

Le LCPC et OKTAL mènent depuis 2000 une collaboration visant à rendre possible la réalisation et l'exploitation de maquettes virtuelles photométriquement et colorimétriquement réalistes, afin de garantir la visibilité et l'ambiance lumineuse lors des simulation sur simulateur de conduite. Durant l'année 2000, une méthodologie à été mise en place permettant la mise en commun des moyens logiciels et des savoirs faire en matière de production et de visualisation de maquette virtuelle (OKTAL) et de calcul d'éclairage et de perception (LCPC). Une application concrète de cette méthodologie a été réalisée sur le tunnel de Fourvières à Lyon dans le cadre du projet PREDIT Tunnel financé par le MENRT et mettant en collaboration ISIS, CNRS, OKTAL et SCETAUROUTE. Ce papier présente le problème de l'éclairage et de la visualisation TR, la méthodologie mise en place et le cas de mise en oeuvre de celle-ci sur le tunnel de Fourvières. Enfin, nous concluons sur les perspectives des travaux futurs à mener.

Position du problème

Motivations

Le LCPC développe des outils de calcul et de visualisation qui sont utilisés dans des applications liées à la sécurité routière: études de visibilité routière (en particulier dans le brouillard), dimensionnement d'installations d'éclairage. Les présentations d'images de synthèse (fixes ou dans un simulateur de conduite) ne sont exploitables dans des études liées à la visibilité que si les observateurs reçoivent des stimuli visuels proches de ceux qu'ils recevraient en situation de conduite réelle. C'est une condition essentielle pour pouvoir observer des réactions comparables aux réactions en situation de conduite.

La visualisation en temps réel d'images de synthèse consiste à recalculer à une fréquence suffisante (de l'ordre de 30 à 60 Hz) une maquette virtuelle (ou scène 3D). La contrainte pour cela est d'ordre matériel : moyen informatique de génération d'images et moyen de restitution d'images (moniteur, écran, casque). La limitation des puissances de calcul de rendu oblige à faire des simplifications : géométrie minimale, utilisation de textures photométriques (assimilées à des décors plans), modèle d'éclairage simplifié, modèle de brouillard limité à l'atténuation, etc. On se limite alors souvent à la visualisation de scènes de jour, les scènes de nuit ou en milieux fermés ne pouvant être restituées correctement (éclairage non uniforme, dynamique importante de luminances). Les outils logiciels destinés à produire des scènes 3D sont aujourd'hui orientés pour ce type d'utilisation.

L'accroissement des puissances de calcul et des capacités mémoires permet aujourd'hui d'envisager de transférer des technologies utilisées hors temps réel dans le monde de la réalité virtuelle. Ceci ne peut se faire qu'en envisageant des simplifications des modèles, des définitions d'algorithmes adaptés aux contraintes de rendu temps réel, des décompositions des modèles afin de prévoir des pré-calculs, etc. L'objectif global des recherches menées par le LCPC et OKTAL est d'améliorer la production de maquettes virtuelles en termes d'ambiance lumineuse et de perception afin de permettre des simulations plus réalistes sous éclairage artificiel de nuit ou en milieu fermé. Ceci permettra d'augmenter le domaine d'application de la visualisation interactive dans les simulateurs de conduite automobile ou ferroviaire et dans les études d'impact d'aménagements routiers et urbains.



Fig. 1 : Base de donnée temps réel: l'entrée du tunnel de Fourvières.

Maquette virtuelle et simulation de conduite

En simulation, aujourd'hui, une image de synthèse TR est calculée à la fréquence d'environ 30 à 60 Hz. Afin d'obtenir une telle fréquence, il est nécessaire d'exploiter au mieux les capacités hardware. Pour cela, on utilise couramment la librairie de rendu Open GL [1] associée à une librairie de plus haut niveau, telle que Performer. Le modèle d'éclairage proposé par Open GL est limité à une implémentation d'un modèle de calcul simple : calcul d'éclairage direct uniquement, composantes diffuse, spéculaire et ambiante, source ponctuelle ou directionnelle, etc. Schématiquement, la scène est composée de surface géométrique habillée de matériaux colorés et de textures photographiques. En pratique, la construction de la scène et le réglage des textures et des matériaux sont réalisés par un infographiste. L'image finale est donc le fruit d'un travail artistique.

Pour contrôler les caractéristiques visuelles des images affichées à l'écran par rapport à ce que l'on voudrait afficher, une série de problèmes se posent: le respect des contrastes et des couleurs, la calibration de l'écran (et sa dynamique), la restitution des textures, entre autres. Nous nous intéressons ici à ce qui nous paraît constituer le problème principal, le respect des contrastes et des couleurs par rapport à la scène réelle.

La modélisation physique des échanges lumineux, avec en particulier les algorithmes de radiativité, est une approche de référence pour obtenir un rendu réaliste dans des images de synthèse [2]. Le LCPC utilise une approche de ce type pour évaluer les installations d'éclairage dans le domaine routier et urbain [3], en calculant en tout point d'une scène les quantités physiques pertinentes pour

les dimensionnements: éclairage, luminance, chromaticité. Ces calculs permettent également de produire des images de synthèse (sur écran) dont le réalisme colorimétrique est satisfaisant, moyennant une calibration de l'écran. Le réalisme de ces images serait susceptible d'améliorer le réalisme d'un simulateur de conduite, puisque les luminances, les couleurs et les contrastes sont respectés sur les images par rapport aux sites réels, mais ce type d'approche est incompatible avec le temps réel. D'une part à cause des temps de calcul, mais également à cause des modes de représentation des scènes, dans lesquelles il est nécessaire de mailler finement les surfaces (comme dans une méthode d'éléments finis), ce qui ne permet pas de les visualiser en temps réel avec les matériels actuels.

Pour résoudre ce problème, une méthodologie d'intégration de calculs d'éclairage photométriquement et colorimétriquement réalistes a été définie [4], dans une chaîne de production de base de données temps réel. Il s'agit d'une première étape, de faisabilité, destinée à isoler les principales difficultés, à proposer des solutions concrètes, et à les mettre en oeuvre sur un exemple.

Méthode

La méthode retenue consiste à traiter les calculs d'éclairage comme un pré-traitement des bases de données. Les scènes issues de ces calculs sont ensuite transformées de manière à pouvoir être gérées en temps réel. Il s'agit, d'une part, d'adapter le format de données aux contraintes du temps réel, d'autre part de tenir compte des caractéristiques propres de l'outil de restitution (écran, simulateur de conduite, etc.). Une difficulté supplémentaire est apparue concernant la taille des scènes, qui s'avèrent trop grandes pour être calculées en une seule fois: il a été nécessaire de les découper en îlots.

Architecture

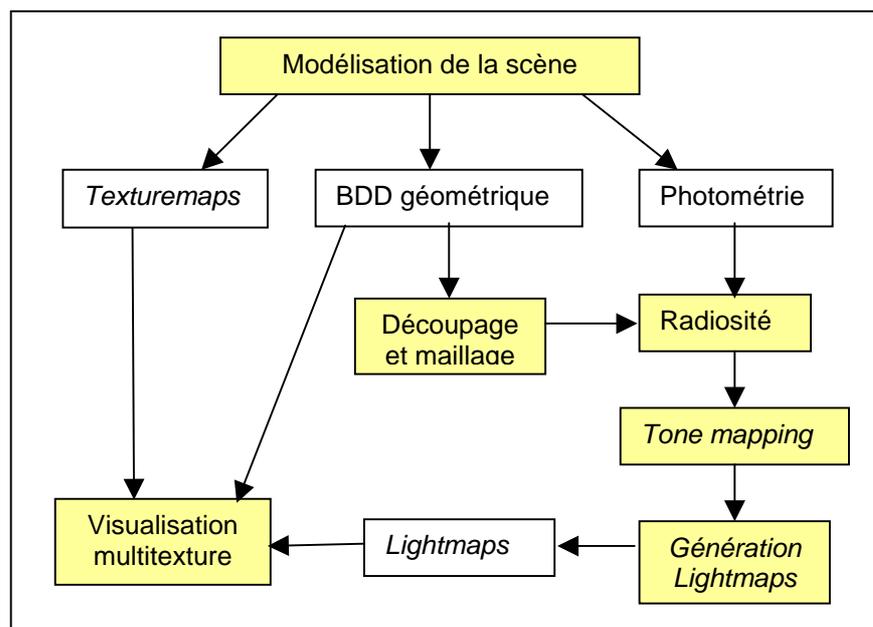


Fig. 2 : Architecture pour la prise en compte de calculs d'éclairage dans une BDD temps réel.

L'ambition de ce travail était de construire des maquettes temps réel opérationnelles, en intégrant autant que possible des outils existants à chaque étape de la mise en forme des maquettes, et en concentrant la valeur ajoutée sur les réelles innovations, ainsi que sur les différentes passerelles nécessaires permettant aux outils existants de communiquer.

Une chaîne de production de maquettes 3D a été définie, selon le schéma décrit en Fig. 2. A partir de la base de données, on découpe la scène (pour des raisons de taille). Chaque sous-scène issue du découpage est ensuite maillée. Le calcul d'éclairage porte ensuite sur chaque sous-scène, en utilisant les données photométriques sur les sources et les matériaux. Les calculs sont ensuite rassemblés et transformés, de manière, d'une part, à simplifier leur représentation (utilisation des *lightmaps* en remplacement du maillage), et à y intégrer les textures d'origine, normalisées, pour tenir compte des variations locales de luminance. On a ainsi une nouvelle base de données qui peut être visualisée en temps réel, comme la première, mais qui tient compte du calcul d'éclairage.

Modélisation

Le processus de modélisation de la scène est identique à la modélisation de la scène pour le TR. On ajoute simplement des informations supplémentaires afin de caractériser les matériaux de manière physique : il s'agit de définir pour chaque surface le matériau associé, et de décrire ses propriétés de réflexion de la lumière en fonction de la longueur d'onde.

Le projet d'éclairage proprement dit est défini par un éclairagiste, en général sur papier. Il s'agit essentiellement de la nature photométrique (flux, spectre et indicatrice) et la disposition géométrique des sources dans la scène. Ces données sont intégrées dans la base de données.

Découpage et maillage

Par ailleurs, les maquettes virtuelles utilisées pour la simulation de conduite ne sont pas à la même échelle que ce qui est accessible aux calculs d'éclairage. Dans le premier cas, on parlera d'un circuit, d'une ville, dans le second d'une rue ou d'un carrefour. Pour résoudre cette difficulté, nous découpons la scène d'origine BDD en sous-scènes dont la taille permet un calcul d'éclairage suffisamment précis. Une zone de sécurité est découpée autour de chaque sous-scène, avec un périmètre suffisant pour prendre en compte les contributions des sous-scènes voisines. Les calculs d'éclairage utilisent la sous-scène et son périmètre de sécurité. Lors de la réunion des calculs des différentes sous-scènes, les calculs sur les périmètres de sécurité ne sont pas pris en compte.

Radiosité

Le calcul d'éclairage proprement dit procède en deux temps. Lors de la phase d'éclairage direct, les contributions des sources sur chacune des mailles sont calculées, pour chaque longueur d'onde du spectre de la lumière visible. Dans un deuxième temps, il est nécessaire de calculer les inter-réflexions (l'éclairage indirect), qui font, par exemple, qu'un plafond est légèrement éclairé, par réflexion de la lumière sur les parois. A l'issue de ces deux étapes, on dispose pour chaque maille de calcul des quantités photométriques nécessaires pour l'étape de visualisation: luminance et

chromaticité¹. L'importance de ce calcul d'éclairage est liée au fait qu'il permet (aux approximations près) de restituer dans la base de donnée finale les contrastes correspondant à la scène réelle. Or la visibilité des objets est directement liée à ces contrastes. Par conséquent, les distances de visibilité, les tâches de détection d'obstacle et d'une manière générale toutes les applications de la simulation de conduite qui mettent en jeu des performances visuelles ont besoin que les scènes modélisées correspondent à ceux des scènes modélisées. C'est une condition nécessaire à la crédibilité des expérimentations.

Restitution

Les calculs d'éclairage sont réalisés en unités physiques (cd/m^2 pour les luminances). Par contre, les bases de données TR utilisent des textures décrites par des valeurs d'adressage (rouge, vert, bleu). Selon l'écran sur lequel se fait la visualisation, la correspondance entre luminances et valeurs d'adressage n'est pas la même. Il est nécessaire de réaliser le calibrage de l'écran de restitution utilisé pour calculer cette fonction de correspondance, afin que les textures calculées correspondent bien aux conditions d'exploitation de la base de donnée.

Un problème supplémentaire se pose, lors de cette conversion, si la dynamique en luminance de l'écran utilisé ne permet pas d'afficher les valeurs calculées. Dans le cas de Fourvières, on se situe en entrée de tunnel aux alentours de 200 cd/m^2 , alors que les écrans standard ne dépassent pas 100 cd/m^2 . Il n'existe pas de solution entièrement satisfaisante pour régler ce problème. Celles qui sont proposées dans la littérature se regroupent sous le nom de *tone mapping*. Il s'agit d'établir une correspondance entre les luminances calculées et les luminances affichées. De nombreux algorithmes ont été proposés dans la littérature, dont les plus satisfaisants s'appuient sur des données psychométriques [5]. La difficulté est que l'écrasement de la dynamique, nécessaire pour des raisons matérielles, peut avoir un impact différent sur les performances visuelles des observateurs selon l'algorithme qui est retenu. Nous avons choisi provisoirement une solution classique, qui consiste à remplacer la luminance L par une luminance de rendu L_r définie par

$$L_r = k L^\gamma$$

Génération des *lightmaps*

A partir des calculs d'éclairage, le problème principal pour la visualisation TR est la quantité énorme de polygones que le calcul a ajouté à la scène. Les hardware sont conçus avec l'idée de traiter une ou plusieurs textures par polygone, et ce en grande quantité. Partant de ce constat, nous proposons de traduire les informations de luminance calculées sur le maillage géométrique de chaque surface en une texture de luminance. Cette texture remplace le maillage ajouté par le calcul d'éclairage. De cette manière, on obtient la même scène TR, mais texturée par les textures de luminance (*lightmaps*).

¹ La chromaticité est une quantité colorimétrique décrivant les couleurs en unités physiques.

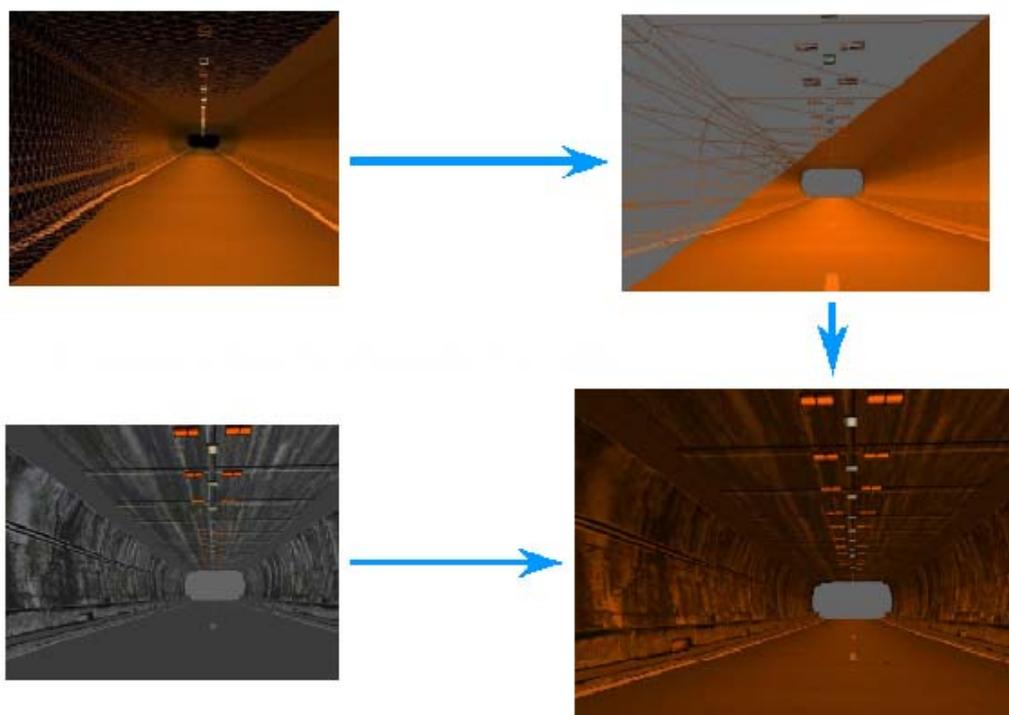


Fig. 3 : Construction des bases de données éclairées à partir des texturemaps et des lightmaps.

Visualisation

Afin de prendre également en compte les textures des matériaux, on les considère comme des variations locales de la luminance. En effet, les calculs d'éclairage, qui permettent de construire des lightmaps, ne tiennent pas compte des variations locales de la luminosité ou de la couleur des matériaux, à une échelle inférieure à celle des mailles. On utilise donc les textures d'origine de la base de données, mais en gardant les contrastes et les couleurs moyennes calculées. Pour cela, on normalise les textures d'origine, de manière à y puiser uniquement l'information de variation relative d'intensité, les valeurs moyennes étant fixées par les lightmaps. On a finalement, pour chaque surface, deux textures: la lightmap, ou texture d'éclairage, qui contient les variations moyennes de couleur et de luminance, et qui provient du calcul d'éclairage; et la texturemap, ou texture de matériau, qui est normalisée, et qui représente la modulation locale d'intensité due à la nature du matériau utilisé.

Le rendu final utilise, pour chaque surface, ces deux textures, avec un rendu en deux passes (ou en une passe multitexturée), dans lequel on multiplie pixel par pixel les deux données, la texturemap et la lightmap. Ainsi, par exemple, si un matériau est uniformément lisse, la texture de matériau ne modifie pas la texture d'éclairage.

Application au tunnel de Fourvières

Contexte spécifique

La méthodologie définie ici a été mise en oeuvre sur une maquette 3D du tunnel de Fourvières, à Lyon², en utilisant une description papier du projet d'éclairage sur les différentes sections du tunnel, fournie par Philips. Le tunnel est d'une longueur de 1800 mètres pour un gabarit 2 voies. Conformément à la réglementation sur les tunnels routiers, l'éclairage est dégressif en entrée de tunnel, puis maintenu à un niveau bas dans la partie centrale, enfin progressif en sortie. Deux types de sources sont utilisées, des ballons fluorescents sur toute la longueur du tunnel, et des sources sodium haute pression pour réaliser les zones d'entrée et de sortie.

Cette maquette a été développée afin d'étudier le comportement des conducteurs relativement à de nouveaux aménagements. Il était donc important que les paramètres géométriques, mais aussi l'ambiance lumineuse et les performances visuelles soient respectées le mieux possible par rapport au site réel.

Une approche classique ne permettrait pas d'effectuer un calcul d'éclairage adapté à un milieu fermé tel qu'un tunnel, du fait principalement du manque de réalisme des photométries des luminaires et de la non prise en compte de l'éclairage indirect. La méthode utilisée, au contraire, permet de respecter l'ambiance lumineuse et les visibilité de manière relativement précise.



a) Texture



b) Eclairage et texture

Fig. 4 : Calcul d'éclairage d'une section de tunnel.

Nous avons vu que le calcul d'éclairage en luminance doit être converti, pour affichage sur un écran donné. Nous avons utilisé, pour cet exemple, le calibrage d'un écran SGI GDM-4011P du LCPC.

Le tunnel de Fourvières a été modélisé par OKTAL pour une utilisation temps réel avec environ 60.000 triangles texturés. Pour le calcul, 720.000 mailles environ ont été nécessaires. Les textures de luminances générées représentent environ 8 Mo.

² Cette maquette avait été développée par Oktal dans le cadre d'un projet PREDIT.

Résultats



Fig. 5 : Résultat du calcul sur le tunnel de Fourvières: section d'entrée.



Fig. 6 : Résultat du calcul sur le tunnel de Fourvières: section de sortie.

Les premiers résultats nous permettent de conclure à la faisabilité de notre objectif, qui était l'intégration des calculs d'éclairage dans des maquettes TR. Les travaux présentés ici devraient pouvoir s'intégrer dans le processus de construction des bases de données utilisées sur simulateur de conduite, au terme de travaux d'industrialisation, qui sont en cours, de la chaîne de calcul basé sur cette méthode. Les principaux points qu'il est nécessaire de développer pour en arriver là sont l'amélioration du modèle de calcul de radiativité, en particulier la gestion des projets de grande taille par un découpage adapté des scènes; l'optimisation des algorithmes de *tone mapping*, de même que la prise en compte de la composante spéculaire direct de l'éclairage et celle de l'éclairage des feux des véhicules [6].

Bibliographie

- [1] J. Neider, T. Davis, M. Woo : *Open GL programming guide*. Addison Wesley, 1995.
- [2] F.-X. Sillion, C. Puech : *Radiosity and global illumination*. Morgan Kaufmann, 1994.
- [3] C. Brusque, B. Charlot, J. Louage, V. Nguyen : *Lise, la synthèse d'image au service de l'éclairage*. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, février 1993, pp. 127-140.
- [4] F. Viénot, A. Monot, *Problèmes de restitution des images de synthèse*, rapport de recherche MNHN, 1999.
- [5] B. Mordelet : *Mise en place d'une chaîne logicielle de production de textures d'éclairage*, rapport de DEA, EMSE/LCPC, 2000.
- [6] P. Lecocq, P. Kelada, A. Kemeny : *Interactive headlight simulation*. Proceedings of DSC 1999. Paris, 1999.