 Réduction a priori de l'univers des configurations

La proposition qui suit, quasi-évidente, est très importante car elle va nous permettre d'exploiter une relation d'ordre partiel sur l'influence des réflectances moyennes des surfaces sur la variable **repartition** (et par suite sur la fonction coût). Nous mettrons en évidence cette relation d'ordre partiel en section 8.2 lors de la définition des heuristiques.

Proposition 1 *Soit* $X \in \{C, M, P\}$, $(i, j) \in \{1, ..., nb_X\}^2$
Si $\rho_{X_i} < \rho_{X_j}$ *et* $P_{X_i} > P_{X_j}$ *alors* X_i *peut être otée de l'espace des variables.*

Cette proposition traduit simplement le fait qu'un matériau (Chaussée ou Murs ou Plafond) réfléchissant moins bien la lumière et coûtant plus cher qu'un autre du même type produira des niveaux de luminance sur la chaussée moins importants pour un coût supérieur. Celui-ci ne peut donc appartenir à la meilleure configuration. Dès lors, tout matériau (appartenant à notre espace de variables) qui réfléchit mieux la lumière qu'un autre coûtera plus cher, ce qui semble assez logique.

La proposition se traduit sur l'exemple précédent par la réduction suivante (table 3). L'univers des configurations a désormais pour cardinal 900.

Variables								**Total**
Source		S1	S2	S3	S4	S5		$nb_S = 5$
	P_{S_i}	8000	7000	6500	6000	5500		
Chaussée		C1	C2	C3	C4	C5	C6	$nb_C = 6$
	ρ_{C_j}	0.75	0.535	0.412	0.262	0.155	0.149	
	P_{C_j}	750	535	412	262	155	149	
Murs		M1	M2	M3	M4	M5	M6	$nb_M = 6$
	ρ_{M_k}	0.912	0.8	0.535	0.412	0.277	0.149	
	P_{M_k}	912	800	535	412	280	149	
Plafond		P1	P2	P3	P4	P5		$nb_P = 5$
	ρ_{P_l}	0.912	0.8	0.75	0.412	0.28		
	P_{P_l}	912	800	750	412	280		

TAB. 3 – *Exemple après réduction*

8.2 Heuristiques d'élagage

Nous proposons ici quelques heuristiques qui découlent de la relation d'ordre partiel induite et qui vont nous permettre d'élaguer au mieux les arbres de configurations au cours de la recherche de la solution de coût minimal.

Notons $S = \{S_1, ..., S_{nb_S}\}$, $\rho_C = \{\rho_{C_1}, ..., \rho_{C_{nb_C}}\}$, $\rho_M = \{\rho_{M_1}, ..., \rho_{M_{nb_M}}\}$,$\rho_P = \{\rho_{P_1}, ..., \rho_{P_{nb_P}}\}$. Nous utiliserons respectivement les indices i, j, k, l pour décrire ces ensembles.

8.2.1 Elagage par non réalisation

Pour commencer, une définition :
Nous rappelons que la figure 2 est un exemple de courbe minimale de niveaux requis.

Définition 3 *Nous dirons qu'une configuration* $\left(S_i, \rho_{C_j}, \rho_{M_k}, \rho_{P_l}\right)$ *est* **irréalisable** *lorsqu'elle ne permet pas de satisfaire la courbe minimale de niveaux requis. (C'est à dire que 3 rampes d'éclairage ne sont pas suffisantes pour que les niveaux obtenus soient toujours plus importants que les niveaux requis).*

Bien entendu, pour dire qu'une configuration est irréalisable, il faut faire une simulation d'éclairage direct ou tout au moins, comme nous le verrons dans la section 9 et plus particulièrement en 9.5, une simulation sur une petite zone du tunnel et en ne considérant qu'une unique source.

Les propositions qui suivent sont évidentes mais néanmoins très importantes. En effet, il est logique qu'une configuration dont les surfaces réfléchissent moins bien la lumière que les surfaces d'une autre configuration qui est irréalisable soit elle-même irréalisable.

Proposition 2 *Soit* $S_i \in \{S_1, ..., S_{nb_S}\}$ *fixé.*
$j \in \{1, ..., nb_C\}$, $k \in \{1, ..., nb_M\}$, $l \in \{1, ..., nb_P\}$
Si la configuration $\left(S_i, \rho_{C_j}, \rho_{M_1} = \max_k(\rho_{M_k}), \rho_{P_1} = \max_l(\rho_{P_l})\right)$ *est* **irréalisable** *alors* $\forall \rho_{C_{j'}} \in \rho_C$ *tel que* $(\rho_{C_{j'}} \leq \rho_{C_j})$ *et* $\forall (k,l)$ *la configuration* $\left(S_i, \rho_{C_{j'}}, \rho_{M_k}, \rho_{P_l}\right)$ *est* **irréalisable**.

Proposition 3 *Soit* $S_i \in \{S_1, ..., S_{nb_S}\}$ *fixé.*
$j \in \{1, ..., nb_C\}$, $k \in \{1, ..., nb_M\}$, $l \in \{1, ..., nb_P\}$
Si la configuration $\left(S_i, \rho_{C_j}, \rho_{M_k}, \rho_{P_1} = \max_l(\rho_{P_l})\right)$ *est* **irréalisable** *alors*
$\forall (\rho_{C_{j'}}, \rho_{M_{k'}}) \in \rho_C \times \rho_M$ *tels que* $(\rho_{C_{j'}} \leq \rho_{C_j}$ *et* $\rho_{M_{k'}} \leq \rho_{M_k})$ *et* $\forall l$ *la configuration* $\left(S_i, \rho_{C_{j'}}, \rho_{M_{k'}}, \rho_{P_l})\right)$ *est* **irréalisable**.

Les propositions 2 et 3 permettent d'élaguer considérablement les arbres de recherche dès que les niveaux à requérir sur la chaussée se révèlent assez difficiles à réaliser. Ces heuristiques peuvent alors s'avérer très efficaces.

8.2.2 Elagage par prédiction du coût

Pour bien comprendre la notion de relation d'ordre partiel que nous avons sur nos arbres, considérons le nombre de sources d'une variable répartition induite par une configuration

donnée (voir table 1 pour la définition d'une variable répartition). Soit N ce nombre. Il est clair que si nous améliorons les qualités en réflexion d'un **unique** paramètre de la configuration (par exemple le plafond), le nombre de sources requis pour cette nouvelle configuration sera $\leq$ à N.
Par contre, si nous améliorons la qualité des murs et diminuons la qualité du plafond, on ne peut pas conclure quant au nombre de sources à utiliser (d'où la notion d'ordre partiel).

Définissons maintenant plus précisément la relation d'ordre.

Définition 4 *Nous dirons qu'une répartition associée à une configuration* $\left(S_i, \rho_{C_j}, \rho_{M_k}, \rho_{P_l}\right)$ *(ou à un chemin numéroté sur les figures) est* $\leq$ *à une autre répartition si le nombre de sources à utiliser dans la première configuration est* $\leq$ *au nombre de sources à utiliser dans la seconde configuration.*

Nous écrirons souvent en abrégé repartu $\leq$ *repartv pour dire que la répartition associée au chemin numéroté u sur la figure référencée est* $\leq$ *à la répartition associée au chemin numéroté v. On utilisera également cette notation dans les algorithmes qui suivront.*

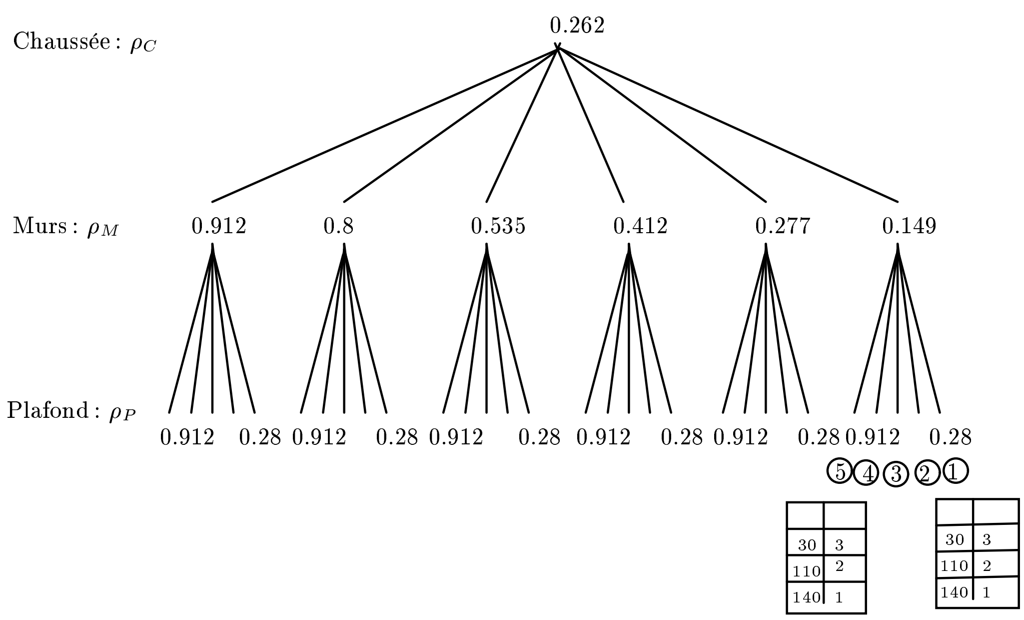

FIG. 5 – *Elagage par prédiction du coût*

La figure 5 est un exemple d'un arbre pour lequel les configurations notées 1 et 5 induisent une même répartition. **Seul** ρ_{P_l} **varie en croissant du chemin 1 au chemin 5** donc nous pouvons dire que :

$$repart5 \leq repart4 \leq repart3 \leq repart2 \leq repart1$$

et puisque $repart5 = repart1$, les chemins 2,3,4 présentent également une même répartition.

De plus, puisque nous avons les mêmes répartitions et que :

$$\rho_{P_1}(\in chemin5) > \rho_{P_2} > \rho_{P_3} > \rho_{P_4} > \rho_{P_5}(\in chemin1)$$

nous pouvons dire sans avoir fait de simulation d'éclairage sur les chemins 2,3 et 4 que :

$$cout(5) > cout(4) > cout(3) > cout(2) > cout(1)$$

Plus généralement, on peut considérer l'exemple de la figure 6 dans lequel les configurations 1 et 2 ont même répartition.

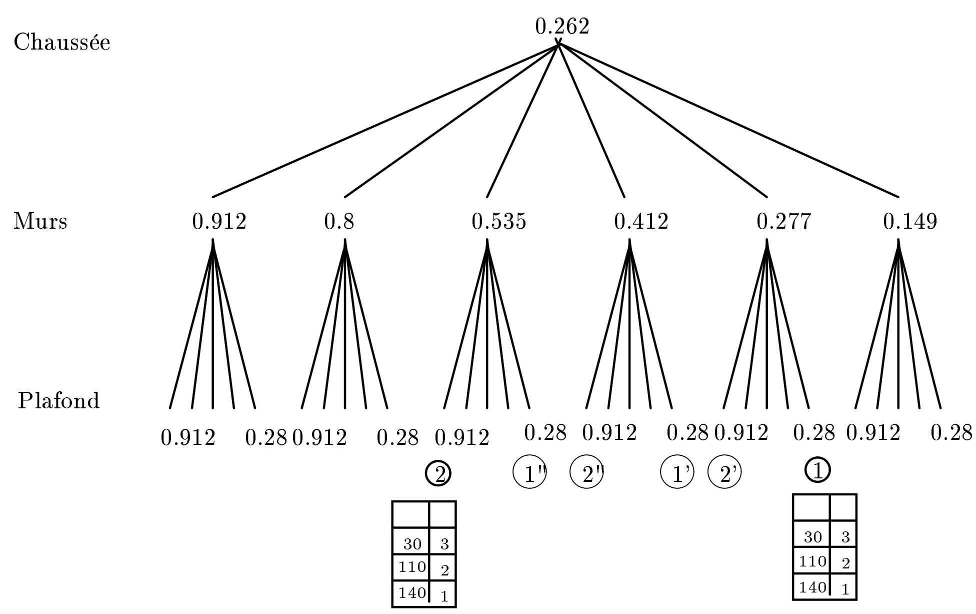

FIG. 6 – *Elagage par prédiction du coût : un cas plus général*

Nous pouvons dire que :

$$repart1 \geq repart2' \geq repart2'' \geq repart2$$

car entre 1 et $2'$ seul ρ_{P_k} croît et entre $2'$, $2''$,2 seul ρ_{M_j} croît donc on a :

$$repart1 = repart2' = repart2'' = repart2$$

Nous avons de même:

$$repart1 \geq repart1' \geq repart1'' \geq repart2$$

et donc :

$$repart1 = repart1' = repart1'' = repart2$$

Il s'ensuit que toutes les configurations intermédiaires ont également la même répartition et sont de coûts supérieurs à la configuration 1. Ainsi, lorsqu'on exibe de tels chemins (un avec un ρ_{P_l} maximal (ie ρ_{P_1}) et l'autre avec un ρ_{P_l} minimal (ie $\rho_{P_{nb_P}}$) produisant les mêmes répartitions alors les chemins intermédiaires de l'arbre ne seront pas à considérer lors de la recherche de la solution de coût minimal.

8.2.3 Contre-exemple à une éventuelle généralisation

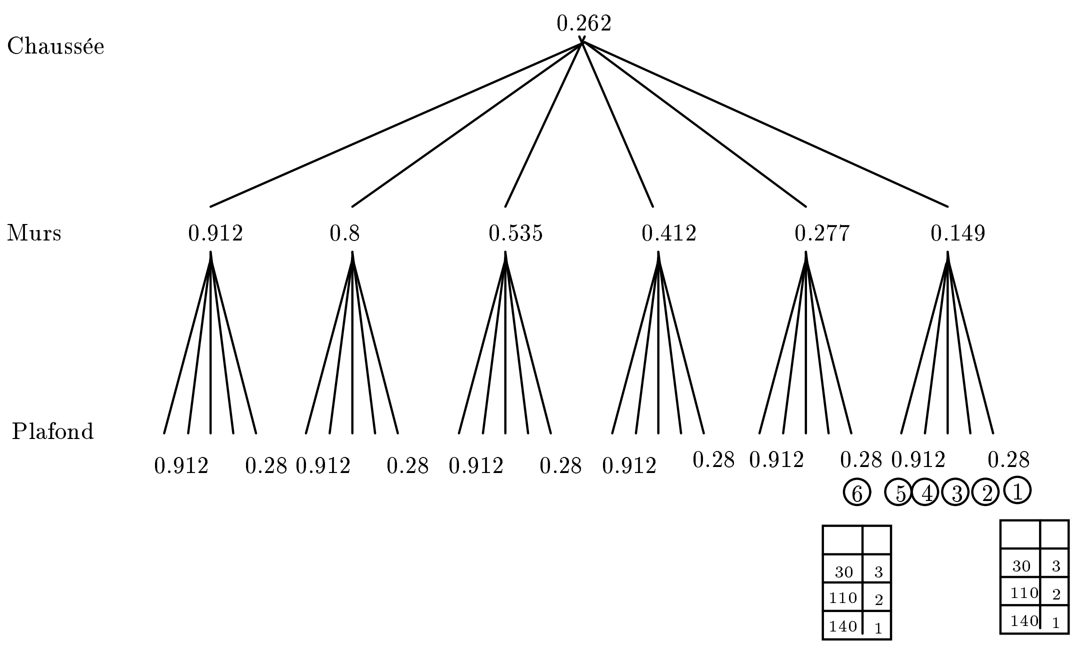

FIG. 7 – *Contre exemple à une éventuelle généralisation. Mise en valeur de la relation d'ordre non totale*

Il est important de noter que la relation d'ordre induite est seulement partielle et non totale. Dans l'exemple suivant (figure 7), les configurations 1 et 6 présentent la même répartition mais ceci ne permet pas de conclure quant aux configurations 2, 3, 4 et 5. En effet, nous pouvons dire d'une part que :

$$repart1 \geq repart2 \geq repart3 \geq repart4 \geq repart5$$

et d'autre part que

$$repart1 = repart6$$

mais ceci ne permet pas de conclure quant au nombre de sources qu'il faut utiliser pour les répartitions 2,3,4,5. On peut seulement déduire que $cout(6) > cout(1)$ ce qui est de peu d'intérêt car pour obtenir la répartition de la configuration 6, il a fallu faire toute la simulation. On ne bénéficie alors à ce stade que du gain de la non-évaluation d'une fonction coût.

8.3 Recherche globale de type dichotomique

Rappelons que pour chaque surface, la valeur moyenne de la fonction de réflectance associée a été préalablement calculée (voir équation 2). Ces réflectances moyennes ont été ensuite triées par ordre décroissant (voir figure 3).

Soit $\rho_{C_{milieu}}$ la réflectance moyenne de la chaussée associée à l'indice $milieu = E[\frac{nb_C+1}{2}]$ où $E[]$ désigne la partie entière.

Afin d'exploiter au mieux les différentes heuristiques proposées, il est naturel d'utiliser une approche globale de recherche de la meilleure configuration de type dichotomique. Ainsi, en considérant en premier lieu la configuration définie par

$$\left(S_i, \rho_{C_{milieu}}, \rho_{M_1} = \max_k(\rho_{M_k}), \rho_{P_1} = \max_l(\rho_{P_l})\right)$$

la proposition 2 permet par exemple lorsque cette configuration est irréalisable de diviser immédiatement par un facteur 2 le cardinal de l'univers des configurations (i.e. on élimine tous les $\rho_C < \rho_{C_{milieu}}$), soit un gain de temps fort appréciable en définitif. L'approche par dichotomie n'est appliquée qu'au paramètre ρ_C. Nous tirons également profit de la propriété 3 qui élague seulement une partie des arbres dès que les hypothèses de celle-ci sont vérifiées. Dans les cas où on ne peut élaguer directement les arbres par non-réalisation, on cherche alors à exiber des chemins dans les arbres satisfaisants les hypothèses de l'élagage par prédiction du coût (section 8.2.2).

8.4 Accélération des recherches par interprétation des résultats déjà obtenus

L'objectif est d'essayer de diriger les recherches en fonction des résultats que l'on a obtenus précédemment. En effet, il est clair que, plus vite on se positionnera à proximité de la solution optimale, plus l'élagage des arbres de configurations sera rapide et efficace. Ceci est dû au fait que la contrainte de coût minimal est alors plus forte et nombre de configurations ne pouvant améliorer ce coût n'auront pas alors à être considérées. Mathématiquement, cela revient à se placer rapidement auprès du minimum global de la fonction et d'éviter ainsi des calculs de recherche près des minima locaux.

8.4.1 - Vers des contraintes plus fortes

Si on considère les configurations $(S_i, \rho_{C_{milieu}}, \rho_{M_1}, \rho_{P_1})$ et $\left(S_i, \rho_{C_{milieu}}, \rho_{M_{nb_M}}, \rho_{P_{nb_P}}\right)$ et qu'elles sont réalisables et de répartitions différentes (sinon on applique 8.2.2), il est plus judicieux de continuer les recherches en choisissant un autre $\rho_{C_j} < \rho_{C_{milieu}}$ (tout en stockant les résultats obtenus pour une utilisation ultérieur) . Nous avons choisi de travailler encore par dichotomie et le ρ_{C_j} choisi est donc tel que $j = E[\frac{milieu+nb_C}{2}]$.
On peut espérer ainsi obtenir rapidement une contrainte sur le coût qui est une contrainte forte comme précisé précédemment. Il est en effet plus probable que la configuration de coût minimal (globalement) soit plutôt réalisée avec un tel choix de ρ_{C_j}. Ceci est lié au caractère assez homogène des **répartitions** obtenues (voir paragraphe 8) qui ont alors tendance à varier assez peu dans un même arbre (car ρ_P est moins influent que ρ_M qui est moins influent que ρ_C, donc la variation de ρ_P a peu d'influence) . Si ce n'est pas le cas, on peut également espérer réduire rapidement une partie de l'univers des configurations si par exemple la configuration $\left(S_i, \rho_{C_j}, \rho_{M_1}, \rho_{P_1}\right)$ ne s'avère pas réalisable (voir 8.2).

Le tableau 4 qui suit montre les gains en nombre de configurations considérées, en dirigeant les recherches vers des contraintes plus fortes, sur l'exemple donné au début de ce chapitre. Nous rappelons que les temps de calculs sont directement proportionnels au nombre de configurations considérées.

Recherche dichotomique	non dirigée	dirigée
Nombre de configurations considérées	108	78

TAB. 4 – *Accentuation des contraintes*

8.4.2 Classement a posteriori des sources rendant les meilleurs résultats

Nous proposons ici de faire un classement des sources ayant rendu les meilleurs résultats au cours des exécutions précédentes (lors des recherches des meilleures configurations sur différents tunnels). Il est clair qu'il est plus intéressant de commencer la recherche a priori avec la source qui a rendu les meilleurs résultats auparavant, celle-ci semblant présenter alors un meilleur rapport qualité d'émission/prix que les autres. On peut ainsi espérer se positionner d'entrée plus près du minimum global. La contrainte de recherche du coût minimal sur les autres sources étant ensuite plus forte, l'élagation sera d'autant plus rapide.

On peut constater grace au tableau 5, l'intérêt de la remarque sur le classement a posteriori des sources.

Sources	non classées	classées
Nombre de configurations considérées	78	45

Tab. 5 – *Classement a posteriori des sources*

8.5 Recherche des n meilleures configurations

L'objectif n'est plus maintenant d'obtenir seulement la meilleure configuration mais les n ($n > 1$) meilleures configurations. La démarche générale est la même que celle précédemment décrite en utilisant les différentes heuristiques développées, mais il faut faire attention à l'élagage des arbres de configurations. En effet, certaines solutions élaguées par la méthode précédente peuvent faire partie de l'ensemble des meilleures solutions sans être la meilleure. Afin de palier ce problème, nous utilisons un tableau stockant les n meilleures solutions au cours de la recherche. L'élagage ne se faisant, en utilisant les heuristiques de la section 8.2 , que lorsqu'en plus la configuration courante n'apparaît pas dans ce tableau ou seulement en dernière position (c'est à dire qu'elle correspond à la nième meilleure solution au stade de la recherche). Nous sommes alors assurés que toutes les configurations intermédiaires, de coût supérieurs, ne feront pas parties des n meilleures solutions.

Recherche dichotomique des **n** meilleures configurations	$n = 1$	$n = 5$	$n = 10$
Nombre de configurations considérées	45	59	68

Tab. 6 – *Recherche des meilleures configurations*

8.6 Algorithme

Les algorithmes qui suivent ne tiennent pas compte de l'heuristique du paragraphe 8.4.1 par soucis de clarté et décrivent uniquement la recherche de la meilleure configuration.

Se référer à la figure 8 pour les différentes répartitions associées aux chemins considérés (numéros encadrés) de l'arbre dans les algorithmes.

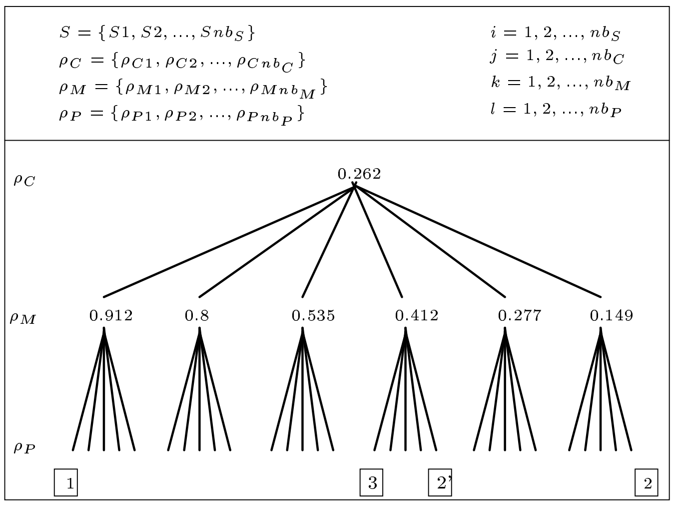

FIG. 8 – *Parcours d'un arbre*

8.6.1 Recherche de la meilleure configuration

Recherche_ meilleure_ configuration$(S, \rho_C, \rho_M, \rho_P)$ (figure 9) est la procédure principale du module de recherche et parcourt l'ensemble de la base de données pour rechercher la meilleure configuration. *Reduction_ a_ priori*$(S, \rho_C, \rho_M, \rho_P)$ utilise la proposition 1 du paragraphe 8.1 afin d'obtenir une relation d'ordre partiel (permettant d'éliminer les matériaux ne respectant pas la proposition 1) qui nous permettra d'utiliser les différentes heuristiques d'élagage proposées. *Traiter_ tous_ les_ arbres*$(Si, \rho_C, \rho_M, \rho_P)$ recherche la meilleure configuration dans la forêt d'arbres pour une source fixée. *Reordonner(S)* exploite quant à elle la remarque du paragraphe 8.4.2 afin de mettre à jour un fichier contenant les sources ayant rendu les meilleures résultats jusqu'ici.

8.6.2 Traitement des arbres pour une source donnée

La procédure *Traiter_ tous_ les_ arbres*$(Si, \rho_C, \rho_M, \rho_P)$ (illustré par la figure 10) utilise une approche générale de recherche de type dichotomique (voir paragraphe 8.3).

Nonrealisable$(Si, \rho_{Cmilieu}, \rho_{M1}, \rho_{P1}))$ est une fonction à résultat booléen qui permet de savoir rapidement si une configuration est réalisable ou non (section 8.2.1). La fonction est assez rapide car elle consiste seulement à simuler 3 rampes d'éclairage (avec l'émission d'une unique source) dans la proximité immédiate de l'entrée (section 9). Sachant ensuite que la

Recherche_meilleure_configuration($S, \rho_C, \rho_M, \rho_P$){
 /* Relation d'ordre partiel, on ne retient que les ρ_C vérifiant la proposition 1*/
 Reduction_a_priori($S, \rho_C, \rho_M, \rho_P$);
 coutmin $= \infty$; /* Variable repérant la configuration de cout minimal */
 pour chaque source $Si \in S$ /* S ordonné selon section 8.4.2 */
  Traiter_tous_les_arbres($Si, \rho_C, \rho_M, \rho_P$);
 Réordonner(S); /* pour traiter d'autres tunnels */
}

FIG. 9 – *Recherche de la meilleure configuration*

courbe de luminance à requérir est décroissante, le résultat de la fonction en découle immédiatemment.
Dans l'algorithme, nous exploitons pour commencer la proposition 2 section 8.2 afin d'élaguer entièrement de nombreux arbres lorsque cela est possible.
L'idée est ensuite de comparer les configurations extérieures, correspondant à la feuille la plus à gauche et à la feuille la plus à droite de l'arbre, lorsque celles-ci sont réalisables (chemin 1 et chemin 2 de la figure 8). La fonction *Simul*($Si, \rho_{C_j}, \rho_{M_k}, \rho_{P_l}$) réalise la simulation d'éclairage d'une configuration donnée et rend la répartition (notée *repartu* pour le chemin u) permettant de satisfaire aus niveaux requis. On peut alors, si les répartitions associées aux chemins 1 et 2 sont identiques élaguer immédiatement tout l'arbre de la figure 8 (ceci correspond au cas général de la section 8.2.2). 2 simulations auront alors suffi pour trouver la meilleure configuration de l'arbre.
Lorsque les répartitions extrêmes sont différentes, il faut parcourir l'arbre.
Ceci est réalisé par la procédure *Parcourir_ arbre_plein*($Si, \rho_{Cmilieu}, \rho_M, \rho_P, repart1, repart2$) qui est décrite après (figure 12).
Lorsque par ailleurs, la configuration du chemin 2 n'est pas réalisable, il faut alors parcourir un arbre que l'on élague à l'aide de la fonction *Parcourir_ arbre_ elague*($Si, \rho_{Cmilieu}, \rho_M, \rho_P, repart1$) et propager cet élagage aux arbres de droites (ceux avec un ρ_C plus faible).
Cette procédure n'est pas détaillée car elle ressemble beaucoup à la procédure *Parcourir_ arbre_plein*($Si, \rho_{Cmilieu}, \rho_M, \rho_P, repart1$, $repart2$) mais utilise une structure de donnée plus complexe pour représenter l'arbre élagué.

8.6.3 Parcours d'un arbre réalisable pour tous ses chemins

La procédure décrite en figure 12 traite un arbre entièrement réalisable avec les répartitions associées aux chemins extérieurs 1 et 2 qui sont différentes.
L'idée est d'avancer de sous arbres en sous arbres en parcourant les éléments du tableau ρ_M afin d'élaguer rapidement lorsque cela est possible les chemins intermédiaires.
Meilleurintermediaire() simule les chemins intermédiaires se trouvant entre les configurations 2 et 3 et détermine la configuration de coût minimal.

```
Traiter_tous_les_arbres(Si, ρC, ρM, ρP){
    /*ρC, ρM, ρP sont les ensembles de réflectivités moyennes des chaussées, murs
    et plafonds respectivement, triées par valeurs décroissantes */
    /* ρM1 est la réflectivité moyenne d'indice 1, c'est à dire la plus grande,
    ρM_nbM réflectivité d'indice nbM qui est la plus petite */
  tant que (ρC ≠ ∅ et Nonrealisable(Si, ρCmilieu, ρM1, ρP1))
  faire ρC = {ρC1, ..., ρCmilieu−1};
  si (ρC == ∅) alors retour;    /*On a fini avec la source Si*/
   sinon {
     repart1 = Simul(Si, ρCmilieu, ρM1, ρP1);
     /* Début d'élagage par non réalisation */
     si (!Nonrealisable(Si, ρCmilieu, ρM_nbM, ρP_nbP) alors {
        repart2 = simul(Si, ρCmilieu, ρM_nbM, ρP_nbP);
        si (repart1 ≠ repart2) alors
            /*Tout l'arbre est réalisable*/
          Parcourir_arbre_plein(Si, ρCmilieu, ρM, ρP, repart1, repart2);
           sinon coutmin = min(cout(repart2), coutmin); /*On a fini pour l'arbre */
     }
     sinon { /* Elaguer l'arbre */
        Parcourir_arbre_elague(Si, ρCmilieu, ρM, ρP);
     }
    si (milieu ≠ 1) alors {          /*Il reste au moins un arbre à gauche*/
        ρC' = {ρC1, ..., ρC_milieu−1};
        Traiter_tous_les_arbres(Si, ρC', ρM, ρP);
     }
     si (milieu < nbC) alors {      /*Il reste au moins un arbre à droite*/
        ρC' = {ρmilieu+1, ..., ρC_nbC};
        Traiter_tous_les_arbres(Si, ρC', ρM, ρP);
     }
   }
}
```

FIG. 10 – *Traitement de tous les arbres pour une source*

Le déroulement de cet algorithme est illustré par la figure 11. Dans cette figure 1, 2 et 3 sont des numéros de chemin auxquels correspondent les répartitions *repart1, repart2, repart3.* Lors du déroulement de l'algorithme, les chemins représentés par ces numéros peuvent changer, c'est la raison pour laquelle ils sont munis d'un indice qui augmente au fur et à mesure que l'algorithme avance dans son parcours d'arbre.

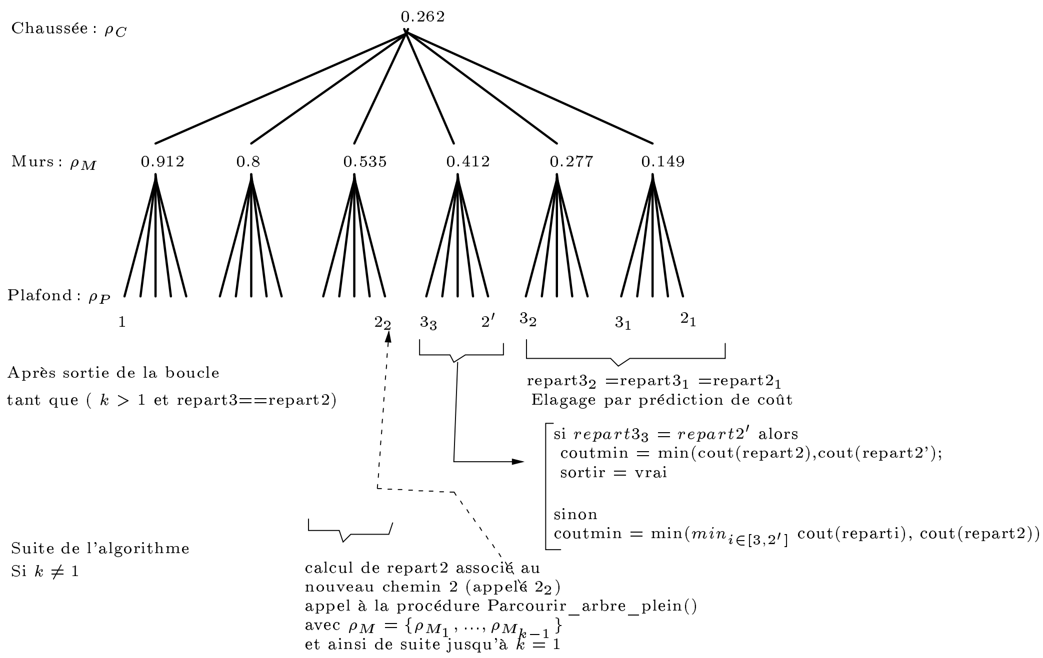

FIG. 11 – *Déroulement de l'algorithme de la figure 12*

9 Accélération des temps de simulation d'éclairage en exploitant les symétries propres aux tunnels

9.1 Introduction

L'étude menée dans la section précédente a permis de diminuer considérablement l'espace de recherche des meilleures configurations. Il apparaît toutefois que chaque configuration prise individuellement nécessite déjà des temps de simulation assez conséquents. En effet, prenons l'exemple d'une zone d'entrée du tunnel de l'ordre de 100 mètres avec un espacement entre les sources de 3 mètres et 2 rampes d'éclairage placées au centre de la chaussée; celle-ci nécessite donc déjà l'utilisation de plus de 65 sources et induit des temps de calcul trop importants pour une unique simulation dans le processus de recherche global.

```
                    /* On a repart1 ≠ repart2 à l'appel */

Parcourir_arbre_plein(Si, ρCj, ρM, ρP, repart1, repart2){
   k = nbM;              /* Indice pour la plus petite valeur de ρM */
   sortir = faux;
   repart3 = Simul(Si, ρCj, ρM_nbM, ρP1);
   tant que (k > 1 et repart3 == repart2){
     k − −;
      /* Début d'élagage par prédiction de coût */
     si (k ≠ 1) alors repart3 = simul(Si, ρCj, ρMk, ρP1);
   }
   si (k < nbM et k ≠ 1) alors {
          /*On a avancé d'au moins un sous arbre et pas jusqu'au bout */
     repart2' = Simul(Si, ρCj, ρMk, ρP_nbP);
     si (repart2' == repart3) alors {
          /* Le changement de répartition s'effectue au changement de sous-arbre */
      coutmin = min(min(cout(repart2), cout(repart2')), coutmin);
      sortir = vrai; /* Pas besoin de simuler les chemins intermédiaires entre 2' et 3 */
     }
   }    /* fin du cas général */
   si (k == 1) alors {          /* On est au bout de l'arbre (à gauche) */
     repart2' = Simul(Si, ρCj, ρM1, ρP_nbP);
     si (repart2' == repart1) alors {
      coutmin = min(min(cout(repart2), cout(repart2')), coutmin);
      sortir = vrai;        /* Pas besoin de simuler les chemins intermédiaires */
     }
     sinon {repart2 ⟵ repart2'; repart3 ⟵ repart1; }
   }    /*fin du cas k=1 */
   si (!sortir) alors coutmin = min(coutmin, Meilleurintermediaire());
          /* Simulation des branches entre 2 et 3 */
          /* On a maintenant trouvé la meilleure répartition entre 2 et 3 */
   si (k ≠ 1) alors {
     repart2 = Simul(Si, ρCj, ρM_{k−1}, ρP_nbP);
     si (repart2 ≠ repart1) alors {
      ρM' = {ρM1, ..., ρ_{k−1}};
      Parcourir_arbre_plein(Si, ρCj, ρM', ρP, repart1, repart2);
     }
     sinon coutmin = min(cout(repart2), coutmin);
   }
}
```

FIG. 12 – *Traitement de l'arbre : pour chaque valeur coutmin on sauvegarde la répartition et la configuration associées*

Cette remarque nous a conduit à exploiter la géométrie simple et les symétries propres à la plupart des tunnels afin d'optimiser les temps de simulation pour chacune des configurations envisagées lors de la recherche.

9.2 Emission d'une source unique dans le tunnel

Lors de la simulation d'une configuration, nous plaçons la source choisie au centre du tunnel (ou sur le coté) conformément aux paramètres **Positionnement** et **Inclinaison** connus. Remarquons que le tunnel n'est déjà pas considéré dans sa totalité mais seulement dans une zone sur laquelle la source est succeptible d'avoir une influence sur les niveaux de luminances de la chaussée. En pratique, après plusieurs tests d'emission des différents luminaires, nous estimons qu'une distance d'une vingtaine de mètres de part et d'autre de la source (soit environ 40m) est suffisante pour définir la zone initiale du tunnel à considérer. Ce premier découpage permet de réaliser plus rapidement un maillage de la zone qu'en considérant le tunnel dans sa totalité. Suite à ce pré-découpage, nous faisons émettre la source dans la portion de tunnel considérée. Cette simulation est alors très rapide puisque nous ne considérons en fait que 4 surfaces (pour un tunnel ayant la forme d'un tube) et une source dans un milieu qui de plus est non occlusif.

9.3 Extraction de la zone d'influence

D'une simulation de la configuration considérée, nous extrayons ensuite les luminances de chaussée que devraient percevoir un observateur. Rappelons que la chaussée est supposée lambertienne (voir paragraphe 6.2) donc les luminances sont obtenues directement à partir des radiosités grace à la relation valide sous cette hypothèse :

$$L = \frac{B}{\pi}$$

avec B la radiosité et L la luminance.

Nous obtenons ainsi, en nous plaçant le long du centre de la chaussée, une courbe de luminances due à l'émission d'une unique source sur la zone considérée. Nous ne considérons de cette courbe que la partie où les luminances obtenues sont non négligeables et nous appellerons désormais celle-ci *motif de base*. La figure 13 montre le motif de base obtenu avec une source émettant de manière très symétrique et la figure 14 avec une source émettant de manière un peu plus diffuse mais moins intensément (la source est placée au centre du motif).

Puisque le tunnel est un environnement symétrique, il est clair que translater la source longitudalement revient à translater d'autant les niveaux de luminance obtenus sur la chaussée. Cette remarque est très importante car elle va nous permettre de déterminer les niveaux de luminance dûs à une rampe d'éclairage tout au long de la zone d'entrée en ayant simplement fait émettre une unique source.

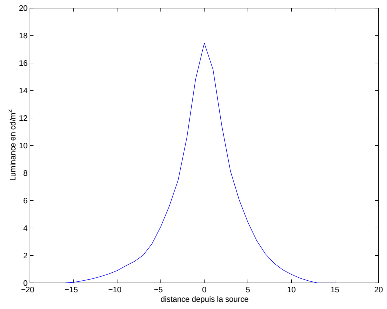

FIG. 13 – *Exemple de motif de base*

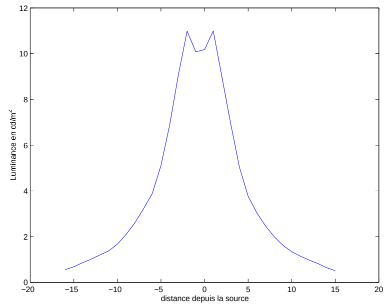

FIG. 14 – *Exemple de motif de base*

9.4 Détermination du motif de recouvrement

Nous appelons *motif de recouvrement* la courbe de luminances, sur la portion extraite du tunnel, correspondante aux niveaux théoriques que l'on obtiendrait en faisant émettre une rampe entière de luminaires. Connaissant l'espacement entre les sources, on peut reconstruire ce motif de recouvrement par translations et recouvrements du motif de base.

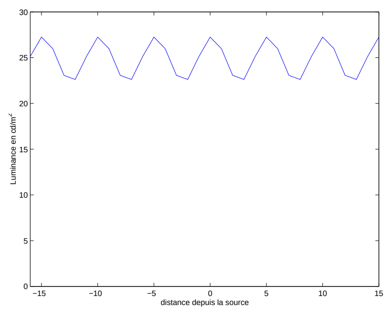

FIG. 15 – *Exemple de motif de recouvrement*

La figure 15 montre le motif de recouvrement obtenu par translations et recouvrements du motif de base de la figure 13 en considérant un espacement entre les sources de 5 mètres.

Remarque : nous nous sommes intéressés aux luminances le long du tunnel au centre de la chaussée. Aussi, on suppose les éclairements relativement uniformes dans la largeur de la chaussée (si on ne fait pas cette hypothèse, il suffit de considérer les luminances minimales obtenues sur la largeur de la chaussée et ceci tout au long de la zone considérée).

9.5 Détermination de la répartition des rampes dans la zone d'entrée du tunnel

Nous abordons maintenant la dernière étape de la section. Rappelons que nous cherchons à obtenir une courbe de luminances sur la chaussée qui se rapproche au plus près des niveaux requis (voir figure 2) mais toujours par valeurs supérieures. Ceci est réalisé en faisant varier le nombre n de rampes d'éclairage (n =1, 2 ou 3) dans la zone d'entrée ce qui revient à multiplier les valeurs du motif de recouvrement par n. Ainsi, si trois rampes d'éclairage ne suffisent pas pour satisfaire aux niveaux requis près de l'entrée du tunnel (c'est là que les niveaux requis sont les plus importants) alors la configuration considérée est irréalisable. Dans le cas contraire, cette configuration est réalisable car la courbe de niveaux requis est décroissante.

Ces motifs dilatés par les valeurs de n sont alors mis bout à bout en commançant au niveau de l'entrée du tunnel et en faisant décroître le nombre de rampes lorsque cela est possible. Cette démarche nous permet d'obtenir la répartition des rampes dans la zone d'entrée satisfaisant à la contrainte des niveaux requis. La zone d'entrée du tunnel est ainsi partitionnée en portions sur lesquelles on dispose du nombre de rampes qu'il faut utiliser. C'est donc ainsi que nous obtenons l'instantiation de la variable rèpartition.

10 Visualisation finale du tunnel

La visualisation finale du tunnel est réalisée par une simulation complète du logiciel sans considérer les simplifications accélératrices de la section 9. Un fichier de description de la scène est créé à la fin de la recherche des meilleures configurations dans lequel on retrouve le type de source utilisé et le placement des luminaires, ainsi que les différentes types de surfaces réalisant la meilleure configuration. Cette simulation est alors réalisée préciséent comme on peut le constater sur l'image 16 qui suit. La source utilisée est ici de type $D6500$ et correspond à l'émission d'une source naturelle comme un ciel assez nuageux. La chaussée à un spectre de réflexion de type *Sable* (peu réaliste mais nous ne disposons pas des spectres décrivant les chaussées), les murs sont en *Beton*. L'image 17 correspond au même tunnel mais éclairé avec une source type *Sodium basse pression* couramment utilisée dans les tunnels et qui émet principalement dans le jaune. On notera l'importance d'une description précise du type de source utilisé en regard de l'influence considérable sur les résultats visuels.

FIG. 16 – *Image de tunnel : sources de type D6500*

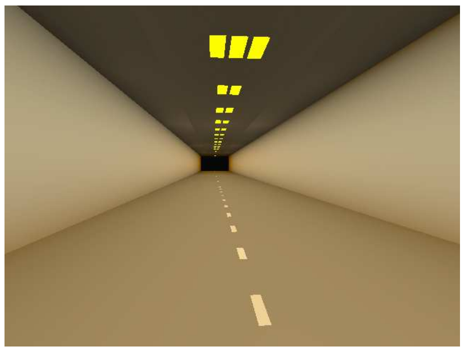

FIG. 17 – *Image de tunnel : sources de type Sodium Basse pression*

11 Interfaçage

Il apparaît clairement que nous devions réserver une place importante à la mise en oeuvre d'une interface graphique élaborée de par l'aspect interactif et convivial qu'elle doit procurer. Cette interface doit permettre d'obtenir un logiciel finalisé et très simple d'utilisation tout en donnant la possibilité à l'utilisateur d'obtenir toute information qu'il juge utile. Nous décrivons dans un premier temps, le séquencement et les possibilités offertes à l'utilisateur par l'application développée.

Pour commencer, l'utilisateur sélectionne ou saisit des données qui vont permettre de préciser le type de tunnel sur lequel s'opèrera la recherche (forme, dimensions du tunnel, etc.). Nous offrons également à l'utilisateur la possibilité de restreindre l'espace de recherche sur les configurations envisageables en précisant certaines variables ou en réduisant le domaine des valeurs possibles pour d'autres. Ceci conduit à des gains en temps de recherche tout à fait conséquents et traduit simplement le fait que plus l'utilisateur a une idée assez précise de ce qu'il désire plus la recherche sera rapide.

Suite à cette saisie, la phase de recherche des meilleures configurations est lancée et un tableau évoluant au cours de la recherche s'affiche en présentant les meilleures configurations obtenues à ce stade. Une fois cette phase réalisée, l'utilisateur peut ensuite sélectionner la configuration qu'il désire afin de la visualiser, activant ainsi la deuxième partie de l'application : le calcul et l'affichage de l'image. En dehors de ces fonctionnalités, l'utilisateur peut, en outre, modifier la base de données concernant les luminaires et les revêtements.

Afin de rendre l'utilisation du logiciel très large, le programme doit pouvoir fonctionner aussi bien sur des stations **SUN** que sur des **SiliconGraphics**. C'est donc sur ces deux machines et leur environnement respectif que le programme a été réalisé. Pour réaliser la représentation virtuelle du tunnel et de son éclairage, nous avons utilisé la librairie OpenGL et pour l'interface homme/machine, la librairie Motif.

Le logiciel actuel permet d'effectuer une recherche des meilleures configurations (sources et revêtements des surfaces) après avoir spécifié certains critères ou informations nécessaires comme les dimensions du tunnel, la restriction à certains revêtements ou certaines sources. Les meilleures configurations recueillies peuvent alors donner suite à une visualisation de la scène avec les résultats obtenues, scène dans laquelle il est possible de se déplacer. Par ailleurs, pour faciliter la sélection des revêtements ou des sources et pour donner des informations pertinentes à l'utilisateur, trois zones de dessin permettent d'afficher différents spectres.

Il reste, néanmoins à compléter ce logiciel par une gestion aisée de la base de donnés concernant les luminaires et les revêtements (création, suppression, modification). Il serait également intéressant de pouvoir obtenir certaines informations directement sur l'écran par l'intermédiaire de la souris (par exemple la luminance en certains points de la scène).

12 Conclusion

Nous avons voulu rester dans un cadre mathématique rigoureux et ainsi satisfaire aux objectifs d'une simulation d'éclairage réaliste cherchant à reproduire le plus fidèlement possible la propagation des ondes lumineuses. Cette contrainte forte nous aura finalement permis d'exploiter le logiciel que nous avons développé dans l'optique d'une application concrète concernant l'éclairage des tunnels routiers, laquelle nécessite un calcul de grandeurs radiométriques et photométriques fondées et valides. Une étude préalable sur le problème de simulation inverse d'éclairage appliqué dans le tunnel a été menée et a fait l'objet de cet article.

Il reste maintenant à valider le logiciel développé par des mesures sur site réel et en lui adjoignant une base de données non fictive avec en particulier des données constructeur de luminaires réelles.

Références

[1] W. K. Adrian. Investigations on the required luminance in tunnel entrances. *Lighting Research and Technology*, 14:151–159, 1982.

[2] W. K. Adrian. Adaptation luminance when approaching a tunnel in daytime. *Lighting Research and Technology*, 19:73–79, 1987.

[3] CETU. *Guide de l'éclairage des Tunnels Routiers.* Centre d'Études des Tunnels, 1985.

[4] CIE. *A survey of fundamentals for determining the luminance in the threshold zone.* International Commission on Illumination, Paris, 1984.

[5] CIE. *Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses.* International Commission on Illumination, 1989.

[6] J.K. Kawai, J.S. Painter, and M.F. Cohen. Radioptimization-goal based rendering. *Computer Graphics Proceedings SIGGRAPH'93*, pages 147–154, 1993.

[7] W.E. Knowles Middleton. Vision through the atmosphere. *University of Toronto Press*, page 90, 1958.

[8] Narisada and Yoshikawa. Tunnel entrance lighting - effect of fixation point and other factors on the determination of requirements. *Lighting Research and Technology*, 6:9–18, 1974.

[9] I Overington. Vision and acquisition. *Pentech Press*, page 49, 1976.

[10] C. Schoeneman, J. Dorsey, B. Smits, J. Arvo, and D. Greenberg. Painting with light. *Computer Graphics Proceedings SIGGRAPH'93*, pages 143–146, 1993.

[11] D.A. Schreuder. L'éclairage des tunnels routiers. *N.V. Philips Gloeilampenfabrieken*, 1964.

[12] M Tesson and B Monié. Road tunnel lighting design: Simplification. *Lighting Research and Technology*, 21(4):171–179, 1989.

[13] E. Zéghers. Radiosité spectrale et sources directionnelles : application à l'éclairage des tunnels routiers. *Thèse*, 1859, 1997.

[14] E. Zéghers, S. Carre, and K. Bouatouch. Error-bound wavelenght selection for spectral rendering. *The Visual Computer (International Journal of Computer Graphics)*, 1997.

Unité de recherche INRIA Lorraine, Technopôle de Nancy-Brabois, Campus scientifique,
615 rue du Jardin Botanique, BP 101, 54600 VILLERS LÈS NANCY
Unité de recherche INRIA Rennes, Irisa, Campus universitaire de Beaulieu, 35042 RENNES Cedex
Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes, 655, avenue de l'Europe, 38330 MONTBONNOT ST MARTIN
Unité de recherche INRIA Rocquencourt, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 LE CHESNAY Cedex
Unité de recherche INRIA Sophia-Antipolis, 2004 route des Lucioles, BP 93, 06902 SOPHIA-ANTIPOLIS Cedex

Éditeur
INRIA, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 LE CHESNAY Cedex (France)
http://www.inria.fr
ISSN 0249-6399