

# Résumé de la thèse de doctorat

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

■

**Discipline :** Informatique

**Présentée par :** Frédéric Larue

**Titre :** Numérisation de pièces d'art en termes de forme et d'apparence pour la visualisation réaliste en synthèse d'images

**Unité de recherche :** UMR 7005  
LSIIT

**Directeur de thèse :** Jean-Michel Dischler

**Grade Localisation :** Professeur des universités  
ULP

## Introduction

Depuis maintenant plusieurs années, l'archivage numérique est devenu une préoccupation majeure dans de nombreux domaines, et ce principalement grâce au développement et à la popularisation de l'outil informatique. Le domaine de l'art n'a pas échappé à ce phénomène, pour des raisons évidentes de préservation du patrimoine, mais également de communication et de diffusion de l'héritage culturel. De nombreux musées sont en effet dans l'incapacité d'exposer la totalité de leurs collections, et l'apport de solutions multimédia par le biais de copies numériques fidèles d'œuvres d'art présente donc un intérêt significatif.

Une numérisation en ce sens passe par l'acquisition de deux informations essentielles : la forme d'une part, et l'apparence (couleur, brillance, *etc.*) d'autre part, cette dernière étant indispensable à la restitution réaliste sur écran. Nous nous sommes attaqués à résoudre certains des problèmes qui peuvent survenir lors des différentes étapes de la chaîne de numérisation, jusqu'à aboutir à une copie numérique exploitable pour la visualisation.

Nous avons notamment développé un protocole permettant d'unifier au sein d'une même manipulation la capture de ces deux informations. Ce protocole permet d'automatiser certaines tâches qui, jusque là, nécessitaient une intervention manuelle. Il a également l'avantage de mettre en œuvre un matériel très simple et très mobile, permettant ainsi d'effectuer les mesures sur site et non en laboratoire sans pour autant imposer les contraintes de calibrage généralement liées à ce genre de dispositifs.

La visualisation des copies numériques obtenues a également été abordée dans le cas spécifique de pièces d'art capturées en environnements lumineux fixes, avec comme objectif un rendu réaliste temps réel. Nous utilisons pour cela un modèle très simple de champs lumineux surfaciques permettant d'exploiter le matériel graphique pour de meilleures performances. Nous avons également étendu le principe de champs surfaciques pour permettre la simulation interactive et plausible d'un phénomène optique complexe, à savoir la réfringence des matériaux translucides.

Enfin, nous avons étudié le cas concret de la numérisation de tableaux d'art. Cela nous a permis de mettre au point une chaîne de traitements spécifiquement dédiée à cette catégorie d'objets, dont les particularités nous ont permises de faire fi de certains problèmes classiquement rencontrés dans le cas général.

## Acquisition conjuguée de la forme et de l'apparence

Concernant la forme, il existe, à l'heure actuelle, de nombreuses technologies permettant de récupérer une description numérique de la géométrie d'un objet. Toutefois, ces outils sont encore sujets à de trop nombreuses contraintes, ce qui les empêche de fonctionner de manière autonome. En particulier, ils sont incapables de capturer la surface complète d'un objet en une seule fois. Il faut donc récupérer cette surface morceau par morceau. Chacun d'eux étant défini dans un repère qui lui est propre, se pose alors le problème du réalignement de ces morceaux de surface les uns par rapport aux autres.

Concernant l'apparence, il ne s'agit pas que de capturer une simple couleur, mais une information photométrique complexe dépendant à la fois de l'éclairage

environnant et du point de vue. Nous nous sommes placés dans le cas plus simple d'un objet pris dans un environnement lumineux fixe, c'est à dire que seules les variations liées au point de vue sont capturées. Il n'en demeure pas moins que l'acquisition doit passer par un échantillonnage exhaustif des directions d'observation, à l'aide d'une multitude de clichés pris sous différents points de vue. Ces clichés doivent alors être mis en correspondance avec la géométrie précédemment acquise pour produire une copie numérique exploitable.

Nous avons donc affaire à deux problèmes distincts de *recalage*, l'un purement géométrique, l'autre mettant en œuvre des données 2D et 3D. Mais dans les deux cas, la première étape de la résolution (et généralement la moins évidente) consiste à établir des correspondances entre les différents jeux de données. Nous avons développé un protocole de numérisation permettant de résoudre de manière automatique ces deux problèmes à l'aide du même procédé : un scanner à lumière structurée est utilisé pour projeter une paramétrisation lumineuse sur l'objet d'intérêt, celle-ci permettant d'établir des correspondances immédiates entre la partie numérisée de la surface et l'image prise par une caméra externe focalisée sur ce même objet. Le recalage image/géométrie peut alors avoir lieu. Pour rendre le recalage géométrique possible, la caméra externe est utilisée comme référentiel fixe entre deux positions successives du scanner.

Nos études ont montré qu'avec ces deux seuls appareils (scanner + caméra) et notre protocole, l'ensemble des problèmes de recalage pouvait être résolu de manière fiable et rapide.

## Automatisation du débruitage géométrique

La numérisation, comme n'importe quelle mesure, étant sujette à l'incertitude, l'information recueillie s'en trouve nécessairement bruitée. Ces perturbations peuvent être corrigées grâce à l'application de filtres sur la géométrie. Les plus efficaces en la matière sont les *filtres adaptatifs*, qui modulent l'intensité de la correction en fonction du comportement local de la surface. Cela permet de préserver les fins détails de la géométrie là où des filtres plus standards les feraient disparaître en même temps que le bruit. Cependant, ces filtres particuliers nécessitent bien souvent une information *a priori* sur certains paramètres du bruit en lui-même. Généralement, ces paramètres ne sont malheureusement pas connus et doivent être déterminés par tâtonnement, à l'issue de nombreux essais.

Nous avons donc proposé une nouvelle approche qui exploite la redondance dans les données d'entrée pour estimer ces paramètres. Le bruit étant de nature aléatoire, le moyennage de différentes mesures d'une même surface tend naturellement à en faire disparaître l'influence tout en se rapprochant de la surface théorique idéale. Du fait que le recalage géométrique requiert impérativement du recouvrement entre les différents morceaux de surface, une telle redondance existe toujours à l'issue d'une mesure. Les zones de recouvrement peuvent ainsi être débruitées de manière fiable par l'exploitation judicieuse de l'information redondante.

De manière à généraliser le débruitage à l'ensemble de la surface, nous avons utilisé ces zones de recouvrement, dont le résultat de la correction est connu, pour estimer les paramètres de certains filtres adaptatifs existants dans la littérature. Cela nous a donc permis de supprimer les interventions manuelles lors

du processus de filtrage de maillages 3D numérisés.

Nous avons également proposé notre propre algorithme de filtrage, ainsi qu'une méthode de fusion de surfaces par érosion/remailage qui conserve les données originales et choisit la mesure la mieux échantillonnée lorsqu'il y a du recouvrement.

## Visualisation interactive et réaliste

À la suite des différentes étapes de recalage, les données représentant l'apparence de l'œuvre sont constituées d'un nombre important (plusieurs dizaines, voir plusieurs centaines) d'échantillons de couleur par primitive géométrique. Au niveau de la visualisation, cela représente des données souvent bien trop denses pour être exploitées directement lors du processus de rendu. De plus, si, comme dans notre cas, les modèles reconstruits sont censés pouvoir être diffusés via des médias comme Internet, la compacité de la copie numérique finale est un facteur très important.

Cette information doit donc être compressée à l'aide d'un modèle de représentation qui respecte certains critères. Tout d'abord, il ne doit pas être trop destructif, afin que la qualité visuelle soit préservée. De plus, si l'on souhaite une évaluation directe par le matériel graphique pour de meilleures performances, ce modèle doit également être suffisamment simple. Nous avons adapté le modèle des textures polynomiales, utilisé, dans notre cas, pour restituer des *champs lumineux surfaciques*. Le modèle, bien que basique, s'est avéré suffisant pour donner un aspect réaliste aux copies numériques grâce à la capture des principaux phénomènes d'illumination.

Notre principale contribution dans le domaine de la visualisation est l'extension de la notion de champs surfaciques dans le but de simuler le phénomène de réfringence. Nous avons proposé de représenter ce phénomène à l'aide d'un champ de distortion sur la surface qui, pour un rayon d'observation incident à la surface, renvoie la direction du rayon sortant. Ce champ est préalablement estimé lors d'une phase de pré-traitements, à l'aide d'un algorithme de lancer de rayons, puis compressé dans le domaine fréquentiel sous la forme de coefficients d'harmoniques sphériques. La décompression est effectuée à la volée par le matériel graphique et permet une visualisation temps réel. Nous avons montré que cette méthode, bien que lourde en termes de consommation mémoire, permettait une bonne approximation du phénomène de réfraction là où les méthodes existantes pouvaient échouer du fait de la complexité de la géométrie.

## Chaîne de traitements dédiée aux peintures d'art

Le processus de numérisation est constitué d'une chaîne complexe qui implique, comme nous venons de le voir, de nombreux traitements. Nous nous sommes intéressés à l'élaboration de techniques dédiées dans le but de simplifier (voir de supprimer) certains de ces traitements grâce aux propriétés spécifiques de certaines catégories d'objets. Nous avons donc proposé un protocole complet pour la numérisation et la visualisation de tableaux.

Compte tenu de la forme plane des toiles peintes, une seule acquisition de front suffit à les numériser, supprimant ainsi les questions de recalage géomé-

trique. De plus, le fait que l'ensemble de la géométrie soit contenu dans une seule acquisition permet de travailler directement sur l'image télémétrique résultante à l'aide d'outils plus simples de traitements d'images.

L'ensemble des traitements que nous avons proposés produisent, de manière automatique, une version segmentée de la toile, préalablement séparée du reste du tableau. Cette segmentation nous permet d'isoler les régions où la peinture présente un relief suffisamment significatif (comme dans le cas des *empâtements* pour la peinture au couteau) pour réclamer une technique de visualisation qui en tienne réellement compte.

Deux algorithmes de rendu sont alors utilisés : un premier, très simpliste, pour toute la partie de la toile considérée comme négligeable, et un autre pour la partie segmentée qui exploite le matériel graphique pour simuler le relief de manière visuelle (mais néanmoins correcte) sans avoir réellement besoin de connaître la vraie géométrie. Ce second algorithme étant plus coûteux, nous avons mis en place un mécanisme adaptatif permettant de ne l'utiliser que dans le cas où les conditions d'observation le requièrent, c'est à dire lorsque les erreurs de parallax deviennent trop importantes.

Cette méthode aboutit à des vitesses de rendu très élevées, et a l'avantage de représenter les copies numériques à l'aide de fichiers de petites tailles, texture bi-directionnelle comprise, et potentiellement très compressibles, notamment grâce au fait que la géométrie n'ait pas besoin d'être stockée.

## Conclusions et perspectives

Une grande partie de nos travaux s'est attachée à l'automatisation des différentes étapes qui rendent le processus de numérisation long et fastidieux. Les points qui ont été traités couvrent l'ensemble de la chaîne, depuis l'acquisition à proprement parler jusqu'à la visualisation réaliste des copies numériques obtenues. Étant destinées aux œuvres d'art, les solutions qui ont été proposées ont notamment été conçues pour tenir compte de la fragilité de tels objets. Vue la complexité de la chaîne de numérisation prise dans sa globalité, nous avons également montré l'intérêt de méthodes dédiées au travers du développement d'un protocole complet destiné à la numérisation et à la visualisation de tableaux.

Suite à ces travaux, il reste encore de nombreuses pistes à explorer. À court terme, nous aimerions proposer une extension de notre protocole de numérisation qui permettrait l'acquisition d'une information de texture bi-directionnelle complète, c'est à dire en tenant compte également des variations d'apparence imputables au changement d'éclairage. Un prototype de capteur a d'ores et déjà été élaboré en ce sens. Il devrait permettre, à court terme, de reconstruire une telle texture sans modifications extensives du protocole existant grâce à cinq points d'éclairage fixés sur le scanner.

À plus long terme, nous aimerions élaborer un système d'acquisition entièrement interactif, qui soit capable de localiser en temps réel une source lumineuse à partir d'informations perçues par la caméra d'acquisition. Ce système permettrait de déplacer la source à la main et de voir immédiatement si l'échantillonnage des directions d'incidence lumineuse est assez dense.

## Publications et communications

### Conférences internationales avec comité de lecture et publication des actes :

- Frédéric Larue, Lucas Ammann et Jean-Michel Dischler. "A pipeline for the digitization and the realistic rendering of paintings". *Proceedings of VAST 2007 : the 8th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, pages 71–78, 2007.
- Frédéric Larue et Jean-Michel Dischler. "Automatic registration and calibration for efficient surface light field acquisition". *Proceedings of VAST 2006 : the 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, pages 171–178, 2006.
- Olivier Génévaux, Frédéric Larue et Jean-Michel Dischler. "Interactive refraction on complex static geometry using spherical harmonics". *I3D'06 : Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games*, pages 145–152, 2006.

### Conférences internationales sans comité de lecture :

- Jean-Pierre Chambard, Vincent Chalvidan, Mohammed Tazeroualti, Frédéric Larue, Jean-Michel Dischler, Virginie Vurpillot et Anne-Claire Legrand. "Digitization of art pieces based on 3d, colour and texture parameters". *Proceedings of SPIE Symposium on Optical Metrology*, volume 6618 - O3A : Optics for Arts, Architecture, and Archaeology, 2007.

### Conférences nationales sans comité de lecture :

- Frédéric Larue, Lucas Ammann et Jean-Michel Dischler. "Chaîne de traitement pour la numérisation et le rendu réaliste de peintures d'art". *Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique*, pages 73–81, 2007.
- Frédéric Larue et Jean-Michel Dischler. "Recalages et calibrages automatiques pour l'acquisition de champs lumineux surfaciques". *Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique*, pages 171–178, 2006.