

# Simulation d'éclairage réaliste et dynamique en architecture

par Laurent DA DALTO \*

Grâce à de nouveaux algorithmes performants, il est maintenant possible de visualiser et de modifier en temps réel les différentes simulations d'éclairage pour un bâtiment.

## 1. Simulation d'éclairage

À l'inverse du traitement d'images (qui analyse une image existante pour en extraire une sémantique), la synthèse d'image permet, à partir de la définition d'une scène, de créer des images dites « de synthèse ». Pour cela, il est nécessaire de définir l'ensemble de l'environnement en trois dimensions. C'est le processus de **modélisation**. Une fois la scène définie, il faut appliquer certains algorithmes qui vont simuler l'effet de l'éclairage (naturel et/ou artificiel) sur cette scène et ainsi permettre de la visualiser, c'est la phase de **rendu**. On recrée ainsi une photographie de la scène. Les méthodes actuelles permettent de générer des images de synthèse suffisamment parfaites pour ne pas faire la différence entre la vraie photographie et l'image générée. C'est ce que l'on appelle le **photoréalisme**.

Diverses techniques sont utilisées pour générer ces images. Le principe reste le même : simuler le déplacement de la lumière dans la scène et prendre en compte ses interactions avec les matériaux compo-

sant les objets existants. Le **lancé de rayon**, ou *ray-tracing*, est l'une des premières solutions proposées pour cette simulation. Elle permet de simuler l'**éclairage spéculaire** d'une scène. Les résultats ainsi obtenus produisent des images très « lisses » et sont bien adaptés aux objets métalliques ou aux miroirs.

Dans le but d'améliorer la simulation et de s'approcher un peu plus du photoréalisme, une nouvelle méthode est apparue, directement empruntée au domaine thermique : la **radiosité**. Cette méthode simule l'ensemble des échanges d'énergie entre les différents constituants de la scène. C'est une méthode dite « globale ». Dans un premier temps, elle ne permettait de traiter que les **matériaux lambertiens** (matériaux mats). Cependant, elle fournissait un résultat indépendant du point de vue, ce qui autorisait le déplacement de l'observateur dans la scène en trois dimensions. Finalement, des méthodes intermédiaires, mêlant l'éclairage global (en radiosité) au lancé de rayons, permettent d'obtenir des simulations photoréalistes de l'éclairage d'une scène.

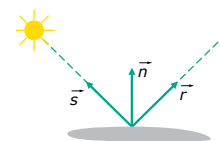
## 2. Environnements virtuels

L'utilisation d'images de synthèse de manière statique est assez limitée. Ses applications se résument aux domaines de la publicité et des films d'animation. Dans ces domaines, on précalcule des images ou des séquences animées sur des ordinateurs puissants. Ces précalculs sont longs mais, dans ce cas-là, seul le résultat final compte et il n'est pas question d'interaction.

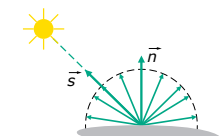
Dans le domaine industriel, ce genre de simulation est d'un intérêt limité et il est souvent nécessaire de proposer des solutions dans lesquelles l'utilisateur peut interagir en temps réel dans la scène en 3D.

C'est le domaine de la **réalité virtuelle**. Ici, la qualité des images n'est pas tant importante que la capacité à se déplacer et à interagir dans la scène. Le but final est bien évidemment de reproduire un environnement réaliste pour « immerger » l'observateur (par l'intermédiaire de casques, de capteurs, d'écrans panoramiques...). Ainsi, progressivement, la simulation d'éclairage a trouvé naturellement sa place dans de tels environnements. Reproduisant

\* Docteur en informatique  
Chef de projet dans l'équipe Réalité virtuelle de CS SI  
laurent.dadalto@c-s.fr  
<http://laurent.dadalto.free.fr>



**Réflexion spéculaire pure.** Les rayons provenant d'une source pointée par  $\vec{s}$  se réfléchissent symétriquement à la normale  $\vec{n}$  dans la direction de  $\vec{r}$ .



**Réflexion lambertienne.** La lumière est réfléchi uniformément dans toutes les directions de l'espace.

## Dans les Techniques de l'Ingénieur :

### Synthèse d'image

[H 3 748] de M. Lucas et E. Languenou

### Réalité virtuelle : concepts et outils

[TE 5 900] de P. Fuchs et G. Moreau

### Réalité virtuelle : interfaces

[TE 5 905] de P. Fuchs

### Influence des environnements virtuels

[TE 5 950] de T. Morineau

### Conception d'environnements virtuels

[TE 5 975] de D. Mellet d'Huart

### Réalité virtuelle : application à la robotique

[R 7 734] de P. Coiffet

### Soleil et architecture

[C 3 310] de F. Bouvier

### Éclairage naturel

[C 3 315] de F. Bouvier

### Éclairage. Données de base

[C 3 341] de M. La Toison

### Éclairage. Matériel et projets

[C 3 341] de M. La Toison

**Diversity**  
http://www.e-divercity.com

## CS SI

http://www.c-s.fr

## Construct IT (CIT)

http://www.construct-it.org.uk

## Spie

http://www.spie.fr

## Evata

http://www.evata.com

## Université d'Aalborg

http://www.civil.auc.dk

## COWI

http://www.cowi.dk

## Université de Salford

http://www.salford.ac.uk/cve

## Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

http://www.cstb.org

## Technical Research Centre of Finland (VTT)

http://www.vtt.fi

## CRS4

http://www.crs4.it

## Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT)

http://www.irit.fr

l'éclairage réaliste, elle participe à recréer l'ambiance qui permettra à l'observateur de s'impliquer réellement dans la scène.

Cependant, et malgré les avancées significatives en matière de capacités de calcul, il est encore difficile de proposer une simulation réaliste (basée sur la radiosité) dans laquelle l'utilisateur pourra, en temps réel, déplacer ou modifier les sources lumineuses et déplacer les objets dans la scène. C'est le but de la méthode qui a été mise en œuvre dans le projet Diversity.

### Projet européen Diversity

Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés dans le cadre d'un projet subventionné par la commission européenne : Diversity. Il fait partie des projets du cinquième PCRD (programme commun de recherche et développement).

Le but initial de ce projet est de fournir un environnement virtuel pour l'architecture et la construction, et ce, pour l'ensemble de ses phases : définition initiale avec le client, design intérieur et extérieur, suivi de chantier et construction.

Ce projet mettra également en œuvre un espace de travail collaboratif permettant à l'ensemble des participants d'interagir (modifiant par là même les méthodes séquentielles actuelles). La simulation d'éclairage fait partie du design et est un élément essentiel du projet.

Ce dernier, initié début 2000 et d'une durée de trente mois, implique plusieurs utilisateurs potentiels venant des différents domaines de la construction : Construct IT (Royaume-Uni, responsable du projet), Spie Tondella (France), Evata (Finlande), Université d'Aalborg (Danemark), COWI (Danemark).

L'application quant à elle est développée par CS SI (France, responsable technique, responsable du module de simulation d'éclairage), l'université de Salford (Royaume-Uni), le CSTB (France), le VTT (Finlande) et le CRS4 (Italie).

Dans ce cadre, CS SI travaille en collaboration avec le laboratoire de l'IRIT à Toulouse pour fournir une simulation intégrant les dernières avancées technologiques en matière de simulation d'éclairage. Le CSR4 quant à lui intègre un algorithme d'optimisation géométrique permettant d'améliorer significativement les temps de calcul.

## 3. Rendu statique

Avant d'introduire la méthode d'éclairage dynamique des bâtiments, il est nécessaire de présenter la méthode sous-jacente qui permet de réaliser un rendu statique des environnements 3D. Cette méthode est basée sur un algorithme de radiosité optimisé pour le traitement des scènes architecturales complexes.

### 3.1 Radiosité hiérarchique

Le principe de l'algorithme de radiosité est d'établir des liens entre chaque élément de la scène. Ces liens vont, par la suite, transporter de l'énergie lumineuse. On conçoit aisément la complexité du système lorsque l'on doit traiter un grand nombre d'interactions.

À ce niveau, deux observations vont nous permettre de simplifier le problème et d'optimiser la recherche de la solution.

■ Dans un premier temps, il est clair que tous les liens ne transportent pas une quantité d'énergie « significative ». Par exemple, les liens associés à une source lumineuse puissante vont être bien plus importants que ceux reliant deux objets dans une partie peu éclairée de la scène. On accorde donc une importance différente aux traitements de ces liens. C'est ce que l'on appelle la **radiosité progressive**. Ainsi, au lieu de tenter de résoudre l'ensemble du système de liens représentant les transferts d'énergie, il est plus efficace de classer les liens par importance et de les traiter dans cet ordre. On travaille alors par *passes*. Les premières passes vont suffire à produire une première estimation du résultat qui pourra être affiné par les passes suivantes.

■ Dans un second temps, on peut travailler par *zones*. En effet, ce sont les fortes variations d'énergie qui doivent être détectées (pour la représentation des ombres en particulier). On peut alors découper un objet en zones dont la variation d'énergie est faible (on parle de *gradient* d'énergie). Bien sûr, initialement, on ne sait pas comment ce gradient va évoluer à la surface d'un objet. Aussi, on considère un découpage régulier grossier ou l'objet dans son ensemble. Par la suite, en fonction de l'énergie reçue sur des points donnés à la surface de l'objet, on peut décider d'effectuer un nouveau découpage pour affiner les résultats. On définit ainsi un lien d'un objet vers un autre qui va progressivement se subdiviser en fonction de l'énergie transportée, créant une hiérarchie de liens. C'est la méthode de la **radiosité hiérarchique**.

Les méthodes de radiosité hiérarchique utilisent des algorithmes bien connus de redécoupage appelés *clustering* [1].

### 3.2 Clustering et graphe de visibilité

Pour la mise en œuvre de la simulation d'éclairage, il est essentiel de prétraiter les scènes de telle sorte qu'elles soient optimisées pour le calcul de la radiosité. Dans notre cas, nous savons que nous avons affaire à des scènes architecturales. Cela permet de poser certaines hypothèses :

- la scène est constituée de pièces ;
- les pièces sont constituées de murs ;
- les pièces sont reliées les unes aux autres par des portes, voire des fenêtres ;
- les pièces ont des liens vers l'extérieur à travers des portes et/ou des fenêtres.

Ces remarques évidentes sont essentielles car elles vont nous permettre de traiter des scènes très complexes.

L'idée initiale est simple : sur des constructions complexes, il est difficile d'effectuer une simulation et une visualisation de l'ensemble des pièces. De plus, l'observateur se trouvant dans le bâtiment ne va voir qu'une pièce et ses voisines. De la même manière, s'il est hors du bâtiment, il ne verra pas l'intérieur de toutes les pièces. Il faut donc, dans un premier temps, « découper » le bâtiment en pièces et, dans un deuxième temps, définir une méthode

permettant de ne traiter que les parties visibles à un instant donné par l'observateur.

### 3.2.1 Définition des pièces

C'est en fait la phase initiale de la méthode de *clustering*. Ainsi, les éléments de base de l'algorithme de radiosité hiérarchique seront les pièces du bâtiment à traiter. Cependant, les modèles fournis ne définissent pas toujours la notion de pièce. En fait, le plus souvent, la scène a été créée par des architectes. Les groupes qui peuvent avoir été faits dans le modèle sont souvent associés à des matériaux de construction (toutes les structures métalliques sont dans le même objet par exemple).

Nous utilisons, dans Divercity, un format de fichier reconnu par les professionnels de la construction : IFC (Industry Foundation Class). Ce format très ouvert peut contenir un grand nombre d'informations sur la structure, la géométrie, le type, etc. des constituants de la scène. Il peut ainsi stocker la notion d'espace associé à une pièce. Si cette information est renseignée, la définition des *clusters* initiaux est grandement simplifiée. Il suffit de collecter l'ensemble des éléments constituant l'enveloppe de chaque pièce pour générer les *clusters*.

Lorsque cette information ne se trouve pas dans le fichier IFC, il faut utiliser une méthode de découpage de la scène qui va détecter les différents constituants (murs, sols, plafonds, meubles...) et définir les espaces (pièces). Ce type de redécoupage est très difficile à automatiser et s'effectue plutôt manuellement. Dans notre cas, nous analysons la scène à partir de ses éléments géométriques de base : les polygones constituant les objets. La première étape consiste à regrouper les polygones coplanaires pour déterminer des plans de la scène (murs, sols, plafonds). Pour cela, nous utilisons la méthode des **espaces de Hough** [2]. Chaque polygone est défini par deux angles (pour sa normale) et une distance à l'origine du repère de la scène. Un simple algorithme de tri permet d'obtenir les polygones coplanaires. Une deuxième étape détermine les plans représentant des murs. Chacun de ces murs peut être associé avec un ou plusieurs murs parallèles dans la pièce adjacente (car ils sont proches les uns des autres). On définit ainsi les murs et les associations entre pièces qu'ils induisent. Enfin, on peut connecter les murs d'une pièce pour en déterminer l'espace et compléter le *cluster* qui lui est associé.

### 3.2.2 Visibilité

Le découpage de la scène en pièces n'est pas suffisant pour permettre d'appliquer la méthode de radiosité à des bâtiments complexes. Il est nécessaire également de **localiser les calculs**. Ainsi, en fonction de la position de l'observateur, on ne traitera que la salle dans laquelle il se trouve et éventuellement les salles qu'il peut visualiser. Il n'est pas nécessaire de mettre à jour les pièces qui sont invisibles.

Pour cela, on définit un **graphe de visibilité** dans lequel chaque pièce est représentée par un nœud ; un lien représente la « possibilité de voir » une pièce à partir d'une autre. La définition d'un tel graphe est relativement simple et plusieurs travaux de recherche ont proposé des solutions à ce problème. Le principe est le suivant :

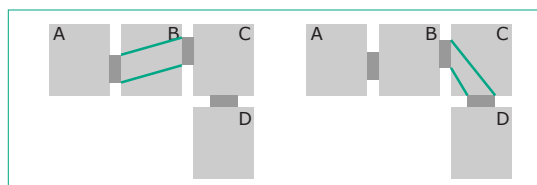


Figure 1 – A voit B et B voit C donc A voit C (à gauche). De plus, B voit C et C voit D donc B voit D (à droite)

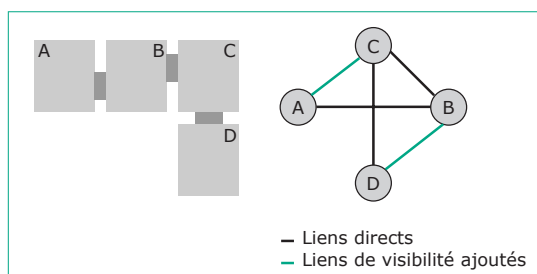


Figure 2 – À la scène initiale (à gauche) est associé un graphe de visibilité (à droite)

— pour chaque pièce adjacente, on crée un lien dans le graphe s'il existe une ouverture entre ces deux pièces (portes ou fenêtres) ;

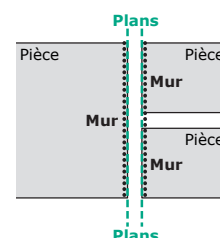
— on itère le calcul pour les pièces voisines de la pièce adjacente en déterminant si la pièce A peut « voir » la pièce C par une ouverture de la pièce B (figure 1).

On détermine ainsi le graphe de visibilité de l'ensemble du bâtiment (figure 2). La simulation est grandement simplifiée et n'est plus dépendante de la complexité du bâtiment. On peut ainsi traiter des scènes très complexes de la même manière que les scènes simples.

Une fois la scène correctement structurée, on peut fournir rapidement les premiers résultats statiques (images de synthèse). Sur un ordinateur personnel (équipé d'une carte graphique récente), on obtient ces résultats de manière quasi instantanée en quelques secondes pour des images plus réalistes.

### 3.3 Éclairage naturel

La représentation des sources lumineuses lors de la simulation d'éclairage (a fortiori dans le domaine architectural) est un paramètre essentiel du réalisme des résultats. Aussi, il est primordial de pouvoir fournir à l'observateur une vision adaptée aux conditions réelles. Cela implique de posséder et de gérer des données précises pour la représentation des sources artificielles (données des constructeurs en général). Mais cela nécessite également la prise en compte des conditions d'éclairage naturel au moment et à l'endroit de l'observation. Cet éclairage, qui matériellement peut être assimilé à l'éclairage de sources artificielles, est dissocié en deux contributions : l'éclairage par le ciel et l'éclairage par le soleil.



Détection des murs et des pièces

#### Bibliographie :

[1] SMITS (B.), ARVO (J.), GREENBERG (D.). – *A Clustering Algorithm for Radiosity in Complex Environments* Computer Graphics Proceedings. Annual Conference Series, 1994 (actes d'ACM SIGGRAPH'94), p. 435-442, 1998.

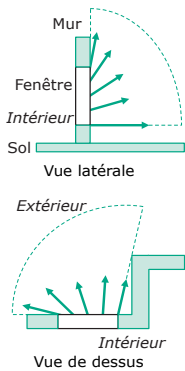
[2] MENEVEAUX (D.). – *Simulation d'éclairage dans les environnements architecturaux complexes : approches séquentielles et parallèles*. Thèse de doctorat, université de Rennes-I, 1998.

[3] PERRAUDEAU (M.). – *Études et recherches : distribution de la luminance du ciel*. Cahiers du CSTB, 2305, déc. 1998.

Il existe des modèles simples [3] permettant de calculer l'énergie émise par différents types de ciels (couvert, partiellement couvert, partiellement clair, clair). Ces modèles intègrent la position de l'observateur sur la Terre ainsi que la date et l'heure de l'observation. Ils ont pu être mis au point grâce à de nombreuses données expérimentales fournies par les centres météorologiques mondiaux. Une fois ces modèles mis en œuvre, il suffit d'intégrer, pour chaque ouverture de la scène (fenêtre ou porte extérieure), la partie d'énergie qu'elle reçoit.

L'ouverture concernée stocke alors cette énergie pour la redistribuer à l'intérieur du bâtiment.

L'éclairage direct par le soleil (dans le cadre de ciels clairs) est plus complexe à prendre en compte. Dans notre modèle de radiosité, nous devons pour cela créer des types particuliers de liens. Ces liens relient un élément de la scène au soleil (s'il peut le voir à travers une ouverture). Alors que, pour les liens classiques, l'énergie à diffuser est stockée sur les éléments, les liens « solaires » sont eux-mêmes porteurs de l'énergie que le soleil émet. De plus, ils ont la particularité d'être orientés dans la même direction. En effet, on considère que l'éclairage solaire est équivalent à un ensemble de rayons parallèles. Ainsi, à partir de ces nouveaux types de liens, nous pouvons intégrer l'éclairage naturel à notre modèle.



**Intégration de l'éclairage naturel par le ciel**

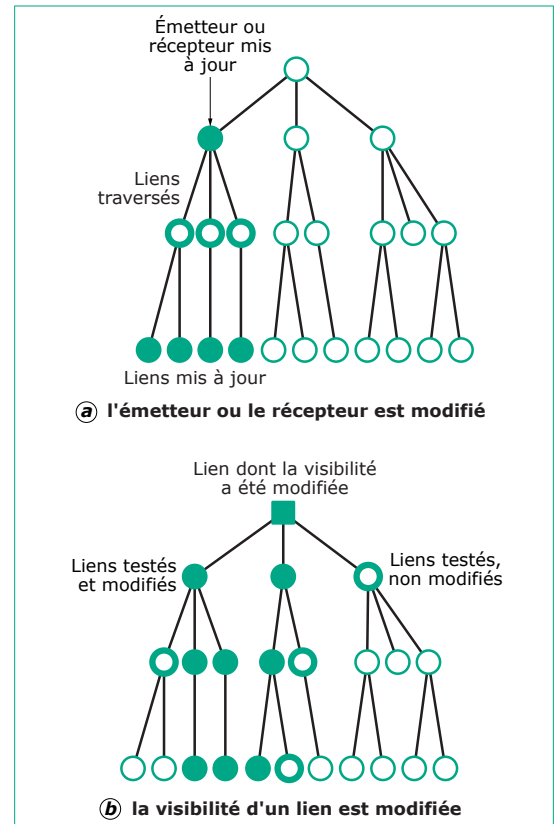
## 4. Simulation interactive

Une fois la première simulation d'éclairage fournie à l'utilisateur, nous devons maintenant lui permettre non seulement d'évoluer dans la scène en trois dimensions, mais aussi et surtout d'interagir avec les différents éléments du bâtiment et en particulier avec les sources lumineuses.

Le principe de la simulation interactive est le suivant :

- l'utilisateur déplace, supprime, ajoute ou modifie un objet ou une source lumineuse dans une pièce ;
- l'application lui fournit une première approximation du résultat visuel en moins de 3 s. C'est ce que l'on appelle le *temps interactif*, proche du temps réel ;
- alors que l'utilisateur continue à se déplacer dans la scène et à modifier ses constituants, la solution initiale est affinée et l'éclairage est mis à jour progressivement sans bloquer l'observateur.

Ces contraintes nécessitent de mettre en œuvre des méthodes de mise à jour rapides et efficaces. L'une des contraintes induites est que l'utilisateur ne peut pas déplacer de structures (murs, sols...) sans devoir attendre un recalcul complet de la solution (qui peut prendre plusieurs minutes). Pour prendre en compte le déplacement d'un objet ou d'une source lumineuse, nous devons déterminer quels sont les liens concernés par cette modification dans l'algorithme de radiosité hiérarchique, les mettre à jour (par là même, modifier la structure hiérarchique) et fournir une nouvelle simulation de l'éclairage.



**Figure 3 – Mise à jour de la hiérarchie de liens**

### 4.1 Détection des liens à modifier

Comme nous l'avons vu précédemment (§ 3.1), la méthode de radiosité hiérarchique produit une hiérarchie de liens représentant l'énergie transférée d'un élément à un autre (on parle d'*émetteur* et de *récepteur*). Lorsqu'un élément de la scène bouge (l'ajout et la suppression se traitent de la même manière qu'un déplacement), il faut déterminer quels sont les liens à mettre à jour. Deux cas peuvent être distingués :

- l'émetteur ou le récepteur du lien bouge ;
- un objet (un meuble par exemple) modifie le lien existant entre un émetteur et un récepteur.

Le premier cas est simple à traiter car il suffit de situer l'objet modifié dans la hiérarchie des liens et de mettre à jour ce lien et tous ses fils (figure 3a). La modification du matériau d'un objet et celle de l'intensité d'une source lumineuse seront traitées exactement de la même manière.

Le second cas est plus complexe. En effet, il faut déterminer si la « visibilité » entre l'émetteur et le récepteur a été modifiée. Pour cela, on détermine l'espace de vision défini par l'émetteur et le récepteur. Si l'objet en mouvement sort ou entre dans cet espace de vision, le lien est modifié – car la quantité d'énergie transportée n'est plus la même si

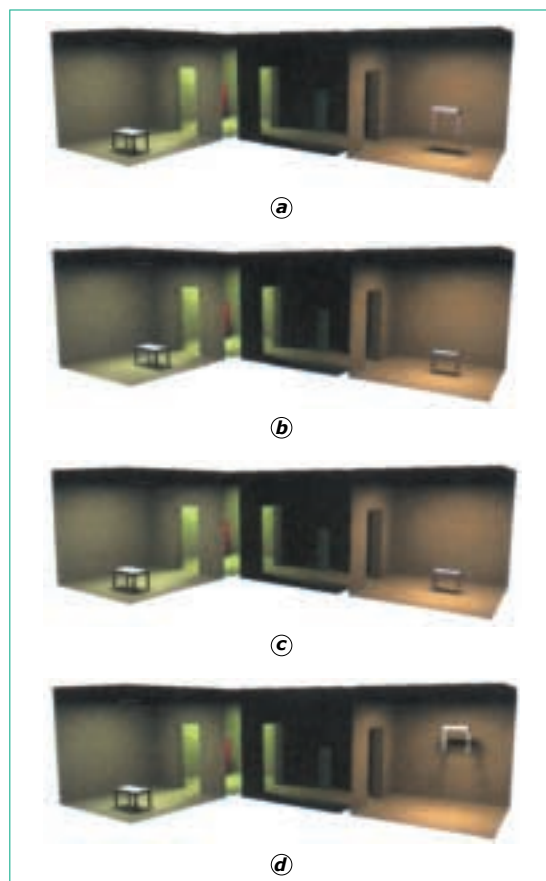


Figure 4 – Séquence d'éclairage interactif sur une scène simple

la visibilité change. Il faut ensuite répéter ce test pour tous les fils du lien intersecté (figure 3b).

## 4.2 Calcul de la nouvelle solution

Le calcul de la nouvelle solution de simulation d'éclairage requiert la mise à jour de la hiérarchie en fonction des modifications induites par le mouvement. On doit ainsi créer de nouveaux liens si nécessaire (là où les gradients sont devenus trop forts) ou supprimer les liens inutiles (si ces forts gradients disparaissent).

Une fois la nouvelle hiérarchie établie, il suffit de remonter l'énergie stockée dans les liens feuille de l'arborescence pour mettre à jour l'ensemble de l'arbre (c'est l'algorithme de *push-pull*). Cela fournit une nouvelle solution qui peut être immédiatement visualisée par l'observateur.

La visualisation de la simulation d'éclairage dans la scène en 3D s'effectue de deux manières différentes :

- pour les **grandes surfaces** (murs, sols...), on définit une texture lumineuse (un calque) que l'on vient plaquer sur le mur existant ;

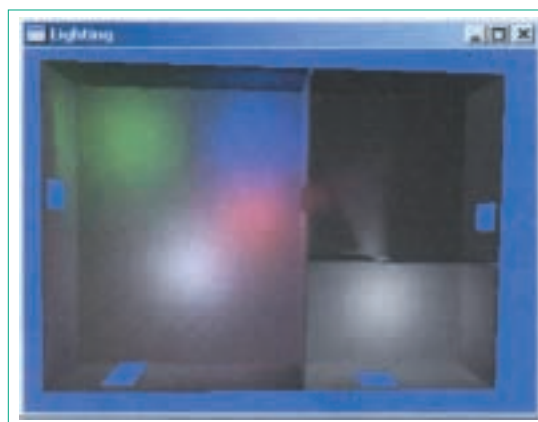


Figure 5 – Simulation d'éclairage d'une scène simple avec un éclairage complexe



Figure 6 – Simulation d'éclairage d'une étude de cas réelle (dans le cadre de Divercity)

- pour les **objets plus petits** (fournitures en général), on modifie directement la couleur de l'objet en fonction de son éclairage (en mémorisant ses caractéristiques initiales).

## 5. Résultats

Ces travaux (figures 4, 5 et 6), menés dans le cadre du projet européen Divercity, ne sont encore qu'une démonstration de la capacité d'une telle méthode. Le projet fournit des études de cas sur lesquelles cette simulation est testée. Les premiers résultats, sur des scènes simples, sont suffisamment concluants pour envisager de poursuivre ce développement dans le but d'industrialiser un tel produit. Plusieurs partenaires dans le domaine de l'architecture et de la construction ont déjà déclaré leur intérêt à être partie prenante d'un tel projet.

Les tests sur les temps de calcul de la partie dynamique de cette méthode sont peu précis. En effet, cela dépend fortement de la complexité de la pièce mais aussi des modifications induites par le déplacement.

Résultats obtenus sur PC équipé d'un **processeur Intel PIII 600 MHz** et de **512 Mo de mémoire vive**. La mise en œuvre de la simulation d'éclairage requiert en général moins de **60 Mo de mémoire vive**.



ment d'un objet. Par exemple, sur la figure 4, le déplacement de la table (figure 4a vers figure 4b) est plus coûteux en temps de calcul que son déplacement des figures 4c vers 4d. En effet, dans le premier cas, la table est directement éclairée par deux sources lumineuses. Le tableau 1 présente les temps de calcul pour les déplacements présentés figure 4 selon que l'on désire un résultat précis ou plus approximatif.

**Tableau 1 – Temps de calcul**

Modification	en haute résolution	en basse résolution
4a → 4b	1,25 s	0,107 s
4b → 4c	1,09 s	0,110 s
4c → 4d	0,85 s	0,093 s

## 6. Conclusion

Nous venons de présenter une nouvelle méthode issue des dernières avancées dans le domaine de la recherche, permettant de simuler l'éclairage d'environnements 3D dans le domaine architectural. De plus, cette méthode permet la mise à jour interactive

des objets et des sources lumineuses de la scène. Les progrès autant matériels que logiciels permettent d'envisager l'industrialisation d'une telle méthode à court terme.

Cette solution, en cours de validation dans le cadre du projet européen Divercity, sera fort probablement mise en œuvre avec l'appui de grands groupes de la construction et de l'architecture en Europe. Plusieurs autres domaines sont d'ores et déjà de potentiels utilisateurs d'une telle technologie, par exemple les galeries d'art pour la définition de la disposition du système d'éclairage.

## Bibliographie

- [1] SMITS (B.), ARVO (J.) et GREENBERG (D.). – *A Clustering Algorithm for Radiosity in Complex Environments* Computer Graphics Proceedings. Annual Conference Series, 1994 (actes d'ACM SIGGRAPH'94), p. 435-442, 1998.
- [2] MENEVEAUX (D.). – *Simulation d'éclairage dans les environnements architecturaux complexes : approches séquentielles et parallèles*. Thèse de doctorat, université de Rennes-I, 1998.
- [3] PERRAUDEAU (M.). – *Études et recherches : Distribution de la luminance du ciel*. Cahiers du CSTB, 2305, déc. 1998.