

# Simulations d'éclairage de scènes routières et urbaines

## Mise au point d'un algorithme de calcul spécifique

Roland BRÉMOND

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

### RÉSUMÉ

Les calculs d'éclairage permettent d'évaluer la qualité et la conformité de projets d'éclairage urbain et de les visualiser. Ils sont susceptibles de rendre les simulateurs de conduite suffisamment réalistes pour permettre de les utiliser avec des scènes nocturnes, en particulier pour des études de sécurité routière. Le LCPC a développé au début des années 90 une méthodologie de simulation d'éclairage par modélisation photométrique et colorimétrique de la propagation de la lumière, qui a abouti à la production du logiciel LISE-LCPC, dont l'objectif était de disposer d'un outil de calcul d'éclairage en unités physiques (luminance, éclairement), et d'images de synthèse des scènes calculées dont les caractéristiques (couleurs, contrastes, luminances) soient comparables aux mêmes caractéristiques sur le site correspondant à la simulation.

À partir de LISE-LCPC, un nouvel outil de calcul, avec une nouvelle algorithmique fondée sur une structuration hiérarchique des scènes géométriques et sur une factorisation des échanges d'énergie, a été défini et développé. Les solutions retenues sont particulièrement adaptées aux scènes d'éclairage routier et urbain. Le nouvel algorithme a été validé et ses performances évaluées par rapport à une référence. Son domaine d'application devrait pouvoir être étendu, avec l'ajout de nouvelles améliorations (coefficient de luminance directionnelle, texture) et l'intégration de calculs d'éclairage réalistes sur simulateur de conduite. Après avoir mis en évidence les limites des outils existants et les améliorations qui ont été apportées, les validations qui ont permis d'évaluer les nouvelles performances du logiciel sont présentées. Ce nouvel outil n'est pas lié à un matériel informatique spécifique, ce qui lui permet d'être disponible sur PC sous environnement Linux.

DOMAINE : Sciences de l'ingénieur.

### ABSTRACT

#### LIGHTING SIMULATIONS OF ROAD SCENES AND URBAN SETTINGS: REFINING A SPECIFIC COMPUTATION ALGORITHM

*Lighting computations enable evaluating the quality and compliance of urban lighting projects and then visualizing their impacts; such computations help make driving simulators realistic enough for use with nighttime scenes and, in particular, for road safety studies. At the beginning of the 1990's, the LCPC laboratory developed a lighting simulation methodology for light propagation by means of photometric and colorimetric modeling. This effort has given rise to a software package ("LISE-LCPC") that serves as a tool for both computing lighting in terms of physical units (luminance, illuminance) and generating synthesis images of the computed scenes, whose characteristics (color, contrast, luminance) may be compared with those on the site corresponding to the simulation.*

*A revised computation tool, relying on LISE-LCPC programming elements and featuring a new algorithm based on a hierarchical compilation of the geometric scenes as well as an energy exchange factorization, has since been designed and developed. The preferred solutions prove to be especially well-adapted to road and urban lighting scenes. This new algorithm has been validated and its performance measured in comparison with a benchmark. The field of application for such an approach should be extendable by means of additional improvements (directional luminance coefficient, texture) and integration of realistic lighting computations within a driving simulator. After identifying the limitations of the existing range of tools, these improvements are set forth and the validation sequence then allows evaluating the software's latest performance. This revamped tool is not bound to any single type of computing hardware, a feature that makes it suitable for use in Linux PC environments.*

FIELD: Engineering sciences.

## La simulation d'éclairage physiquement réaliste

### La simulation d'éclairage

La simulation d'éclairage, dans le contexte routier et urbain, est un outil qui peut permettre aux aménageurs et aux gestionnaires d'infrastructure d'évaluer l'impact visuel des installations d'éclairage,

des revêtements de chaussée ou de la signalisation, ce qui contribue à définir la qualité de service de ces aménagements. Cet outil permet de contrôler les paramètres physiques : matériaux, sources, géométrie des scènes, et ainsi de prévalider ou de tester des installations avant leur mise en place sur site. Par ailleurs, la possibilité d'obtenir des images réalistes des scènes calculées fait de la simulation d'éclairage un outil de communication (pour les bureaux d'étude) et d'évaluation des projets (pour les maîtres d'ouvrage).

Ces simulations sont particulièrement utiles dans le cas de scènes géométriquement complexes, où les calculs analytiques ne sont pas possibles, notamment lorsque les inter-réflexions ont un impact notable : tunnels, milieu urbain, par exemple. La figure 1 présente un exemple de calcul d'éclairage en milieu urbain.

Les algorithmes de radiosité permettent de simuler la propagation de la lumière dans une scène, en tenant compte de la géométrie rencontrée et des propriétés de réflexion de la lumière par les matériaux [1]. Ces algorithmes ne sont pas les seuls à permettre ces simulations, qui peuvent également être calculées par la méthode du tracé de rayons [2].

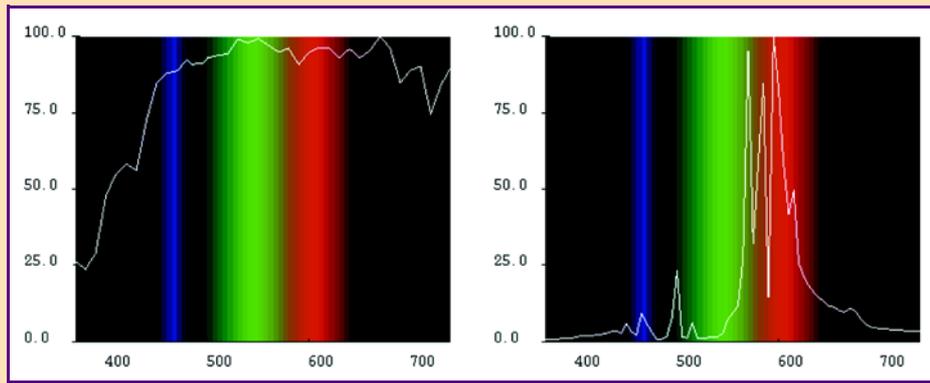
Les algorithmes de radiosité utilisent un découpage géométrique de la scène en mailles de calcul. Dans un premier temps, la propagation de la lumière est effectuée des sources lumineuses vers l'ensemble des mailles de la scène. Chaque maille recueille une quantité d'énergie. Cette énergie, qui contribue à l'énergie totale vue par l'observateur, est en partie réémise vers l'ensemble de la scène. C'est ce que l'on appelle les inter-réflexions, ou l'éclairage indirect, qui dépend des caractéristiques propres de chaque surface (matériau, texture et orientation de la surface).

Les calculs d'éclairage utilisent, comme données d'entrée, les données du projet d'éclairage, c'est-à-dire d'une part la description géométrique de la scène, d'autre part une description photométrique des matériaux et des sources d'éclairage. Un algorithme spécifique, appelé mailleur, est utilisé pour découper chaque surface plane de la scène en mailles triangulaires, aussi proches que possible de triangles équilatéraux. Pour des raisons liées à l'algorithme de calcul, on ne prend en compte que des surfaces planes. Les matériaux sont décrits par leur spectre de réflexion et les sources d'éclairage par leur spectre d'émission, leur flux et leur indicatrice. Ces données sont mesurées au Laboratoire de Photométrie du LCPC [3], ou fournies par les constructeurs (pour les sources), ou bien sont éventuellement disponibles dans des bases de données.

Le coefficient de réflexion de la lumière par un matériau est différent selon la longueur d'onde. Il est nécessaire, pour faire des calculs rigoureux, de tenir compte de la répartition spectrale des sources d'éclairage et des caractéristiques des matériaux dans le domaine de la lumière visible. Cet échantillonnage doit être plus fin pour les simulations d'éclairage public que pour les simulations



*Fig. 1 - Calcul d'éclairage en milieu urbain.*



**Fig. 2 - Spectres de sources d'éclairage.**  
(a : lumière diurne ; b : source artificielle)

de jour, car les spectres sont beaucoup plus variables et comportent fréquemment (selon les technologies utilisées) des pics caractéristiques dans certaines longueurs d'onde, ce qui n'est pas le cas en lumière diurne (fig. 2). Le spectre de la lumière visible est donc échantillonné sur un certain nombre de longueurs d'onde, et la simulation de la propagation de la lumière est effectuée pour chacune de ces longueurs d'onde.

On calcule ainsi dans un premier temps l'éclairage direct (des sources vers les surfaces), puis l'éclairage indirect. À l'issue des calculs, on dispose en chaque maille d'une distribution spectrale d'énergie, qui permet de reconstruire une couleur physique (en coordonnées XYZ\*), qui est ensuite traduite, selon les besoins, en luminance et chromaticité, ou en valeur d'adressage (en coordonnées RVB\*\*) pour la restitution sur écran.

## Développement d'un nouvel algorithme

### Justification

Les calculs d'éclairage étant particulièrement longs et coûteux en mémoire informatique, le choix a été fait, au moment de la conception de LISE-LCPC, d'utiliser des stations de travail Silicon Graphics, pour profiter à la fois de la puissance de calcul et de la carte graphique spécialisée de ces machines [4]. Mais le fait d'utiliser un matériel spécifique a constitué un handicap pour la diffusion du logiciel, en particulier parce qu'en excluant l'utilisation sur PC, on ne répondait pas à la demande d'utilisateurs potentiels (CETE, bureaux d'étude). De plus, le logiciel ne permettait pas de prendre en compte des scènes géométriquement trop complexes, ni d'intégrer de nouveaux éléments de « réalisme », comme la luminance directionnelle, qui rend compte des variations de la luminance des matériaux en fonction des angles d'éclairage et d'observation [5], ou la texture des matériaux [6, 7].

Il a donc été décidé de redéfinir l'architecture du logiciel, afin de s'affranchir de contraintes liées au matériel et de permettre le portage sur PC, mais également d'accélérer les calculs afin de prendre en compte de nouveaux aspects du réalisme photométrique. On présente ici les principales options retenues ainsi que la validation du nouveau moteur de calcul.

\* XYZ : système de coordonnées trichromatique défini par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).

\*\* RVB (rouge, vert, bleu) : système de coordonnées pour l'affichage sur écran.

## Choix de l'algorithme

Plusieurs auteurs [8] ont proposé des approches permettant d'éviter de calculer systématiquement les échanges entre mailles de calcul. La première approche consiste à ne mailler les scènes que de façon assez grossière avant le calcul proprement dit, puis à remailler plus finement, au cours des calculs, les régions pour lesquelles une meilleure précision est nécessaire, par exemple celles qui reçoivent le plus d'énergie, ou qui se situent au voisinage des ombres. On évite ainsi de mailler *a priori* finement toute la scène, sans tenir compte des caractéristiques du projet d'éclairage.

L'autre approche consiste également à structurer la scène, mais dans le sens ascendant. Il s'agit de regrouper les mailles d'une même surface en agrégats (clusters), qui sont considérés lors de certains échanges d'énergie comme des mailles de plus haut niveau. À leur tour, ces agrégats sont regroupés en agrégats de niveau supérieur, jusqu'à la scène elle-même. Le principe de ce regroupement varie selon les auteurs, mais il s'agit en général d'un critère géométrique. L'intérêt est de procéder, dans certains cas, à un seul échange entre deux agrégats au lieu de  $n \times m$  au niveau des mailles : l'énergie à émettre est d'abord regroupée dans l'agrégat émetteur, l'ensemble est émis, puis redistribué à l'arrivée dans les divers éléments de l'agrégat récepteur. Cette démarche est connue sous le nom de radiosité hiérarchique [9, 10].

Ces deux démarches ne sont pas incompatibles : elles ont des domaines d'application différents. La première technique, avec un remaillage en cours de calcul, est surtout pertinente pour des scènes riches en zones d'ombre, ou lorsque les niveaux d'éclairément sont imprévisibles. La contrepartie en est que les raffinements de maillage pénalisent le temps de calcul. Nous n'avons pas retenu cette solution, car notre objectif est de simuler des éclairages de scènes urbaines et routières, dans lesquelles les ombres tranchées ne sont pas très fréquentes, et pour lesquelles les utilisateurs du logiciel, travaillant sur un projet précis, ont en principe des idées *a priori* sur la répartition et l'uniformité de l'éclairage.

Pour les scènes qui nous intéressent, la seconde solution présente par contre un intérêt particulier. En effet, les principaux avantages de cette factorisation des calculs concernent les surfaces qui sont éclairées faiblement par des sources lointaines, mais en même temps bien éclairées par des sources proches. C'est typiquement le cas des alignements de luminaires, et d'une manière générale pour toutes les scènes linéaires que constituent les scènes routières (autoroutes, tunnels, rues, etc.) : un élément de chaussée est fortement éclairé par un luminaire proche, et très peu par les luminaires les plus éloignés. C'est cette approche qui a été retenue.

On présente ci-dessous les développements qui ont été nécessaires pour aboutir au nouvel algorithme, d'abord pour ce qui concerne la factorisation des calculs par l'utilisation appropriée des agrégats de mailles, ensuite pour les calculs d'ombrage. Dans chaque cas, on indique par quelle procédure le nouvel algorithme a été validé.

## Simulation des échanges énergétiques

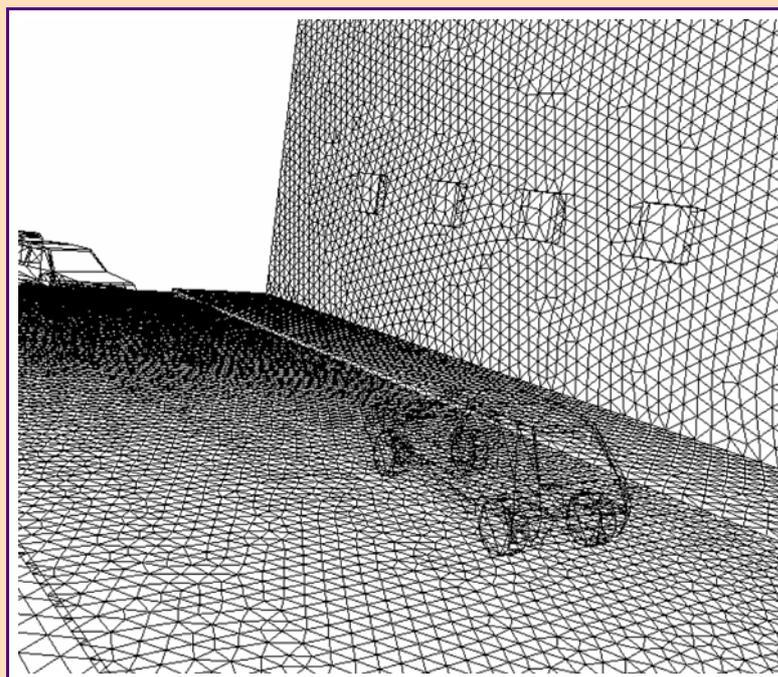
### Structure de données

L'algorithme retenu consiste à regrouper les mailles de chaque surface en agrégats. La réalisation de ces regroupements doit être rapide (en temps de calcul), mais aussi conduire à des agrégats aussi compacts que possible, de manière à ce qu'ils puissent être considérés comme des mailles de haut niveau le plus souvent possible. Il s'inscrit dans une démarche proche des avatars de surfaces [11], mais en constituant une hiérarchie de surfaces qui est proche de la structure de données proposée par [12], qui introduit l'idée de regrouper les mailles de calcul coplanaires afin de profiter de leurs propriétés communes lors des échanges énergétiques.

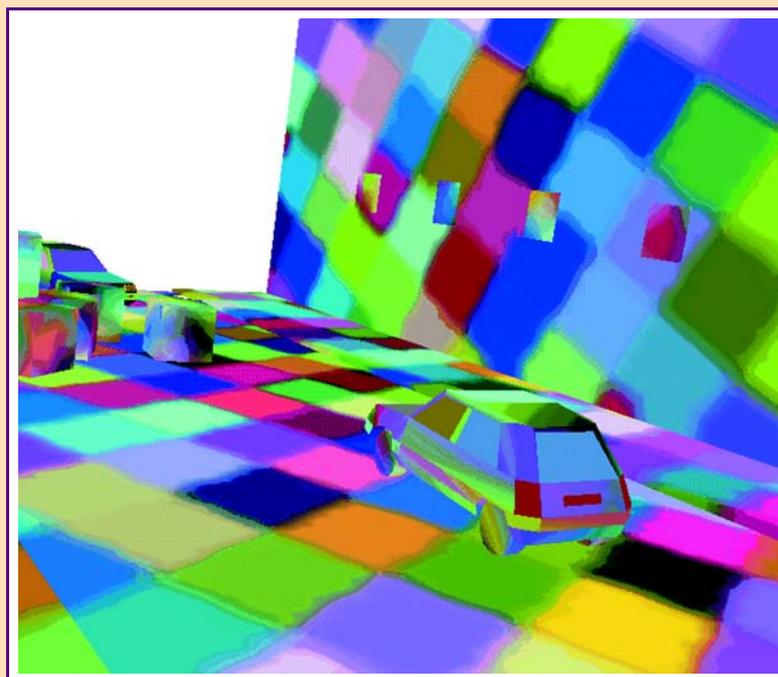
En pratique, les sommets d'une surface ne sont pas nécessairement coplanaires, mais un plan approchant au mieux les données (au sens de l'erreur quadratique moyenne) peut être calculé. La méthode retenue ici consiste à identifier ce plan de régression pour chaque surface, et à répartir régulièrement sur ce plan un semi de points régulier, selon un repère cartésien. À chaque point  $P_i$  de ce semi est attaché un agrégat, construit en affectant chaque maille au point  $P_i$  dont il est le plus proche. Cette méthode a pour but de définir, de manière simple et rapide, des agrégats de mailles qui seront, dans la plupart des cas, quasi-coplanaires. Dans la mesure où l'algorithme proposé a l'ambition de pou-

voir utiliser n'importe quelle scène routière ou urbaine, ce découpage simple et rapide conduit à regrouper dans certains agrégats des mailles d'orientation très différentes. De tels agrégats ne seront pas utilisés comme tels dans les calculs, qui seront traités au niveau des mailles. Cette démarche n'a de sens que dans la mesure où ces cas particuliers seront exceptionnels en pratique.

Les figures 3 et 4 représentent, pour un site urbain et pour une sphère, d'une part le maillage (a), d'autre part le regroupement en agrégats (b) (les mailles d'un même agrégat sont représentées de la même couleur). Elles illustrent le fait que la méthode retenue est bien adaptée à des surfaces planes ou quasi planes (dans la scène urbaine, les agrégats sont homogènes, et d'importance comparable), mais pas à des surfaces courbes (sur la sphère, les agrégats n'ont pas la même taille, et sont peu compacts). Cette structuration utilisant un plan de régression semble adaptée aux géométries rencontrées en environnement routier ou urbain.

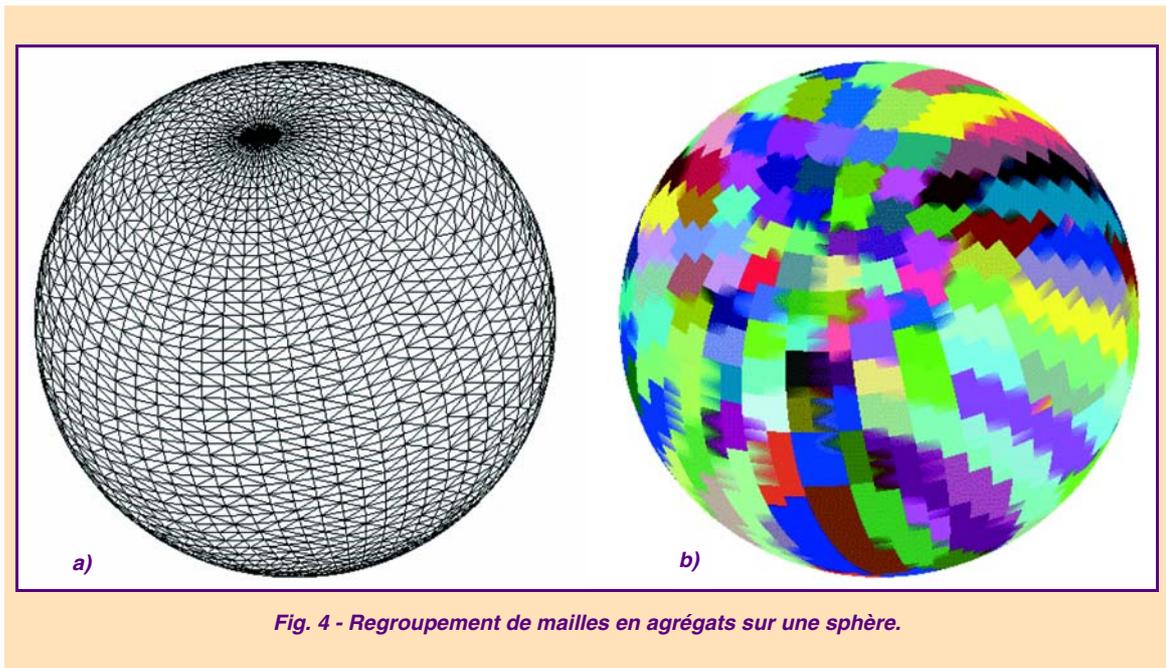


a)



b)

*Fig. 3 - Regroupement de mailles en agrégats sur un site urbain.*



L'espaceurment  $\Delta l$  entre deux points consécutifs du semi est un paramètre qui permet de contrôler (indirectement) le nombre d'agrégats de la surface. Pour fixer cet espaceurment, une première approche consiste à maintenir approximativement constant le nombre d'agrégats par surface. Pour cela, on peut poser  $\Delta l = l_1 \sqrt{A}$ , si  $A$  est l'aire de la surface considérée et  $l_1$  un paramètre libre. Une autre solution consiste à maintenir approximativement constant le nombre de mailles par agrégat, ce qui revient à resserrer les mailles du semi lorsque la surface est maillée de manière plus dense. Si  $N$  est le nombre de mailles, on fixera par exemple  $\Delta l = l_2 / (2 \sqrt{N})$ ,  $l_2$  étant un paramètre libre. C'est cette solution qui a été retenue ici, de manière à entériner les choix qui sont faits au moment du maillage. Selon le choix qui est fait,  $l_1$  et  $l_2$  sont définis de manière heuristique.

### Échanges d'énergie

La décomposition de la scène en agrégats a pour but de choisir à quel niveau effectuer les échanges énergétiques : de maille à agrégat, d'agrégat à agrégat, etc. Ce choix est un compromis entre la minimisation des approximations et la simplification des calculs. La stratégie adoptée ici est que, par défaut, les échanges se font entre agrégats, sauf si une condition spécifique conduit à fragmenter l'échange. Nous avons pour cela défini plusieurs critères de fragmentation, liés d'une part à la géométrie, d'autre part à la quantité d'énergie transportée.

Les critères géométriques portent sur plusieurs aspects. Il y a fragmentation de l'agrégat émetteur\* s'il n'est pas suffisamment plan ou suffisamment compact. Formellement, il y a fragmentation dès qu'une des conditions suivantes est respectée :

$$C_1^1 : \exists i / \vec{n}_i \cdot \vec{n} < k_1$$

$$C_1^2 : \exists i / \|\vec{G}_i - \vec{G}\| < k_2 l$$

où  $l$  est la longueur moyenne des arêtes,  $\vec{n}_i$  la normale de la maille  $i$ ,  $\vec{n}$  la normale moyenne,  $\vec{G}_i$  le centre de gravité de la maille  $i$ , et  $\vec{G}$  le centre de gravité de l'agrégat. Les paramètres  $k_1$  et  $k_2$  sont déterminés de manière heuristique.

\* C'est-à-dire que l'énergie est émise depuis les mailles et pas depuis l'agrégat.

D'autre part, il y a fragmentation du récepteur\* si l'angle solide  $\Omega$  entre le centre de l'émetteur et le récepteur est trop grand, si l'éclairement  $E$  du récepteur est trop important, ou si les centres de gravité sont trop proches l'un de l'autre. Cela se traduit par les conditions suivantes :

$$C_2^1 : \Omega > \Omega_1$$

$$C_2^2 : E > E_1$$

$$C_2^3 : d > d_1$$

$d$  étant la distance entre les centres de gravité et  $\Omega_1$ ,  $E_1$  et  $d_1$  les paramètres de ces critères.

Un troisième critère de fragmentation est ajouté aux deux précédents : lorsque la distance entre les agrégats est inférieure à une distance critique  $d_m$ , il y a fragmentation à la fois de l'émetteur et du récepteur, car l'estimation des facteurs de forme à partir des données agrégées peut alors être fortement erronée dans certaines géométries.

La stratégie proposée permet d'utiliser un découpage en agrégats automatique, simple et rapide, et à déplacer l'évaluation de leur pertinence au stade des échanges d'énergie. Elle repose sur l'hypothèse implicite que dans les scènes routières qui nous intéressent, le découpage automatique retenu sera pertinent pour la grande majorité des surfaces.

## Validation des échanges d'énergie

La structure de calcul a été validée de deux manières complémentaires. L'algorithme a d'abord été contrôlé indépendamment des fragmentations, en utilisant le calcul le plus précis, avec des échanges entre mailles, dans une situation pour laquelle le résultat analytique est connu. Cette version de référence (précise, mais peu performante en temps de calcul) a ensuite été comparée avec l'algorithme complet, de manière à montrer que les gains sont substantiels et la perte de qualité relativement faible. Des outils d'évaluation de la qualité des résultats sont proposés.

## Comparaison avec un calcul analytique

Pour valider l'algorithme par rapport à une référence externe, on a considéré le cas d'une scène pour laquelle le calcul analytique est possible. Il s'agit d'une sphère intégratrice fermée simplifiée, de 10 mètres de rayon, comportant  $N = 5\,000$  polygones, recouverte d'un matériau virtuel, parfaitement lambertien, dont la réflectance est constante ( $\rho = 0,5$ ) pour toutes les longueurs d'onde. Une source isotrope est disposée au centre de la sphère\*\*. Le spectre est échantillonné régulièrement tous les 20 nanomètres. Cette géométrie ne comporte aucun masquage, ce qui permet de valider les calculs photométriques indépendamment de l'algorithme de masquage.

L'éclairement est identique en tout point de la sphère, du fait de la symétrie centrale. On en calcule la valeur théorique, pour l'éclairage direct, avec l'expression :  $E = I/d^2$ , où  $d$  est la distance entre la source et la surface, et  $I$  l'intensité de la source. La valeur simulée est  $E_s = 79,67$  lux, à comparer avec la valeur théorique,  $E_c = 79,58$  lux, soit une erreur de 0,11 %. L'essentiel de l'erreur est dû à une légère approximation des calculs d'angles solides, pour des raisons de rapidité des calculs. On vérifie par ailleurs que le flux diffusé par la source est égal à la somme des flux reçus par les éléments de calcul, puisque l'on est en milieu fermé. Numériquement, l'écart est de 0,12 %.

Chaque élément de surface reçoit\*\*\*, du fait de l'éclairage direct, un flux  $\Phi_0/N$ . Sur ce flux, il rediffuse un flux  $\rho\Phi_0/N$ . Le flux total réémis lors de l'éclairage indirect de premier ordre est donc de  $\rho\Phi_0$ . Lors de l'éclairage indirect de second ordre, ce flux est de  $\rho^2\Phi_0$ , etc. La valeur totale échangée  $\Phi_1$  est donc de :

$$\Phi_1 = \rho\Phi_0 + \rho^2\Phi_0 + \rho^3\Phi_0 + \dots = \rho\Phi_0/(1 - \rho)$$

\* C'est-à-dire que l'énergie est reçue par les mailles et pas par l'agrégat.

\*\* Flux de la source :  $\Phi_0 = 100\,000$  lumens. Spectre d'émission : illuminant D65.

\*\*\* En moyenne, car tous les éléments n'ont pas la même surface.

On a ainsi un flux total  $\Phi = \Phi_0 + \Phi_1$  qui est réparti sur une surface  $S = 4\pi r^2$ . Cela correspond à un éclairement  $E = \Phi/S$  et à une luminance  $L = \rho E/\pi$ , soit numériquement :

$$L = (\Phi_0/(1 - \rho)) \times \rho/4\pi^2 r^2 = 25,33 \text{ cd/m}^2$$

La luminance moyenne simulée est de 25,38 cd/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à un écart de 0,2 % par rapport à cette valeur analytique. D'autre part, l'écart sur  $\Phi$  entre calcul analytique et simulation est de 0,02 %.

## Définition de l'écart entre deux calculs

On a également comparé le calcul utilisant des factorisations (noté, dans la suite, calcul F), selon les principes explicités plus haut, avec le calcul précis, par mailles, validé ci-dessus (noté, dans la suite, calcul M). Cette comparaison porte à la fois sur les gains en temps de calcul et les pertes en précision. Sur ce dernier point, il est nécessaire d'explicitier comment les écarts sont évalués.

Les simulations d'éclairage calculent, pour chaque maille, la luminance perçue par un observateur\*. Pour comparer sur un même site (un tunnel, un giratoire, etc.) les calculs F et M, on s'intéresse à la différence  $\Delta L = L_F - L_M$  entre les deux luminances calculées. Mais pour évaluer la qualité du résultat, il faut savoir si cette différence est perceptible par un observateur. Dans le cas contraire, les deux calculs sont visuellement équivalents.

On dispose pour cela d'un indicateur, le seuil de perception, qui est défini comme la plus petite différence de luminance perceptible pour une luminance d'adaptation  $L_a$  donnée [13]. Cette dernière quantité correspond, lorsque la scène est relativement uniforme, à la luminance de fond sur laquelle on observe un objet. Les valeurs du seuil de perception ont été mesurées expérimentalement par Blackwell [14] à partir d'un très grand nombre d'observations.

Le protocole expérimental de Blackwell, et ceux décrits dans la littérature dans ce domaine, consistent à demander à des observateurs de distinguer deux plages de luminance juxtaposées. Pour comparer deux calculs d'éclairage, le protocole expérimental serait différent : il s'agirait de comparer une luminance  $L_M$ , entourée de son environnement dans le calcul M, à une luminance  $L_F$  entourée du même environnement dans le calcul F. L'observateur devrait observer *successivement* les deux scènes calculées. Pour pouvoir se ramener au protocole de Blackwell [14] et donc utiliser ses résultats, on s'intéresse au problème suivant : un observateur va-t-il distinguer la substitution de  $L_M$  par  $L_F$  dans le calcul M (fig. 5). Le pouvoir comparateur de l'œil étant plus acéré que sa mémoire, on est sûr que si l'écart de luminance  $\Delta L$  est perçu en regardant les deux scènes successivement, il sera perçu également dans l'expérimentation définie par la figure 5. Ainsi, les seuils de détection que l'on utilise sont plus drastiques que les seuils réels.

Le niveau de visibilité  $v_L$  est ensuite défini comme le rapport entre  $\Delta L$  et le seuil de visibilité  $\Delta L_s$ , que l'on peut lire sur la figure 6, construite à partir des données expérimentales de Blackwell. On lit sur la courbe\*\* le seuil différentiel de luminance  $\Delta L_s$  en fonction de la luminance d'adaptation  $L_a = L_M$ .

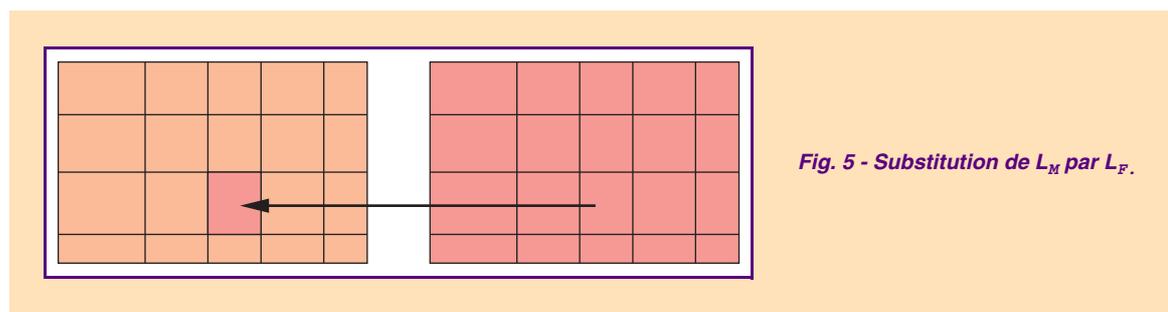


Fig. 5 - Substitution de  $L_M$  par  $L_F$ .

\* Les matériaux étant supposés lambertiens, la luminance est la même dans toutes les directions d'observation.

\*\* On a tracé une enveloppe par défaut à l'aide des droites  $A_1$  et  $A_2$ , de manière à estimer grossièrement (par défaut)  $\Delta L_s$  pour une valeur quelconque de  $L_a$ .

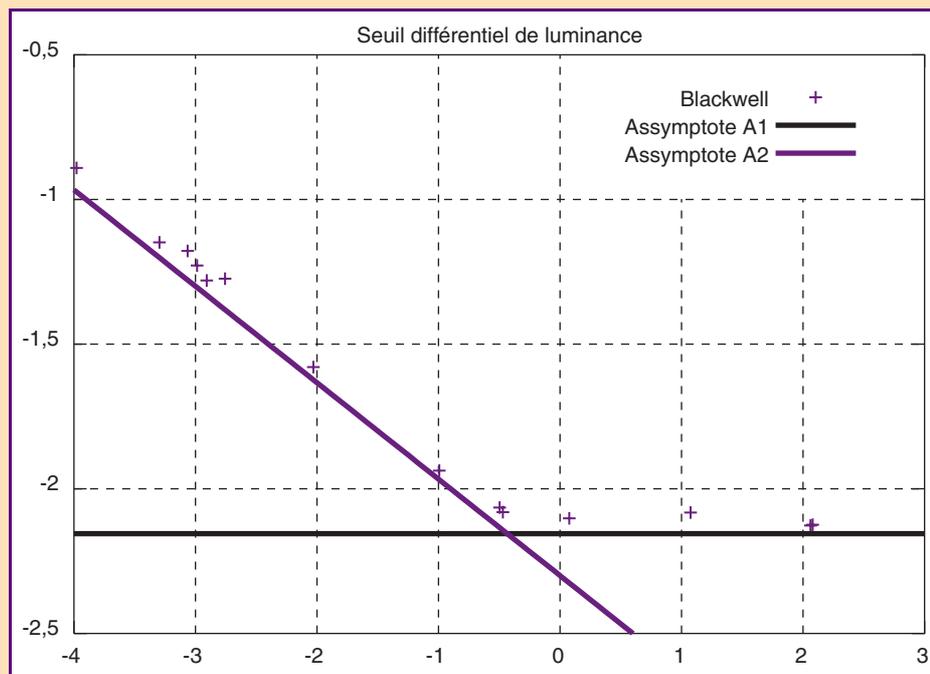


Fig. 6 -  $\text{Log}_{10}(\Delta L_s/L_a)$  en fonction de  $\text{log}_{10}(L_a)$  en  $\text{cd/m}^2$ .

## Évaluation de la qualité des calculs

On utilise trois exemples pour valider les calculs F et évaluer leur qualité. Il s'agit de la sphère intégratrice utilisée précédemment et de deux scènes routières : une portion de tunnel rectiligne (milieu fermé) et un carrefour giratoire (milieu ouvert). Le tableau I précise les principales propriétés géométriques de ces scènes : le nombre de mailles  $N_M$ , le nombre d'agrégats  $N_A$  et le nombre moyen  $\langle |A| \rangle$  de mailles par agrégat.

En comparant les temps entre les calculs F et M (ici sur une station de travail SGI Octane), on peut quantifier (tableau II) le gain en temps de l'algorithme F\*. On a distingué  $G_d$  et  $G_c$ , qui sont

**TABLEAU I**  
Découpage géométrique des scènes

Scène	$N_M$	$N_A$	$\langle  A  \rangle$
Sphère	5 068	1 737	2,9
Tunnel	45 035	5 140	8,8
Giratoire	40 852	2 366	17,3

**TABLEAU II**  
Évaluation du gain en temps de calcul

Scène	$t_d(F)$	$t_d(M)$	$t_c(F)$	$t_c(M)$	$G_d$	$G_c$
Sphère	9 s	9 s	11 mn 48 s	23 mn 32 s	0 %	50 %
Tunnel	52 s	1 mn 7 s	16 mn 50 s	8 h 41 mn	31 %	97 %
Giratoire	51 s	1 mn 14 s	12 mn 58 s	3 h 6 mn	40 %	93 %

\*  $t_d(F)$  et  $t_c(F)$  sont respectivement les temps de calcul direct (éclairage direct) et complet (éclairage direct et inter-réflexions) pour le calcul F.

**TABLEAU III**  
**Évaluation de l'écart entre les calculs F et M**

Scène	Calcul	$\langle L \rangle$	$\langle \Delta L \rangle$	$\Delta L_{\max}$	$v_L$	$P_p$ (en %)
Sphère	Direct	12,70	0	0	0	0
	Complet	25,38	0,027	0,44	1,1	0,2
Tunnel	Direct	5,72	0,005	0,33	2,0	0,5
	Complet	7,33	0,018	0,34	1,1	1,2
Giratoire	Direct	6,52	0,013	0,38	2,5	3,0
	Complet	6,95	0,048	1,14	1,9	12,2

respectivement les gains pour le calcul direct et pour le calcul complet. On observe que le gain est nettement plus important pour le calcul complet, et qu'il est très important pour les scènes routières (supérieur à 90 % pour les scènes considérées).

La contrepartie du gain de temps est un écart, en luminance, du calcul F par rapport à M. On présente (tableau III) la luminance moyenne  $\langle L \rangle$  des scènes\*, l'écart moyen  $\langle \Delta L \rangle$  entre F et M, l'écart maximum  $\Delta L_{\max}$  rencontré dans la scène, la moyenne  $\langle v_L \rangle$  des niveaux de visibilité\*\*, et la proportion  $P_p$  de mailles de calcul pour lesquelles  $v_L > 1$ , c'est-à-dire pour lesquelles l'écart  $\Delta L$  est perceptible.

Pour se rendre compte qualitativement de ce que représente le niveau de visibilité  $v_L$ , il faut préciser qu'il s'agit d'un seuil de détection pour une attention soutenue. Lorsque la tâche demandée à l'observateur est plus complexe, le seuil de visibilité augmente. Par exemple, la valeur de 7 est retenue couramment comme seuil de visibilité en situation de conduite d'un petit obstacle sur la chaussée [15]. Pour le giratoire, le calcul complet conduit à une proportion importante d'écarts discernables (plus de 10 %). Cela doit être relativisé par le niveau très faible de  $\langle v_L \rangle = 1,8$  qui suggère que ces différences sont perceptibles si l'attention est concentrée sur la détection des contrastes, mais pas en situation de conduite, car la tâche de conduite proprement dite absorbe alors l'essentiel de l'activité mentale.

Il n'est pas possible d'évaluer les performances de l'algorithme dans l'absolu, puisqu'elles dépendent à la fois des scènes et des paramètres de calcul retenus. Nous avons néanmoins établi que, pour des paramètres de calcul convenablement choisis, on peut accélérer fortement les calculs (plus de 90 % d'économie pour les scènes routières) avec un impact très limité sur les résultats (moins de 1 % d'erreur en moyenne), et une erreur maximale maintenue dans des marges raisonnables, compte tenu de l'usage qui est fait de ces simulations. En particulier, les écarts sont peu perceptibles si l'on s'en tient à une tâche d'attention soutenue, et encore bien moins si l'on se réfère à une tâche de conduite.

## Détection des ombres

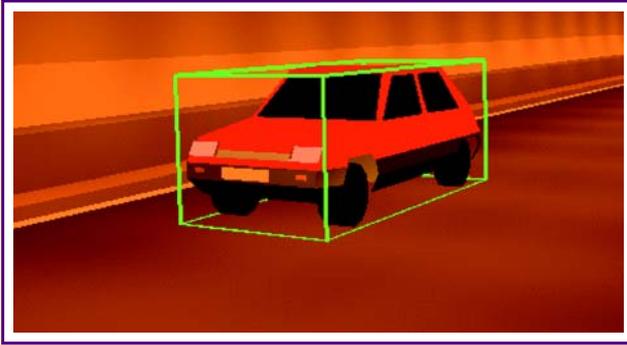
### Principe de calcul

Le calcul de masquage constitue la partie la plus coûteuse en temps de calcul des algorithmes de radiosité. Il s'agit, lors du transfert d'énergie de l'élément  $E_i$  (maille ou agrégat) vers l'élément  $E_j$ , de savoir si une maille  $M_k$  s'interpose entre eux. Si c'est le cas,  $E_j$  est dans l'ombre.

L'algorithme qui a été retenu utilise la structure hiérarchique des données pour réduire les calculs au strict nécessaire. Naturellement, le calcul de masquage n'est fait que lorsqu'il y a un échange d'énergie. D'autre part, le calcul utilise une technique de lancer de rayons qui exploite la structure hiérarchique de la scène pour explorer d'abord les agrégats, et qui ne regarde plus avant que si

\* La luminance moyenne de la chaussée est, pour le giratoire de 1,77 (éclairage direct) et 1,78 (calcul complet) cd/m<sup>2</sup>. Elle est, pour le tunnel, de 8,6 (direct) et 9,0 (complet) cd/m<sup>2</sup>.

\*\* Calculée uniquement sur les mailles pour lesquelles  $v_L > 1$ .



*Fig. 7 - Exemple de boîte englobante d'un agrégat de haut niveau.*

l'agrégat est effectivement susceptible de constituer un obstacle. Enfin, il est possible de différencier plusieurs classes de matériaux à partir de la connaissance *a priori* du fait que certaines surfaces ne sont pas susceptibles de créer des ombres dans la scène (par exemple la chaussée, ou le marquage routier\*) ce qui accélère d'autant l'exploration des obstacles possibles.

Pour tous les éléments de calcul, les mailles comme les agrégats, mais aussi les ensembles de plus haut niveau (surfaces, objets, selon la manière dont la scène est structurée), on peut définir une « boîte englobante », qui est le plus petit parallépipède qui les contient (fig. 7). Cette boîte est utilisée dans les calculs d'intersection. Pour des raisons de rapidité de calcul et de facilité de stockage, la boîte englobante est orientée selon les axes du repère de la scène.

Pour savoir si un obstacle occulte un échange d'énergie entre deux éléments, on considère l'ensemble des éléments de haut niveau de la scène (objets ou surfaces). Pour chaque élément, des rayons sont émis entre le centre de l'émetteur et les centres des mailles du récepteur. Si ce rayon est intercepté par une boîte englobante, l'agrégat correspondant est un obstacle possible. On examine alors ses constituants pour déterminer si l'un d'entre eux intercepte également le rayon (ce n'est pas nécessairement le cas). Si le rayon intercepte effectivement une maille, on dira qu'il y a masquage, et donc qu'il n'y a pas d'échange d'énergie.

Pour ne pas détériorer la forme des ombres, le calcul est redéfini lorsqu'un obstacle est rencontré, de manière à émettre l'énergie vers des mailles plutôt que vers un agrégat. Dans le cas des scènes routières, qui contiennent relativement peu d'obstacles, cette précaution permet de conserver une certaine qualité de calcul sans grande perte de performance.

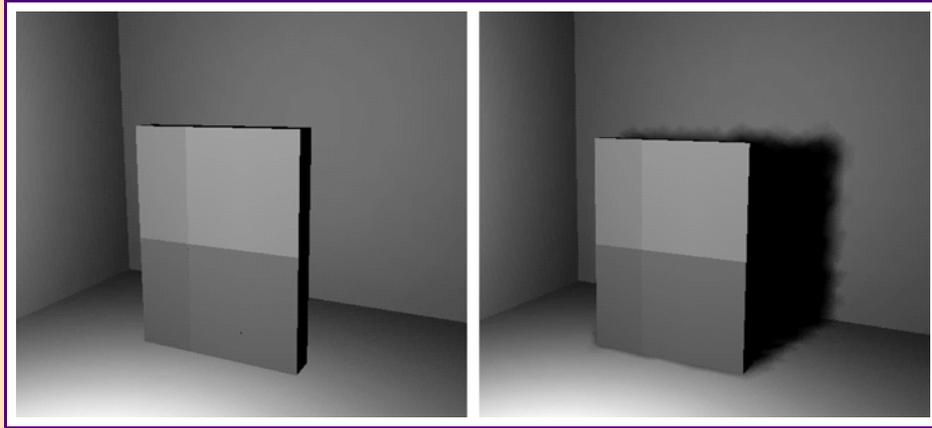
## **Validation du calcul des ombres**

Il est nécessaire de valider séparément le calcul de l'éclairage direct et le calcul complet, car les erreurs éventuelles ne sont pas du même ordre, et nécessitent des scènes différentes pour être mises en évidence de façon simple.

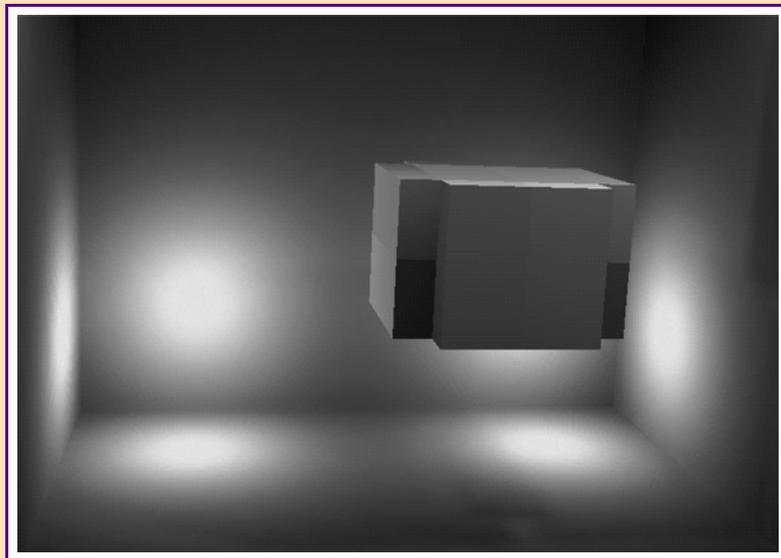
L'éclairage direct est le cas le plus simple. On utilise une scène comportant une source lumineuse, un obstacle et un mur. Deux calculs sont comparés, d'abord sans masquage, puis avec. Dans le premier cas (qui ne correspond à rien de physique), la source éclaire les surfaces qui devraient être dans l'ombre. C'est ce qu'illustre la figure 8a, où la région qui devrait être à l'ombre est éclairée comme le reste du mur. En faisant la différence entre ces deux simulations (fig. 8a et 8b), on visualise et on quantifie l'effet de la procédure de masquage. On a vérifié, d'une part, qu'il n'y a pas de différence entre les deux scènes hors de l'ombre et, d'autre part, que les mailles situées dans l'ombre correspondent à l'emplacement géométrique prévisible que l'on peut calculer analytiquement.

Pour vérifier les calculs de masquage lors de l'éclairage indirect, il faut mettre en évidence les réflexions d'ordre 2 et plus, c'est-à-dire les parties de la scène qui sont à l'ombre après l'éclairage direct, et qui le restent après l'éclairage indirect. Nous avons utilisé pour cela une boîte fermée placée à l'intérieur d'une pièce fermée (fig. 9a). Les sources lumineuses étant hors de la boîte, aucune

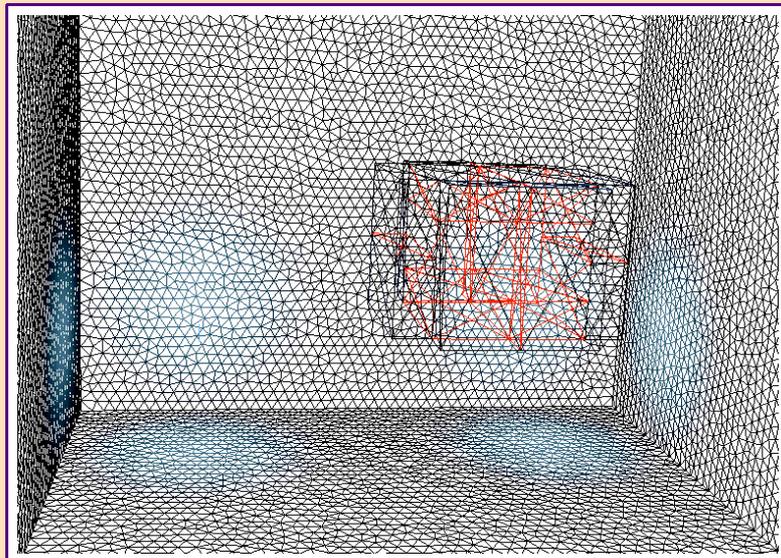
\* En pratique, ces surfaces peuvent être relativement nombreuses dans une scène routière.



*Fig. 8 - Vérification des calculs de masquage (éclairage direct).*



*a) Scène éclairée.*



*Fig. 9b - Vérification des calculs de masquage (arêtes des mailles).*

lumière ne doit entrer à l'intérieur. C'est bien ce que l'on observe sur la figure 9b, où les arêtes sont figurées en rouge lorsqu'elles n'ont pas été éclairées après calcul complet. On constate bien que la lumière n'a pas pénétré dans la boîte lors des inter-réflexions.

## Performances de l'algorithme

On utilise la portion de tunnel décrite à la section précédente, et visualisée ci-dessous (fig. 10), afin d'évaluer le temps de calcul de l'algorithme proposé, compte tenu des calculs de masquage. Il est difficile d'apprécier le gain réalisé entre calcul par mailles (calcul M) et par factorisation (calcul F), car il dépend beaucoup des paramètres (par exemple  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\Omega_1$ ,  $E_1$  ou  $d_l$ ). Cependant, à titre d'exemple, on donne (tableau IV) les temps de calculs sur une station de travail SGI (processeur R10000).

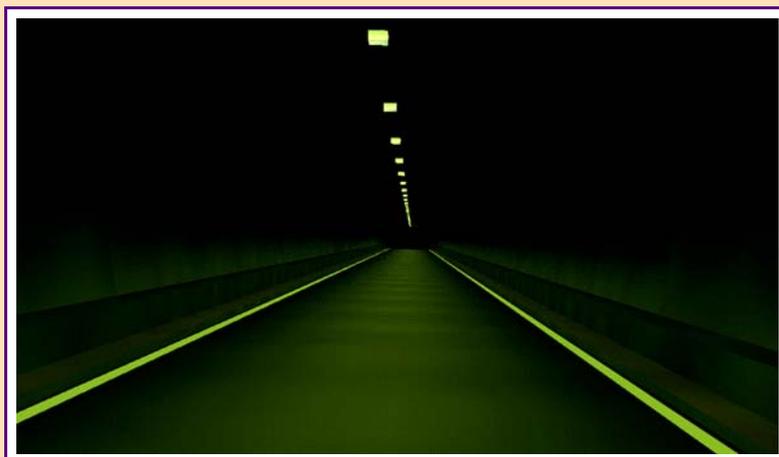


Fig. 10 - Calcul d'éclairage (tunnel).

TABLEAU IV  
Temps de calcul pour le tunnel

$t_d(M)$	$t_d(F)$	$t_c(M)$	$t_c(F)$	$G_d$	$G_c$
27 mn	15 mn	112 h	1 h 37 mn	48 %	98 %

Par ailleurs, pour la boîte de la figure 7, le calcul F permet de réduire de 40 minutes à 10 secondes la durée du calcul complet, avec une erreur moyenne de 1 % en luminance qui n'est pas due aux calculs d'ombrage, mais à l'approximation du calcul F.

## Conclusion

Un nouvel algorithme de calcul d'éclairage a été développé, dont l'intérêt principal pour le LCPC est l'optimisation des performances pour les scènes routières et urbaines. En effet, le découpage des scènes ainsi que les échanges d'énergie sont d'autant plus efficaces que la géométrie possède des caractéristiques spécifiques typiques de ces scènes : grande étendue, scènes ouvertes, faible importance des ombres. De plus, l'éclairage routier et urbain permet, du fait de l'uniformité des éclairagements sur la chaussée et de la régularité des implantations de luminaires de choisir *a priori* les formats de données les plus efficaces. Ce logiciel a été contrôlé et validé, à la fois par comparaison avec des calculs analytiques, et par comparaison avec une version antérieure validée [4] mais moins rapide. On s'est efforcé de séparer, lors de la validation, les différents aspects du calcul : échanges énergétiques, factorisation, masquage. Les résultats paraissent satisfaisants pour les scènes routières et urbaines usuelles, avec des écarts par rapport au calcul exhaustif des échanges lumineux qui restent dans l'ordre de grandeur des erreurs de mesure dans le domaine routier. On peut rappeler, à titre de comparaison, que l'ordre de grandeur des incertitudes de mesures de luminance *in situ* est d'environ 5 à 10 %.



Fig. 11 - Maquette virtuelle pour la simulation de conduite.

Le logiciel issu de ce développement est disponible sur PC (sous environnement Linux) ce qui devrait faciliter son utilisation par des services techniques ou des bureaux d'étude. Des développements sont à l'étude, d'une part pour prendre en compte la luminance directionnelle des matériaux de chaussée (dans les scènes routières) et la texture des matériaux et, d'autre part, pour intégrer ces calculs d'éclairage photométriquement et colorimétriquement réalistes dans des maquettes en temps réel utilisées dans des simulateurs de conduite. C'est en particulier sur la base de ce code de calcul qu'a été réalisée, dans le cadre d'une convention de recherche entre le LCPC et la société Oktal SA, une maquette virtuelle du tunnel de Fourvières (fig. 11) tenant compte du projet d'éclairage [16], qui a été mise en œuvre sur le simulateur de conduite de l'INRETS à Bron.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SILLION F.X., PUECH C., *Radiosity and global illumination*, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, **1994**.
- [2] GLASSNER A., *An Introduction to Ray Tracing*, Academic Press, **1989**.
- [3] HUBERT R., CANESTRELLI M. ET RICHARD J.-P., Le laboratoire de photométrie pour les études de visibilité et la qualité des équipements, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, février **1993**, pp. 61-70.
- [4] BRUSQUE C., CHARLOT B., LOUAGE J. et NGUYEN V., LISE, la synthèse d'image au service de l'éclairage, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, février **1993**, pp. 127-140.
- [5] RONDEAU T., *Contribution à la modélisation des caractéristiques photométriques des matériaux de génie civil pour les calculs d'éclairage*, thèse de doctorat, CNAM/LCPC, **1999**.
- [6] BRÉMOND R., *Définition d'une texture photométriquement réaliste pour les calculs d'éclairage*, V<sup>e</sup> journées de l'AFIG, Rennes, **1997**.
- [7] BRÉMOND R., BOULANGER V., *Simulation de textures photométriquement réalistes pour des applications routières*, Driving Simulation Conference 99, pp. 181-194.
- [8] SMITH B., ARVO J. et GREENBERG D., *A clustering algorithm for radiosity in complex environments*, Conference Graphics Proceedings, Annual conference series, **1994**, pp. 435-442.

- [9] HANRAHAN P., SALZMAN D., AUPERT L., A rapid hierarchical algorithm, *Computer graphics*, 25 (4), **1991**, pp. 197-206.
- [10] SILLION F., A unified hierarchical algorithm for global illumination with scattering volumes and objects clusters, *IEEE transactions on visualisation and computer graphics*, 1 (3), **1995**, pp. 240-254.
- [11] WILMOTT A.J., HECKBERT P.H., GARLAND M., *Face cluster radiosity*, actes du congrès Eurographics Rendering Workshop, **1999**, pp. 175-186, juin **1997**, Springer.
- [12] TURBET J., *De l'analyse à la conception d'algorithmes pour une radiosité hierarchique efficace*, thèse de doctorat, université J. Fourier, Grenoble, **2002**.
- [13] LE GRAND Y., *Optique physiologique*, Tome 2, Masson, **1972**.
- [14] BLACKWELL H.R., Contrast thresholds of the human eye, *Journal of the optical society of America*, Vol. **36**, 11, **1946**, pp. 624-643.
- [15] ADRIAN W., *Visibilit  de cibles, modèles de calcul*, Lux, Vol. **161**, janvier **1991**, pp. 4-11.
- [16] BRÉMOND R., GALL E G., *Realistic lighting rendering for driving simulation*, Driving Simulation Conference, **2001**, pp. 305-316.