

## Chapitre 8

# Conclusion

Nous avons décrit dans cette thèse les recherches que nous avons menées pour permettre le ré-éclairage et la remodelisation de scènes réelles d'intérieur, dans des temps *interactifs*. Pour chacune des nouvelles méthodes présentées, nous nous sommes appliqués à utiliser des données simples et à développer des algorithmes interactifs, tout en conservant l'aspect qualité et réalisme de l'éclairage.

Ce travail combine de nombreux domaines de la synthèse d'images, comme la simulation interactive de l'éclairage, l'illumination inverse et l'éclairage commun pour la réalité augmentée. Dans le chapitre 2, nous avons décrit brièvement les méthodes de simulation de l'éclairage ainsi que chacune des notions permettant de comprendre les différentes méthodes existantes pour l'illumination inverse et l'éclairage commun. Il y a peu de travaux sur le ré-éclairage, qui est un problème difficile. Les méthodes de ré-éclairage de la littérature sont pour l'instant loin d'être interactives. Pourtant pour de nombreuses applications, l'interactivité, voir le temps réel, sont indispensables. Nous nous sommes donc fixé comme objectif de développer des méthodes permettant un ré-éclairage de qualité dans des temps interactifs.

Nous avons décrit dans le chapitre 3 la mise en place nécessaire à nos recherches. Les méthodes que nous proposons utilisent en effet une représentation géométrique des scènes réelles, obtenue par des outils de capture et de reconstruction. Nous avons expliqué chacune des étapes ainsi que les difficultés rencontrées lors de ce travail d'acquisition. Nous espérons que ce chapitre servira de point de départ à d'autres chercheurs travaillant sur des problèmes similaires.

Nous avons présenté deux nouvelles méthodes de ré-éclairage et de remodelisation. Pour chacune des méthodes, nous avons d'abord montré qu'elles pouvaient être utilisées avec des données d'entrée simples. Nous avons ensuite montré que nous pouvions améliorer la qualité des données, et ainsi améliorer la qualité des résultats. Cette extension nécessite cependant une phase de capture et de préparation plus importante. Les résultats montrent que nous avons atteint nos objectifs, qui étaient de permettre à un concepteur d'intérieur de manipuler virtuellement et interactivement un environnement réel, après une séance de capture simple.

## 8.1 Contributions

Dans cette thèse, nous avons apporté trois contributions principales : deux méthodes de ré-éclairage et de remodelisation interactives, et une méthode de calibrage photométrique adaptée à des données fournies par du matériel non spécialisé. Les méthodes ont été comparées dans le chapitre 7.

### 8.1.1 Méthode de ré-éclairage basée sur la connaissance d'un éclairage unique

L'objectif de la première méthode développée est de permettre un ré-éclairage de qualité, pour une scène réelle connue d'après une seule photographie. La résolution du problème est basée sur les algorithmes de radiosité hiérarchique. Grâce aux méthodes de radiosité, on peut simuler un éclairage global de qualité, dans des temps interactifs en utilisant des méthodes incrémentales. De plus, ces méthodes de radiosité nous permettent d'utiliser le matériel graphique, qui fournit un affichage rapide et quasiment indépendant de la résolution de l'image produite. Ces méthodes d'éclairage commun ne permettent cependant pas tels quels le ré-éclairage des scènes réelles, car l'éclairage original y est perceptible.

La solution que nous avons proposée est de produire une nouvelle représentation texturée de la scène réelle correspondant à un éclairage non bloqué par des objets réels, c'est-à-dire sans ombre. Pour modifier la représentation initiale de la scène réelle, nous délimitons d'abord de façon précise les régions à modifier, avec un nouveau critère de raffinement associant la couleur de texture attendue aux valeurs de visibilité par rapport aux sources de lumière. Nous calculons un facteur de modification à partir des équations de radiosité. Pour corriger d'éventuelles erreurs lors de la modification, nous appliquons ensuite un autre facteur de correction basé sur la couleur désirée.

Cette représentation sans ombre sert de base lors de la manipulation de la scène. L'éclairage est simulé et affiché en modulant la représentation sans ombre par un facteur d'affichage. Ce facteur a pour effet d'assombrir les régions d'ombre, et d'éclaircir les régions recevant plus de lumière qu'initialement. En utilisant des méthodes adaptées aux algorithmes de radiosité, nous pouvons modifier interactivement l'éclairage original, en modifiant l'intensité des sources de lumière ou en insérant de nouvelles lampes virtuelles. Nous pouvons également insérer des objets virtuels, et les déplacer en temps interactif (en trois images par seconde pour des scènes typiques).

### 8.1.2 Méthode de ré-éclairage basée sur la connaissance de plusieurs éclairages

La première méthode développée est basée sur la connaissance d'un seul éclairage. Comme la connaissance initiale est limitée, l'estimation des propriétés radiométriques est approximative. Ces approximations sont compensées par le fait que le nouvel éclairage simulé est une correction de l'éclairage original.

Nous voulions avoir une meilleure estimation des paramètres radiométriques, pour obtenir des solutions indépendantes de l'éclairage original. Pour cela, nous avons utilisé plusieurs photographies, représentant la même scène réelle sous des éclairages différents. Alors que la géométrie de la scène est simplifiée, nous retrouvons une réflectance diffuse plus

fiable pour chaque objet de la scène. Nous calculons pour cela, pixel par pixel, une estimation de la réflectance pour chacune des photographies. Une réflectance finale est ensuite calculée en pondérant chacune des réflectances par un coefficient reflétant sa validité. Une réflectance est considérée valide, si elle n'est pas dans une région d'ombre sur l'image originale et si sa valeur n'est pas trop éloignée des autres réflectances.

Pour avoir une simulation de qualité tout en étant efficace, nous utilisons une structure de données par pixel pour calculer l'éclairage direct, et une solution de radiosité pour calculer l'éclairage indirect. En exploitant l'association des deux structures, nous avons développé des algorithmes interactifs pour modifier l'intensité des lampes, ajouter de nouvelles sources virtuelles, ajouter et déplacer des objets virtuels. Nous pouvons aussi enlever des objets réels, en comblant les régions précédemment masquées par des morceaux de textures générées à partir des textures de réflectances (indépendantes de l'éclairage). Nous avons également montré que nous avons la possibilité de déplacer des objets réels. La rapidité de la mise à jour lors de modifications peut être accélérée en parallélisant les calculs.

### 8.1.3 Calibrage photométrique

La qualité des résultats obtenus peut être améliorée par un pré-traitement des données photographiques. Nous avons étudié les différentes étapes de la phase d'acquisition pour mieux calibrer les données. Nous avons adapté une méthode de création d'images de luminance à partir de photographies, pour un appareil photographique dont le contrôle manuel est limité.   la fin de ce processus, l'information de couleur de ces images n'est pas limitée par des saturations lumineuses, et les couleurs sont indépendantes de la fonction de la caméra.

Les images ainsi obtenues servent à créer de nouvelles textures pour la première méthode. Les résultats obtenus après ces différentes étapes de calibrage contiennent moins d'artefacts.

Pour pouvoir utiliser les images de luminance dans la deuxième méthode, il faut d'abord les recalcr les unes par rapport aux autres, car l'appareil photographique choisit automatiquement un temps d'exposition de référence. Le recalage est fait en modulant les images de luminance par un facteur de correction, estimé par des équations de radiosité. Ces nouvelles images ont des valeurs de luminance plus cohérentes entre elles. Enfin, nous avons mesuré les propriétés de la lampe utilisée dans la deuxième méthode, en vérifiant sa propriété diffuse, et en mesurant son spectre. Ces différents calibrages donnent une meilleure qualité des données. Nous avons ainsi pu améliorer la fiabilité de la réflectance estimée, en itérant le processus d'estimation.

## 8.2 Perspectives

Les méthodes que nous avons développées permettent le ré-éclairage de scènes d'in-t rieur. Dans cette thèse, nous ne prenons en compte que les propriétés diffuses. De plus, la scène ne peut être visualisée que depuis un point de vue fixe.

### 8.2.1 Spécularité

Dans ce document, nous avons plusieurs fois noté la restriction de nos méthodes aux scènes aux propriétés diffuses. Nous aimerions étendre les méthodes que nous avons proposées aux objets spéculaires et aux lampes directionnelles.

#### Effets spéculaires

##### *Première méthode de ré-éclairage*

Retrouver un terme spéculaire pour les surfaces réelles dans la première méthode de ré-éclairage (voir chapitre 4) nous semble délicat si nous n'utilisons pas plus de données photographiques. En effet, depuis une seule photographie représentant l'éclairage, nous ne pouvons pas prédire si les différences de couleurs sont dues à une tache de spécularité ou à une variation de texture. Pour déterminer la spécularité des objets, une première solution serait de faire intervenir l'utilisateur. Il pourrait définir si une surface est spéculaire ou non, et ajuster à la main une composante spéculaire. On pourrait également prendre plus de photographies depuis des points de vue différents, et comparer les différentes textures des objets. Ces composantes spéculaires pourraient être ajustées en utilisant un algorithme équivalent à celui de Debevec [Deb98]. Pour effectuer le rendu de ces surfaces spéculaires, nous pourrions utiliser une méthode s'appliquant aux solutions de radiosité comme celle de Stamminger *et al.* [SSG<sup>+</sup>99], ou superposer une solution de lancer de rayons spéculaire, étant donné que le point de vue est fixe.

##### *Deuxième méthode de ré-éclairage*

Si nous voulons effectivement prendre en compte les effets spéculaires dans le système d'éclairage présenté au chapitre 5, il faudra faire attention à ce que nos données soient suffisantes, et que la capture soit orientée dans ce sens. En prenant plus de photographies, l'estimation des réflectances pourrait se faire en utilisant une méthode similaire à celle de Yu *et al.* [YDMH99]. Dans un premier temps, nous pouvons limiter le rendu aux effets spéculaires directs et isotropiques. Le rendu pourrait se faire pixel par pixel en stockant la composante spéculaire associée à chaque pixel de l'image dans la structure de données associée à l'éclairage direct. Il serait cependant préférable d'inclure des effets également dans l'éclairage indirect. Comme pour la première méthode, une solution grossière pourrait être réalisée en utilisant par exemple les algorithmes de Stamminger *et al.* [SSG<sup>+</sup>99].

Pour chacune des intégrations des effets spéculaires, il faudra veiller à ce que la scène soit suffisamment bien modélisée pour que les effets soient corrects. Dans les reconstructions actuelles, la géométrie est très approximative, notamment pour les surfaces courbes. Ceci n'est pas perceptible dans les scènes actuelles, où ces approximations sont compensées par les textures. Par contre, en simulant des effets spéculaires, ces erreurs dans la géométrie seraient plus perceptibles.

### Lampes directionnelles

Nous aimerions aussi adapter les deux méthodes aux lampes directionnelles, très présentes dans la réalité. Nous avons décrit dans la section 6.3.2 un processus pour vérifier l'émission diffuse des lampes. Ce processus pourrait être exploité pour déterminer les propriétés directionnelles des lampes. Il faudra ensuite prendre en compte cette propriété directionnelle pour l'estimation des réflectances, et dans la simulation de l'éclairage, en utilisant un échantillonnage des lampes approprié.

#### 8.2.2 Changement de point de vue

Dans nos systèmes actuels, l'utilisateur ne peut pas changer de point de vue. Nous pouvons imaginer combien il est important de pouvoir se déplacer pour se rendre compte des modifications et des effets d'éclairage.

Pour les deux méthodes de ré-éclairage que nous avons présentées, le déplacement du point de vue nous paraît un problème difficile. Pour chacune des méthodes, on pourrait appliquer les mêmes algorithmes pour différents points de vue. Une méthode d'interpolation, ou une structure de textures comme dans Debevec *et al.* [DBY98] pourraient être utilisées pour le rendu. Cette approche nous paraît cependant trop lourde et nous aimerions développer de nouveaux algorithmes pour résoudre le problème. De plus, elle ne résout pas le problème de modélisation supplémentaire qui sera inévitablement nécessaire.

En ce qui concerne la première méthode, nous pourrions travailler avec des textures indépendantes du point de vue pour retrouver les propriétés radiométriques. Le rendu classique ne serait pas suffisant avec de telles textures, qui ont tendance à être un peu floues et à ne pas représenter correctement les effets de parallaxe, lorsque tous les objets de la scène ne sont pas modélisés. Il pourrait être corrigé pour chaque point de vue, en utilisant les textures dépendantes du point de vue original (non modifiées) pour rendre les effets de perspectives.

#### Nouvelle solution

Au lieu d'étendre la deuxième méthode, nous pensons qu'une nouvelle voie à explorer serait de combiner différentes techniques existantes. Pour retrouver les propriétés de réflectance des surfaces pixel par pixel, les algorithmes de Yu *et al.* [YDMH99] pourraient être appliqués. Le rendu pourrait être réalisé en combinant une méthode de lancer de rayons dynamique, comme celle proposée par Walter *et al.* [WDP99], avec une solution de radiosité pour l'éclairage indirect, comme nous le faisons dans notre méthode. Le rendu dynamique de Walter *et al.* n'est cependant pas de qualité suffisante pour un rendu à chaque image en temps interactif, et la vitesse de mise à jour dépend de la taille de l'image.

#### 8.2.3 Scènes d'extérieur

Nous avons présenté dans le chapitre 2 des méthodes permettant le ré-éclairage de scènes d'extérieur. Ces méthodes sont cependant limitées par la difficulté de l'estimation

de la réflectance pour de tels environnements, éclairés par le soleil et par le ciel. Permettre un ré-éclairage de qualité pour des environnements extérieurs est un problème difficile, à la fois à cause de la complexité de l'éclairage, mais aussi à cause de la complexité de la géométrie et des réflectances des environnements. Nous aimerions cependant trouver des solutions pour adapter nos systèmes à des scènes d'extérieur, en prenant en compte la possibilité d'utiliser des solutions de radiosité en extérieur comme par exemple celle de Daubert *et al.* [DSSD97].

#### 8.2.4 Vers le temps réel...

Nous prévoyons de nombreuses applications, encourageant la poursuite de nos recherches. Les applications sont diverses, comme en urbanisme architectural, en cinéma ou en réalité augmentée.

Un premier exemple d'application est l'aménagement de l'urbanisme, où un architecte par exemple voudrait se rendre compte de l'impact sur l'environnement de la construction d'un nouveau bâtiment.   partir de photographies, il pourrait virtuellement détruire les anciennes constructions et les remplacer par des nouvelles. Il étudierait à la fois comment les constructions s'intègrent à l'environnement existant, et quel serait leur impact sur l'éclairage. Il serait utile de visualiser si les bâtiments reçoivent de la lumière du soleil, ou si ils en empêchent d'autres d'être suffisamment éclairés.

Les méthodes de modification des environnements existants peuvent également intéresser les cinéastes. Imaginons qu'un réalisateur veuille faire un film sur le début du siècle. Il pourrait tourner son film dans un environnement actuel. Ensuite, le film pourrait être modifié en enlevant des lampadaires, des voitures actuelles, ou une statue récente. Les effets d'éclairage seront correctement modifiés. De telles manipulations sont déjà réalisées mais nécessitent un travail pénible et manuel de retouche d'image. Elles seraient facilitées par un processus plus automatique.

Enfin, nous aimerions aller vers des systèmes de réalité augmentée et de réalité virtuelle, où un utilisateur en immersion pourrait modifier virtuellement la scène réelle. Il pourrait entrer dans une pièce, et mettre des lunettes d'immersion. Il faudrait qu'il croit qu'il continue de voir la réalité, alors qu'il ne verrait qu'une représentation virtuelle de la scène réelle. L'utilisateur pourrait alors manipuler virtuellement l'environnement et son éclairage.