

# Résultats du Prix AFT 2005

Mesdemoiselles les candidates,  
Messieurs les candidats,

## ... au prix de l'AFT 2005

En tant que Président de l'Association Française de Topographie, j'ai l'honneur de vous communiquer les noms des lauréats du Prix AFT 2005, pour lequel vous nous avez adressé un dossier de candidature.

Le premier prix est attribué à Hervé Daudigny (600 euros)

Le deuxième prix à Sébastien Varea (400 euros)

Nous n'avons pas pu départager les deux candidats suivants, de sorte que nous avons deux ex-aequo pour le 3<sup>e</sup> prix :  
Pauline Lucas et Nicolas Janvier (250 euros chacun).

Ces prix seront remis le mercredi 4 octobre 2006 (au courant de l'après-midi) à l'occasion des Journées de la Topographie à l'INSA de Strasbourg, et les articles correspondants sont publiés dans xyz : ceux d'Hervé Daudigny, de Sébastien Varea et de Nicolas Janvier dans le présent numéro, celui de Pauline Lucas et un résumé présentant les sujets proposés non primés dans le n°109.

Je me permets de féliciter l'ensemble des candidats pour l'excellente qualité des travaux qui nous ont été soumis, ce qui a d'ailleurs rendu assez délicat le classement. Le jury était composé de Nicolas Balard, Franck Jung, Tania Landes et moi-même, assistés de Pierre Grussenmeyer, Mathieu Koehl et Emmanuel Natchitz.

Avec mes remerciements à toutes et tous, et mes félicitations aux lauréat(e)s.

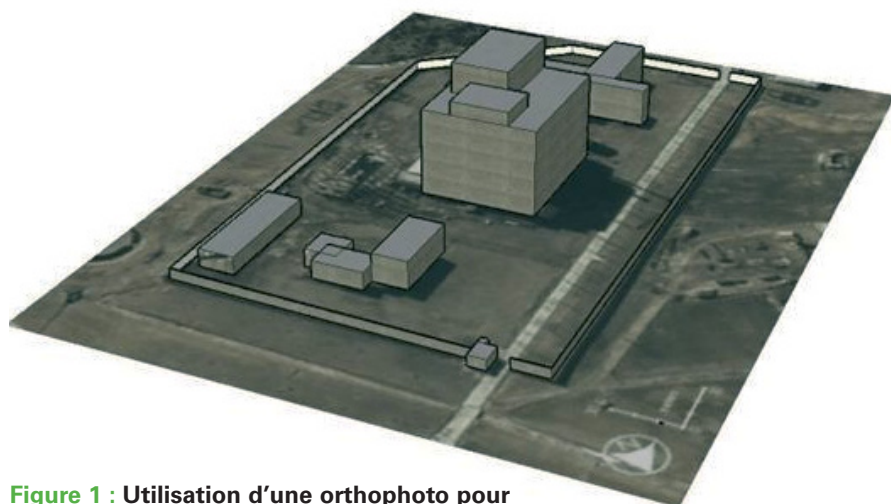
Michel Kasser  
Président de l'AFT

Pour le prix 2006, il est rappelé que la date limite de dépôt des dossiers est le 1<sup>er</sup> octobre 2006, les consignes aux auteurs étant téléchargeables sur le site internet de l'AFT : <http://www.aftopo.org>

## Proposition de chaîne opérationnelle de reconstruction 3D de sites à partir de données spatiales ou aéroportées

■ Hervé DAUDIGNY

*Le projet a été réalisé à la Direction du Renseignement Militaire et a pour but de répondre aux besoins des Armées en terme de reconstruction 3D de sites. L'objectif de l'étude est de proposer une chaîne opérationnelle de reconstruction tridimensionnelle de sites à partir de données spatiales ou aéroportées, en utilisant les données disponibles et selon les impératifs des cycles opérationnels. Afin d'atteindre ces objectifs, deux méthodologies de reconstruction ont été proposées : une méthodologie en mode monoscopique et une méthodologie en mode stéréoscopique. Pour tester ces dernières, des modélisations ont été menées, une chaîne de reconstruction s'articulant autour des deux méthodologies a pu être proposée.*



**Figure 1 :** Utilisation d'une orthophoto pour la modélisation de la centrale nucléaire de 50MW de Yong Byon (Corée du Nord).

selon le vieil adage médiéval : Savoir, c'est pouvoir. De manière à aider à la réalisation des missions des organismes de la Défense, de nouvelles techniques dans la collecte et l'utilisation du renseignement peuvent se révéler utiles. En particulier, l'apport de la troisième dimension n'est pas à négliger.

### Un contexte géopolitique complexe

Le nouveau contexte géopolitique apparu au début des années 1990 avec la disparition du pacte de Varsovie, et plus encore dans le contexte "post 11 Septembre", a mis en lumière le fait que les Forces pouvaient dorénavant être confrontées à un environnement impré-

visible et en constante évolution, si bien qu'il est de plus en plus difficile de parler de nouvel équilibre mondial. Les crises se diversifient tout comme les risques. L'émergence de nouvelles puissances (civiles ou militaires), la montée du terrorisme ainsi que le développement de conflits locaux posent de nouveaux problèmes pour les organismes de la Défense. Ces derniers voient leurs missions modifiées. Ils doivent désormais être capables d'effectuer une veille précise, d'anticiper ou de suivre plusieurs crises simultanément (veille globale) et d'aider à leurs résolutions.

La capacité de disposer d'une chaîne de renseignement articulée et complète est devenue un enjeu de puissance d'une dimension équivalente, si ce n'est supérieure, à celle obtenue par la pos-

**Q**ue ce soit dans l'art de la guerre de SunTzu ou dans les traités de géopolitiques actuels, le renseignement y est mentionné comme l'une des clés maîtresses pour la résolution (pacifique ou non) de conflits. En effet,

■■■ session du pouvoir destructeur de l'armement. D'après Rousselin [2002], la connaissance du terrain sur lequel se dérouleront les opérations conditionne leur succès ; les Armées doivent être capables de recueillir, traiter et diffuser les informations géographiques nécessaires au bon fonctionnement des systèmes de commandement et des systèmes d'armes qui équipent les Forces engagées.

## Un cadre d'étude particulier

Le Projet de Fin d'Etudes a été réalisé à la Direction du Renseignement Militaire en partenariat avec la société Latitude Geosystems. La Direction du Renseignement Militaire réalise notamment des études dans le domaine du renseignement image et électromagnétique de manière à pouvoir répondre aux besoins opérationnels des Armées à plus ou moins long terme. Le Projet de Fin d'Etudes se place dans ce cadre et a pour objectif de répondre aux besoins des Armées en terme de reconstruction 3D de sites. Le sujet proposé émane à la fois d'une volonté de prospective "entrevoir les possibles" et d'obtention de réponses face aux besoins actuels et futurs des Armées.

## Objectif et problématique

L'objectif de l'étude est de proposer une chaîne opérationnelle de reconstruction tridimensionnelle de sites, en utilisant les données disponibles et selon les délais de réalisation compatibles avec les impératifs des cycles opérationnels. De plus, les modèles 3D réalisés avec cette chaîne doivent pouvoir être utilisés rapidement par tout type de personnes qu'elles soient spécialistes ou non de la manipulation de données géographiques et informatiques. L'objectif majeur pour la Direction du Renseignement Militaire est donc de conserver sa capacité à détenir et à maîtriser l'information géographique et cela en couvrant le domaine de la 3D.

## Les cycles opérationnels

La période d'action globale au sein des Armées peut être définie en trois cycles opérationnels : le cycle à chaud, le cycle à froid et le cycle veille.

**Le cycle à chaud** correspond à un cycle opérationnel à court terme, dans le cadre d'une action en cours dans un contexte d'urgence opérationnelle. Une action de renseignement est menée sur un site militaire ou d'intérêt militaire. Dès réception des données de cette action, il faut pouvoir répondre dans les meilleurs délais afin de permettre de préparer la mission qui sera menée sur cet objectif.

**Le cycle à froid** se caractérise par un contexte à plus long terme (inférieur à une semaine), dans le cadre d'une planification d'opérations par exemple (constitution d'une strike list (liste d'objectifs) potentiels à traiter en cas de frappes aériennes). Dans ce cycle, les objectifs majeurs "à frapper" sont définis, la zone d'action est privilégiée.

**Le cycle veille** a pour objectif de traiter des sites à caractère sensible à long terme (quelques mois) soit dans le cadre d'une planification préventive (ciblage) soit dans le cadre de surveillance particulière (contre prolifération). La connaissance précise de sites militaires ou d'intérêts militaires pourrait se révéler précieuse à plus long terme. Ce cycle se place dans le contexte d'une évaluation des risques potentiels, ou de planification stratégique.

A la vue de ces différents cycles, il a été nécessaire en début de projet de réaliser une étude des besoins en fonction des cycles opérationnels.

En résumé, lorsque l'on passe d'un cycle à chaud vers un cycle veille, le temps disponible pour la modélisation augmente, on pourra également utiliser des données de plus en plus détaillées ce qui permettra de réaliser des modèles complexes et étendus autour du site militaire ou d'intérêt militaire à modéliser.

## Les données

Dans le cadre d'un projet de type Défense, les données peuvent être variées : les données environnement (modèles numériques de terrain, modèles numériques d'élévation), les données image (images aériennes, images satellites, couples stéréoscopiques d'images aériennes ou spatiales, images terrestres), les données exogènes (cartes, plans, analyses, informations diverses).

Il faut souligner que l'on se place dans un cadre opérationnel, ce qui signifie qu'il est très rarement possible de disposer d'un lot de données exhaustif et parfaitement apte à un rendu parfait, et encore moins de vérité terrain, comme c'est le cas dans le cadre d'un projet du type "industriel". Il s'agit donc d'adapter les méthodologies de reconstruction proposées aux données disponibles et à leur degré de précision.

|                  | Cycle à chaud                         | Cycle à froid                                   | Cycle veille                                    |
|------------------|---------------------------------------|---|---|
| Besoins          | Rapide (1 à 3 heures)                 | En 1 à 7 jours                                  | Quelques semaines voire quelques mois           |
| Modélisation     | Grossière du bâti                     | Fine du bâti                                    | Fine du bâti                                    |
| Niveau de détail | Une limitation du modèle à la mission | Une extension de la modélisation autour du site | Une extension de la modélisation autour du site |
| Données          | Non détaillées                        | Détaillées                                      | Détaillées et complexes                         |

Figure 2 : Analyse du besoin en fonction des cycles opérationnels.

## Recherche et proposition

### ■ Critères à respecter :

La modélisation devra pouvoir se présenter sous trois formes : la modélisation du bâti uniquement, la modélisation de l'environnement uniquement, la réunion de la modélisation du bâti et de l'environnement. Cette modélisation doit répondre à certains critères. Le premier concerne la facilité d'emploi des logiciels pour la modélisation du site. L'opérateur doit en effet être capable de recréer facilement un site sans avoir eu une formation approfondie ou être un véritable spécialiste de modélisation par informatique. Ce choix s'explique par les difficultés liées à la formation des interprètes d'images et des analystes. La modélisation doit être vue comme un outil complémentaire du métier d'interprète ou d'analyse et non pas comme une nouvelle fonction à pourvoir.

Parallèlement, la modélisation doit permettre la prise en compte de données multi-sources et l'intégration directe ou indirecte de ces dernières, ainsi qu'une réalisation minimale (mais pertinente) en cas de manque de données adéquates. Ensuite, le modèle créé doit permettre une interprétation rapide du site lui-même pour quelqu'un de non spécialiste (ajout de couleurs, convivialité dans l'affichage). Le modèle devra être diffusé avec un "indice de confiance". Cet indice de confiance dépendra de nombreux paramètres, notamment de la fiabilité des renseignements reçus sur le site et du type de données utilisées.

### Proposition de méthodologies de reconstruction

Les choix doivent porter sur les différentes étapes possibles de la modélisation, à savoir la modélisation du bâti ainsi que celle de l'environnement. Pour ces différentes étapes, il est nécessaire de déterminer les types de logiciels à utiliser ainsi que le format d'export des réalisations. Lors de la phase de recherche des étapes de chaque méthodologie, un choix a du être fait quant au type de logiciels à utiliser.

Notre choix s'est tourné vers des logiciels commerciaux. Les logiciels utilisés ont été choisis pour leurs simplicités d'emplois et leurs capacités à pouvoir intégrer les informations issues de données diverses. Un choix a du être mené quant au format d'export des futurs modèles créés à l'aide des deux méthodologies. En effet, plusieurs formats d'export pour la visualisation des modèles sont utilisables dans les logiciels de modélisation : .wrl (format VRML), .dxf (format Autocad), .3ds (format 3D Studio Max), etc. Le choix s'est rapidement tourné vers l'emploi du format VRML. En effet, il est destiné à devenir le format d'export 3D principal par les organismes de la Défense. De plus, le VRML, du fait de sa facilité d'emploi et de manipulation semble être adapté. En outre, de nombreux visualisateurs gratuits sont disponibles sur Internet, contrairement à d'autres formats propriétaires qui nécessitent l'achat de logiciels pour la visualisation d'après Topol [2001]. Un autre avantage existe car, bien que le VRML soit un langage de programmation, une connaissance même sommaire du code permet de créer ou modifier les modèles.

La première et majeure étape de l'étude a été de déterminer des méthodologies de reconstruction. Afin d'atteindre les objectifs fixés par l'étude, deux méthodologies de reconstruction ont été proposées : une méthodologie en mode

monoscopique et une méthodologie en mode stéréoscopique (utilisation d'un couple stéréoscopique). La méthodologie en mode monoscopique permet de modéliser des bâtiments en 3D en utilisant la mesure des ombres sur les images satellites ou aériennes. La modélisation de l'environnement du lieu considéré est également possible. La méthodologie en mode stéréoscopique utilise des lunettes 3D permettant de visualiser la scène en relief pour modéliser à la fois l'environnement et le bâti d'un site. Les modèles 3D résultants sont visualisables au format VRML.

### ■ Analyse des résultats

De manière à tester les méthodologies proposées, une modélisation a été réalisée sur le site du réacteur de 50MW de Yong Byon (Corée du Nord). Les résultats obtenus sur ce site ont été présentés à la direction du renseignement militaire. Après discussions concernant la modélisation et les résultats obtenus, il apparaît que deux éléments des méthodologies doivent être améliorés. Tout d'abord, la détermination de la hauteur des bâtiments en mode monoscopique est jugée trop longue pour pouvoir permettre à la méthodologie de s'intégrer pleinement dans les cycles opérationnels. En effet, des calculs manuels utilisant la mesure des ombres doit être réalisé pour déterminer la hauteur des bâtiments. Les traitements et

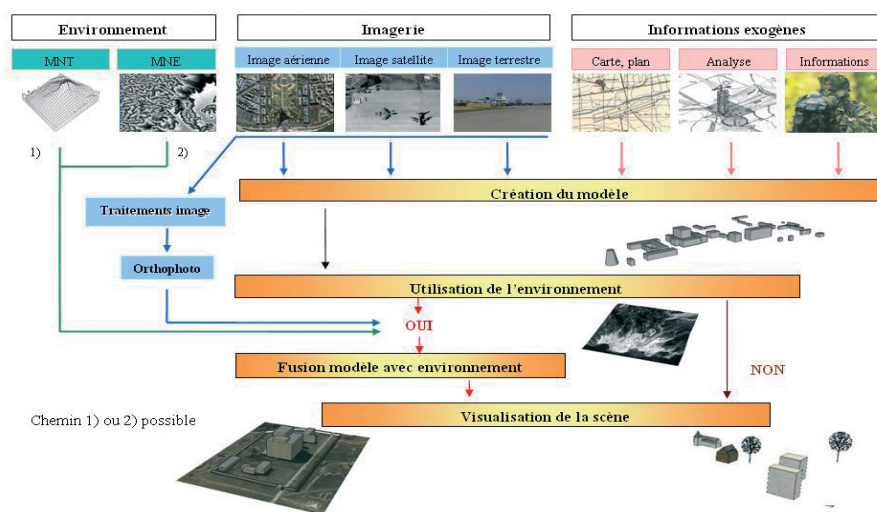


Figure 3 : Méthodologie monoscopique générale.



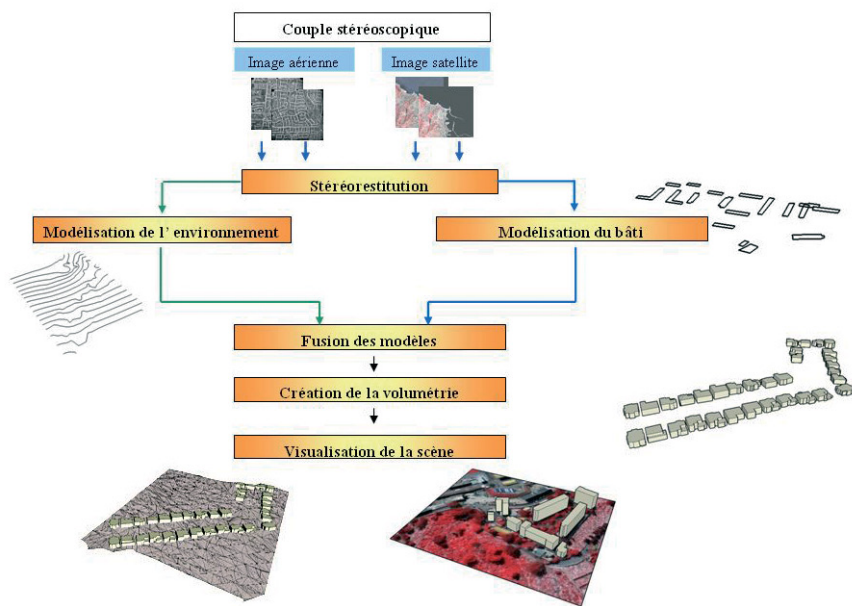


Figure 4 : Méthodologie stéréoscopique générale.

théories concernant cette méthode sont présents dans l'ouvrage de Poézévara [2001]. De plus, la fusion des deux fichiers VRML de l'environnement et du bâti en un seul fichier par manipulation de code est jugée trop complexe. En effet, il est nécessaire pour réaliser cette opération d'avoir des notions concernant le langage VRML, ce qui complique la tâche de l'utilisateur potentiel. Il semble donc nécessaire d'apporter des modifications aux méthodologies initiales proposées.

## Les logiciels créés pour l'étude

De manière à améliorer les méthodologies, une chaîne de la valeur ajoutée a été créée. Quatre programmes ont été développés pour simplifier la démarche. Ces programmes ont été développés à l'aide du langage Visual Basic.

**Le premier programme**, nommé Hbat, permet d'automatiser partiellement le calcul de hauteur à l'aide de la mesure des ombres. Ce programme propose trois méthodes pour le calcul de la hauteur des bâtiments. Il a pour objectif de diminuer la durée de modélisation.

**Le second programme**, appelé FEnvBat (Fusion Environnement Bâti),

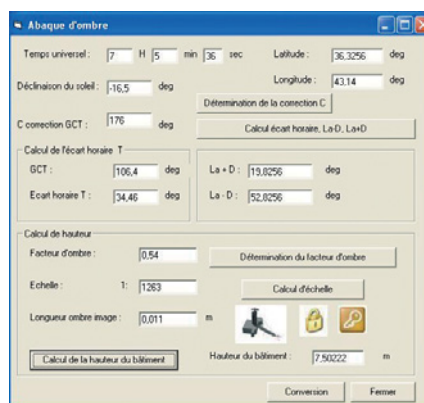


Figure 5 : Interface de calcul de hauteur des bâtiments dans Hbat.

permet d'automatiser en partie la fusion des deux fichiers VRML (fichier environnement et fichier bâti) sans avoir à écrire manuellement une seule ligne de code. Ce logiciel a pour objectif de simplifier la fusion des fichiers VRML et de permettre sa réalisation par le plus grand nombre d'utilisateurs possibles.

**Le troisième**, F2MVRML (Fusion de Monde VRML), se rapproche du programme FEnvBat dans le sens où il permet la fusion de données VRML. Toutefois, F2MVRML possède des fonctionnalités supplémentaires et notamment celle de pouvoir reconnaître à l'ouverture d'un fichier VRML

les fichiers VRML imbriqués. Il permet également d'ajouter des modèles VRML (fusion) dans une scène mais permet également d'enlever des modèles VRML d'une scène (ce qui peut être utile lors de la destruction d'un bâtiment par exemple). Le quatrième programme développé, RecT (Recherche de textures) permet de rechercher des textures dans un fichier VRML. Ce programme permet le déplacement de fichiers VRML sous un autre chemin informatique ou sur un autre ordinateur.

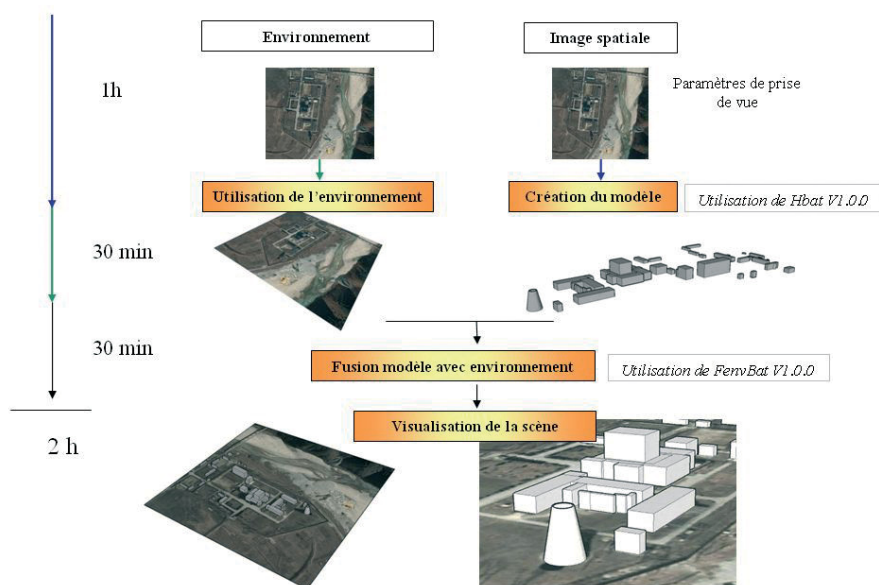
Ainsi, dans un but de simplification des premières propositions de méthodologies présentées en début de projet à la Direction du Renseignement Militaire, quatre programmes ont été développés : Hbat (automatisation partielle du calcul de hauteur des bâtiments à l'aide de la mesure des ombres), FEnvBat (automatisation partielle de la fusion de deux fichiers VRML), F2MVRML (suppression de modèles VRML d'une scène), RecT (recherche de textures dans un fichier VRML).

## Analyse des résultats

Afin de vérifier la pertinence de deux méthodologies, des tests ont été réalisés suivant les différents cycles opérationnels. Les modélisations d'un site industriel d'Auxonne (France), des réacteurs nucléaires de 5 et 50 MW de Yong Byon (Corée du Nord), de la tour de lancement de No Dong (Corée du Nord), d'un quartier de Richmond Hill (Canada) et d'Alger (Algérie) ont été réalisées.

Les tests réalisés ont permis de dégager des points forts pour chacune des méthodologies. La méthodologie en mode monoscopique permet l'emploi de données multi-sources et multi-capteurs, semble s'intégrer dans les cycles opérationnels et être utilisable par des non spécialistes. La méthodologie en mode stéréoscopique permet à l'aide d'un seul couple stéréoscopique de modéliser le bâti ainsi que l'environnement. De plus, les modèles créés sont exportés au format VRML ce qui les rend "facilement" exploitables.

Le principal point faible de ces méthodologies est qu'il faut disposer de don-

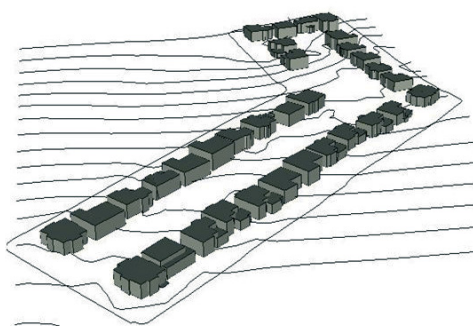


**Figure 6 : Modélisation en mode cycle à froid de la centrale nucléaire de 5MW de Yong Byon.**

nées pertinentes pour pouvoir effectuer une modélisation. En mode monoscopique, on doit disposer des paramètres de prise de vue ou d'un élément de référence connu en hauteur dans la scène. En mode stéréoscopique, on doit disposer du couple de la zone à étudier ce qui n'est pas toujours facilement réalisable dans un contexte Défense. De plus, la méthodologie en mode stéréoscopique ne semble s'appliquer qu'au cycle veille ou à la planification à froid et être utilisable par des opérateurs qualifiés.

## La chaîne de reconstruction

L'objectif principal du projet de fin d'étude est de proposer une chaîne de



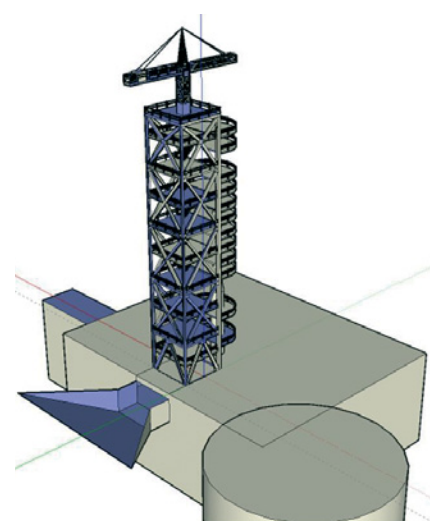
**Figure 7 : Modélisation d'un quartier de Richmond Hill, Canada.**

reconstruction 3D de sites tenant compte des conditions particulières de réalisation et d'utilisation du domaine d'emploi. Jusqu'ici, nous nous sommes attachés à proposer des méthodologies "ad hoc" permettant de s'inscrire dans les cycles opérationnels. Au delà de cette première étape, il a été important de tenter de systématiser ces expérimentations et de proposer une chaîne opérationnelle complète de reconstruction. Au final, une chaîne de reconstruction s'articulant autour de deux méthodologies (monoscopie et stéréoscopie) a été proposée. Cette chaîne comprend l'aspect matériel et technique (Hardware, Software, périphériques 3D) et l'aspect humain. Une évaluation financière des moyens matériels à mettre en oeuvre a également été réalisée pour cette chaîne de reconstruction.

## Perspectives

Apports des résultats obtenus en regard des problématiques de Défense

Les expérimentations réalisées en fonction des différents cycles opérationnels (cycle à chaud, cycle à froid, cycle veille) et des deux méthodologies (monoscopique et stéréoscopique), ont permis de mettre en évidence un certain nombre d'apports



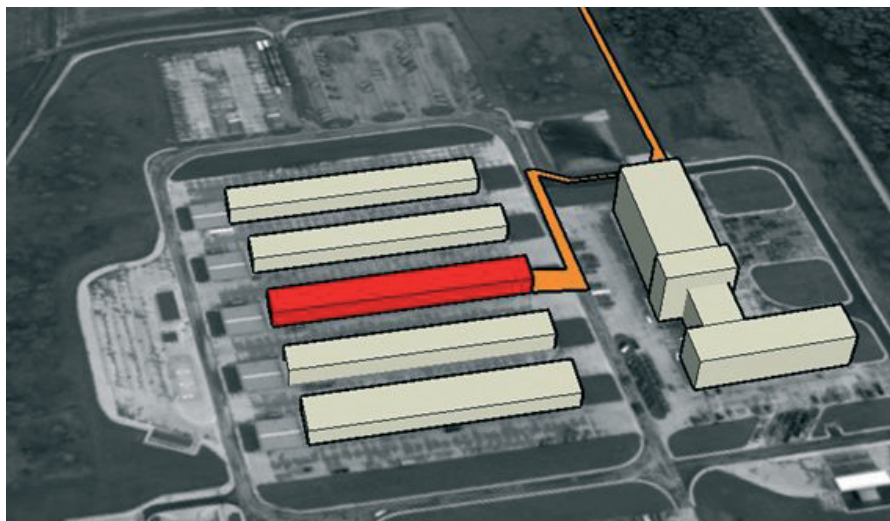
**Figure 8 : Modélisation de la tour de lancement de No Dong (Corée du Nord).**

concernant des applications de type Défense : contre prolifération, ciblage, préparation de mission, analyse de mission, évaluation de dommages, suivi de crises, simulation, etc.

**Contre prolifération** : les représentations 3D de sites dits "proliférant", comme la tour de lancement de No Dong ou les réacteurs (5MW et 50MW) de Yong Byon, ont pu être modélisées. Ces modélisations apportent des informations complémentaires essentielles à la compréhension de la spécificité, de la capacité et du fonctionnement des sites. Elles permettent, par conséquent, de réaliser des analyses techniques des sites par rétro-ingénierie.

**Préparation de mission** : une modélisation d'un site industriel a permis de réaliser une mission type en étudiant à l'avance les cheminements possibles des équipes vers leur objectif (désigné clairement sur le modèle par rapport aux autres bâtiments), et en exploitant les zones d'ombres créées par les bâtiments. Les modèles 3D permettent sans aucun doute d'avoir une meilleure idée de la zone cible qu'avec une carte ou une photographie.

**Analyse de missions ou d'événements** : la 3D apparaît comme un outil de communication efficace. La 3D permettra de désigner clairement où se



**Figure 9 : Modélisation du site industriel d'Auxonne, le bâtiment cible est représenté en rouge.**

■ ■ ■ sont posés les problèmes et permettra également de voir comment y ont répondu les hommes sur le terrain. Dans le cadre d'une nouvelle action sur la même zone, les risques rencontrés ou la non exactitude du modèle par rapport aux éléments rencontrés sur le terrain pourront être corrigés.

**BDA (Battle Damage Assessment : Evaluation des dommages) :** Cet aspect paraît, exploitable par les deux méthodologies présentées grâce à la création du logiciel F2MVRML qui va permettre de supprimer des bâtiments d'une zone.

**Résolution de crise :** on peut citer l'exemple d'un tir d'artillerie (présenté comme accidentel) d'une position occupée par les troupes d'un pays sur une position occupée par des troupes de maintien de la paix. L'apport de la représentation du site en 3D et la capacité de pouvoir le manipuler facilement en VRML permet d'établir si le tir est susceptible d'être accidentel ou délibéré et donc hostile (cible visible et accessible en tir direct depuis la position de départ, ou clairement identifiable depuis les positions incriminées).

**Simulation :** l'apport de la reconstitution 3D est également très important dans ce domaine. En effet, les modèles créés sur les sites sensibles pourraient être utilisés en "instruction" afin de présenter aux décideurs ou diplomates

les risques potentiels concernant des pays déterminés. De plus, la modélisation de sites, où se sont déroulés de réelles opérations militaires, peut servir d'exemple lors de cours de tactique ou stratégie militaire, en expliquant notamment le déroulement des opérations et des manœuvres réalisées sur le terrain.

## Evolutions possibles, améliorations, optimisations des techniques proposées

### ■ Evolutions des méthodologies

Dans les deux méthodologies, des programmes ont été développés en interne pour former une chaîne de la valeur ajoutée. Cette chaîne comporte les logiciels suivants : Hbat, FEnvBat, F2MVRML, RecT. La première évolution pourrait consister à améliorer les modules de chacun des programmes (pour Hbat : intégration de tables des déclinaisons sous un format Excel, permettre la fusion simultanée d'un nombre illimité de fichiers pour FEnvBat et F2MVRML, permettre la recherche simultanée des caractères majuscule et minuscule des extensions de fichiers, permettre la mesure directe des ombres à partir d'une ouverture du fichier image, etc). La seconde évolution de la chaîne consisterait à fusionner ces différents logi-

ciels pour n'en former plus qu'un. Une troisième évolution serait, à plus long terme, de réaliser une analyse fonctionnelle des besoins de manière à pouvoir intégrer les fonctions de la chaîne de la valeur ajoutée dans des modules intégrés aux programmes Défense.

Une perspective d'emploi des deux méthodologies serait de pouvoir les exploiter de manière simultanée dans un même modèle. On pourrait par exemple vouloir déterminer des bâtiments à l'aide de la stéréoscopie et d'autres bâtiments à l'aide de la monoscopie (selon les impératifs de temps et de précision de modélisation notamment). De manière à valider cette possibilité d'emploi, des tests doivent être réalisés.

## Pistes de recherche

Le projet présenté ici pourrait être complété. Les études possibles sont présentées par domaine d'application. Dans le cadre d'emploi de la contre prolifération, la modélisation de sites d'intérêt militaire pourrait être intégrée dans une base de données de manière à pouvoir retrouver facilement et rapidement les modèles d'une zone déterminée. Ainsi, il serait nécessaire de définir les liens entre cette base de données et les modèles.

Une évolution semble possible dans le domaine du ciblage. Une étude pourrait être menée de manière à étudier la possibilité de transformation des formats "classiques" des modèles 3D aux formats utilisés par le ciblage.

Dans le cadre de la simulation, les modèles créés à l'aide des deux méthodologies semblent pouvoir être utilisable en combat virtuel. En effet, un jeu vidéo, utilisé par l'Ecole d'Application de l'Infanterie (EAI) de Montpellier, peut accepter les formats .map provenant du logiciel graphique commercial. Or, les modèles exportés en VRML peuvent être transformés en .map. Une étude future pourrait donc consister à évaluer l'utilisation des modèles 3D pour le combat virtuel.



## Conclusion

L'objectif de la présente étude a été de proposer une chaîne opérationnelle de reconstruction tridimensionnelle de sites dans un contexte Défense, en utilisant les données disponibles et selon les délais de réalisation compatibles avec les impératifs opérationnels. Les modèles 3D réalisés avec cette chaîne devaient pouvoir être utilisés rapidement par tout type de personnes qu'elles soient spécialistes ou non de la manipulation de données géographiques et informatiques.

La méthodologie en mode monoscopique permet l'emploi de données multi-sources et multi-capteurs, semble s'intégrer dans les cycles opérationnels et être utilisable par des non spécialistes. La méthodologie en mode stéréoscopique permet à l'aide d'un seul couple stéréoscopique de modéliser le bâti ainsi que l'environnement. De plus, les modèles créés sont exportés au format VRML ce qui les rend "facilement" utilisables.

Le principal point faible de ces méthodologies est qu'il faut disposer de données pertinentes pour pouvoir effectuer une modélisation. De plus, la méthodologie en mode stéréoscopique ne semble s'appliquer qu'au cycle veille ou à la planification à froid et être utilisable par des opérateurs qualifiés.

La finalité du Projet de fin d'Etudes était de proposer une chaîne complète de reconstruction, des recherches ont donc été menées dans ce sens. Au final, une chaîne de reconstruction s'articulant autour des méthodologies proposées (monoscopie et stéréoscopie) a été proposée. Cette chaîne comprend l'aspect matériel et technique (Hardware, Software et périphériques) et l'aspect humain (en effet, outre l'aspect purement matériel, l'homme joue un rôle prédominant dans la qualité des modèles créés).

En définitive, la chaîne de reconstruction proposée semble être utilisable dans un contexte Défense. Toutefois, la 3D n'est pas une solution miracle. La 3D a un coût en terme de formation et d'organisation. Il est important de voir la 3D

comme un complément utile pour des applications spécifiques.

Outre ces considérations d'emplois, l'étude menée au sein de la Direction du Renseignement Militaire permet de voir que le potentiel de la 3D est non négligeable pour des applications Défense. En effet, le projet a permis de montrer que l'emploi de la 3D peut être rendue possible pour de nombreux domaines comme la contre prolifération, la modélisation de sites d'intérêts militaires, le ciblage, la préparation de mission, l'analyse de missions ou d'évènements, l'évaluation de dommages et la simulation. Les études sur ce domaine n'en sont donc qu'à leurs débuts et promettent de belles perspectives. ●

## Références bibliographiques

- Bonn, F. & Rochon, G. [1992]**, *Précis de Télédétection, Principes et méthodes*, volume 1, Québec
- Borovsky, P., Ftacnik, M. et Samuelcik, M. [2004]**, *Low Cost High Quality 3D Virtual City Models*, Ed Manfred Schrenk, 9th International Symposium on Planning & IT, Vienne, Autriche, février 2004, p 343-350
- DGA & Thales [2005]**, *Le maquettage 3D et la réalité virtuelle au service des interventions*, Fort d'Issy
- Früh, C. & Zakhor, A. [2003]**, *Constructing 3D City Models by Merging Aerial and Ground Views*, In IEEE CG & A 6/23, p52-57
- Grussenmeyer, P. [2005]**, *Cours de photogrammétrie*, INSA Strasbourg, Filière Topographie
- Koehl, M. [2003]**, *Cours de Visual Basic*, INSA Strasbourg, Filière Topographie
- Koehl, M. [2005]**, *Cours de Modèle Numérique de Terrain*, INSA Strasbourg, Filière Topographie
- Landes, T. [2004]**, *Cours de Télédétection G2*, INSA Strasbourg, Filière Topographie
- La rédaction [2004]**, *La géographie opérationnelle* ; Objectif Défense, n° 129, p 3-20
- La rédaction [2005]**, *La 3D au service du SIG* ; Géomatique Expert, n° 41/42, p38-42

**Maxwell, J. [2001]**, *VRML : votre site en 3D*. Compétence Micro, Editions KnowWare, ISBN 2-912954-48-7

**Ravelet, M. [2005]**, *L'Armée s'appuie sur l'imagerie pour créer une ville de combat* ; Géomètre, n° 2011, Publi-Topex SA, p 44-45/62

**Rousselin, T. [2002]**, *Le programme DNG3D : des capacités géographiques adaptées aux besoins des systèmes de Défense* ; L'ARMEMENT, n° 78, p154-159

**Sweetman, B. [1997]**, *Spy satellites : the next leap forward : Exploiting commercial satellite technology*. Jane's international defense review, n°1, p. 26-32

**Topol, A [2001]**, *VRML : étude, mise en œuvre et applications*

**Wilmann, M. [2005]**, *Hélios 2A l'envol de la haute résolution*. DIAGONAL, Editions DGA/COMM, p.2-3/8

## Contact

**Hervé DAUDIGNY**  
hedaudigny@hotmail.com

## ABSTRACT

*The purpose of the project was carried out at the DRM (French Military Information) and is to meet the needs for the Armies in term of 3D rebuilding. The aim of the study is to propose an operational chain of three-dimensional rebuilding of sites starting from space or airborne data, by using the data available and according to the requirements of the operational cycles. In order to achieve these goals, two methodologies of rebuilding were proposed: a methodology in monoscopic mode and a methodology in stereoscopic mode. To test these last, models were carried out, a chain of rebuilding articulating itself around two methodologies could be proposed.*



# Photogrammétrie et muséologie

## Les Sèvres du musée de Rouen

■ Sébastien VAREA

*Nous présentons dans cet article les solutions techniques que la photogrammétrie et, plus généralement la modélisation 3D, peuvent apporter aux différentes missions qui incombent aux conservateurs de musée incarnés ici par Madame Christine Germain-Donnat, conservatrice du Musée de la Céramique de Rouen.*

*L'ensemble de ces missions sont regroupées dans le terme muséologie qui définit le devoir de conservation et se rapporte aux sciences et techniques qui concourent à la conservation du patrimoine, au classement et à la représentation des œuvres.*

*Ainsi nous nous sommes attachés à la modélisation des œuvres d'art et à la production d'outils d'études et d'informations les concernant.*

*Ce projet de fin d'études est original en ce sens qu'il propose une alternative très abordable aux méthodes d'acquisition basées sur l'utilisation de scanners 3D, onéreux, et qui se sont pas nécessairement adaptées aux besoins.*

### Contexte de l'étude

**Collections XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle :**

**Les Sèvres du musée de Rouen**

Fournisseur attitré des Palais de la Nation, la Manufacture de Sèvres, relativement protégée par son statut officiel, dut faire face au XIX<sup>e</sup> siècle, à un vent de critiques violentes remettant en cause son fonctionnement voire même sa raison d'être. Pourvoyeuse de cadeaux diplomatiques, de services de table et d'ornements divers pour les différentes administrations, elle revendiquait pourtant un rôle de conseil et d'assistance technique auprès des fabricants français. Une profonde réforme mise en œuvre en 1892, réaffirma son rôle d'enseignement et sa mission éducatrice.

La politique d'envois de pièces anciennes ou contemporaines que Sèvres mena dès lors de manière systématique à destination des musées de province lui permit de montrer ses créations les plus récentes auprès d'un large public et de légitimer son existence.

Le musée de Rouen fut particulièrement bien doté grâce à différents envois, dont les plus importants datent de 1884, 1901 et 1934. Une centaine de pièces plus un ensemble de petits

bustes en biscuit attribué dès 1882 et 1883, forment aujourd'hui la collection des Sèvres du musée de la Céramique. Trois beaux ensembles illustrent, le dernier quart du XIX<sup>e</sup> siècle, la création autour de 1900 et la période entre-deux-guerres. Formes nouvelles empruntées à la nature, décors flammés, cristallisations... les Sèvres du musée de Rouen illustrent magnifiquement le renouveau céramique insufflé à la Manufacture par des directeurs tels que Albert Carrier-Belleuse ou Alexandre Sandier. Le vase des Saisons, parfait hommage à l'esprit du XVIII<sup>e</sup> siècle ou le vase Rulhmann, somptueux manifeste esthétique des années 30, témoignent assez de la créativité et de l'excentricité de Sèvres au tournant des deux siècles. Quant à l'œuvre d'Arthur Massoulé, intitulée Les Raisins, elle conjugue de manière spectaculaire sculpture et céramique.

### Problématique

*Conservées jusqu'alors en réserve, ces œuvres en porcelaine ou en grès n'ont jamais été montrées au public ni documentées.*

*Elles sont aujourd'hui mises à l'honneur dans deux nouvelles salles du musée de la Céramique.*

Installé dans un hôtel particulier du XVII<sup>e</sup> siècle, monument historique, le musée n'est que partiellement aménagé pour accueillir les personnes à mobilité réduite. Ces nouveaux espaces de présentation situés au second étage du musée sont malheureusement difficiles d'accès pour les personnes handicapées.

C'est pourquoi nous nous sommes appliqués à leur mise en valeur : une visite virtuelle des salles assortie d'une base de données concernant les œuvres les plus remarquables de la collection constitue à nos yeux, la meilleure réponse à ce problème. Une borne interactive sera installée au rez-de-chaussée du musée et aisément consultable par tous.

De plus la numérisation de ces œuvres nous a permis d'établir une documentation complète de chaque œuvre et a



Outils d'aide à la muséologie.

assuré la mise en place de nombreux outils d'étude tels que : la création de profils, l'aide à la gestion des espaces de stockage, la production de déroulés (mise à plat des décors) ou encore l'assistance à la projection muséographique (scénographie et mise en espace virtuelles).

## Photogrammétrie et modélisation

### ■ L'aspect qui nous intéresse dans cette section est la modélisation d'objets à partir d'images

Nous proposons une approche basée sur la photogrammétrie rapprochée multi-images associée à des techniques originales de repérage et d'orientation de sorte à reconstruire des objets 3D texturés proches de modèles réels.

### ■ Acquisition des données

#### Mode opératoire

Si aucune connaissance sur l'objet à modéliser n'est disponible, alors la production d'un modèle consiste à construire complètement ce modèle à partir des images de celui-ci. Ainsi passer d'images bidimensionnelles à un modèle tridimensionnel nécessite au moins deux images, la projection 3D-2D entraînant une perte d'informations.

L'objectif devient alors la réalisation de l'extraction de primitives depuis les images : les primitives sont ici les projections, dans les images, des éléments constituant le modèle à construire [FAU 93]. Ces primitives peuvent être des points, des segments ou des entités géométriques plus complexes (courbes, etc.).

Pour réaliser cette extraction de primitives, nous utilisons une technique proche de l'utilisation de cibles placées sur l'objet à modéliser, à la différence qu'ici un ensemble de points lumineux est projeté sur l'objet (nous respectons le principe de non contact avec les œuvres dans un souci de conservation). Il ne s'agit pas ici d'un processus basé sur l'utilisation de lumière structurée<sup>1</sup>. Nous proposons l'acquisition de données sur base passive.

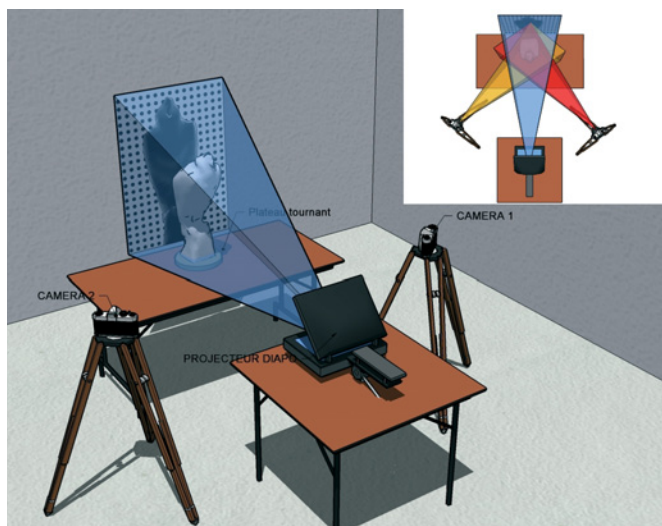


Schéma du dispositif de prise de vue.



#### Couples de photos convergentes issues de l'acquisition.

Notre méthode se base donc sur la stéréovision. Nous capturons pour chaque position de l'objet un couple de photos convergentes.

Le processus de prise de vue comprend :

- Un plateau tournant composé d'un ensemble de points ronds noirs déterminés en coordonnées par rapport au centre de ce plateau ;
- Un projecteur de diapositives ;
- Deux diapositives créant un réseau de points lumineux ou sombres ;
- Une caméra munie d'un trépied (deux positions).

Cette technique offre une flexibilité à toute épreuve (simplicité de mise en œuvre et adaptabilité aisée) et un coût réduit.

#### Appariement des points homologues

Il réside un problème essentiel à résoudre : la mise en correspondance entre les deux images des points homologues. Cette méthode doit répondre à deux contraintes duales suivantes. Les deux caméras doivent être suffisamment éloignées l'une de l'autre. En effet, plus l'angle d'intersection augmente et plus la précision de reconstruction est importante. En revanche, dans ce cas, la similarité entre les points caractéristiques diminue et complique donc la phase de mise en correspondance. La configuration des deux caméras est donc un compromis entre le nombre de points caractéristiques à appairer et la précision finale de reconstruction.

Notre mot d'ordre étant de mettre au point une alternative peu coûteuse et de rendre la création de tels modèles rapide et efficace mais aussi sérieuse, nous proposons l'utilisation du logiciel Photomodeler pour simplifier cette mise en correspondance.

La projection de points permet l'extraction de points caractéristiques. Cette extraction est d'autant plus simplifiée que Photomodeler réalise la détection automatique de cibles (Automatic Target Marking).

(1) Ce système utilise la projection de mires codées sur un objet, ainsi en analysant le signal capté et par comparaison avec le signal original, il devient possible d'estimer la géométrie du modèle.[VAL 02]



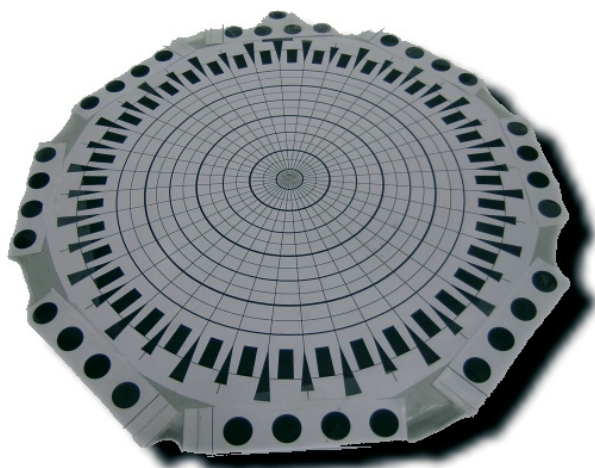
**Point photomodeler centré sur la tache et ellipse pour le marquage sub pixel.**

Cette option permet la création d'un point Photomodeler au centre d'une tache lumineuse ou sombre (dark/light targets). De plus il nous a été possible de réaliser un marquage Sub-pixel. Cet algorithme d'interpolation peut déterminer le centre d'une ellipse avec une précision en dessous du dixième de pixel. De fait, la mesure spatiale 3D obtenue par photogrammétrie est directement liée à cette interpolation sub-pixel. Ainsi la précision globale des mesures 3D peut être multipliée par deux si la détermination du centre des ellipses est réalisée avec une précision de 1/20 de pixel au lieu de 1/10 de pixel.

A la fin de cette étape chaque photo présente un nuage de points qui reste à appairer. De nouveau, l'utilisation d'une routine Photomodeler optimise cette étape. Cette optimisation concerne le temps d'appairage et le sécurise. En effet, un appairage manuel est long et soumis à des erreurs. Mais afin que Photomodeler soit capable de réaliser cette mise en correspondance automatique des points homologues, il faut que le couple de photos soit orienté (orientation relative et absolue). Nous proposons pour ce faire l'utilisation d'un plateau diviseur, de notre création, tournant, permettant le repérage dans l'espace et donc l'orientation des photos. Ce plateau diviseur nous est aussi utile lors de la capture de la carte des textures (voir plus loin dans l'article)

La couronne de points présente sur le plateau, nous permet de réaliser l'orientation des photos sans connaître de soucis quand à la détermination de points particuliers ; de plus, grâce à la mise au point d'un système de coordonnées, il devient possible de réaliser un contrôle quant à la qualité de cette orientation.

La fin de l'acquisition des données correspond à la production d'un nuage de points 3D décrivant l'objet à modéliser. La



**Plateau diviseur tournant utilisable pour l'orientation des photos.**



**Exemple d'œuvres ayant subi une acquisition par projection de points : Les Raisins (Massoule), Le Condor (Bachelet), et nuage de points produit.**



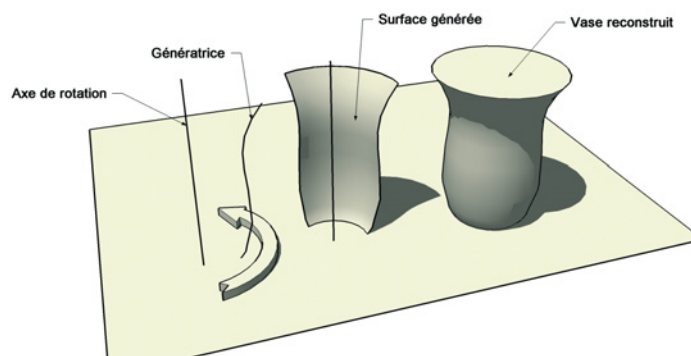
**Trois vases modélisés : Vase Gensoli, Vase Ruhlman, Vase du Creusot.**

méthode ici exposée a été éprouvée pour des objets tels que Le Condor de Bachelet, Les Raisins de Massoule qui présentent des formes sculpturales interdisant l'utilisation de surfaces mathématiques et rendant impossible une généralisation de leur forme.

Mais d'autres œuvres d'arts faisant l'objet de notre numérisation ont des formes particulières, notamment celles qui sont issues d'un procédé de fabrication sous rotation (Vases réalisés par tournage).

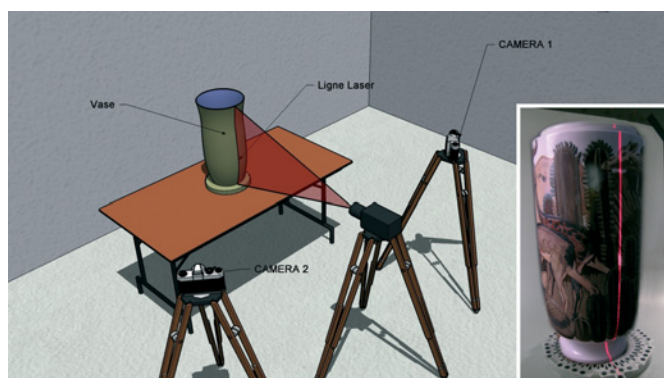
## Méthode d'acquisition propre aux vases

Nous établissons alors pour les vases un processus de reconstruction qui tient compte de leur caractéristique morphologique. Cette technique se base sur le dégagement d'un



**Technique proposée pour la reconstruction des vases.**





**Mode opératoire pour l'acquisition des vases.**

profil du vase (génératrice) et de sa généralisation autour de l'axe de rotation du vase.

Ainsi, et toujours dans un souci de conservation des œuvres, il nous faut extraire un profil caractéristique du vase. Ne pouvant agir directement sur le vase, nous proposons la projection d'une ligne laser (niveau laser calé et bullé) verticale matérialisant le profil voulu.

Puis, moyennant l'orientation d'un couple de photos de cette ligne, nous la restituons sous Photomodeler puis la généralisons autour de l'axe de rotation vertical du plateau (où nous avons bien entendu centré le vase auparavant).

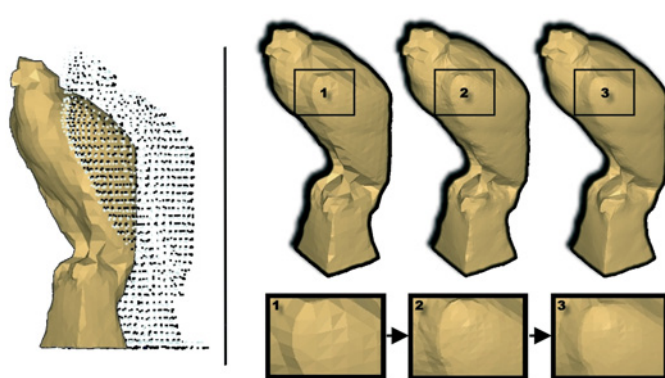
#### **Fin de la modélisation : création d'un modèle surfacique.**

Il s'agit ici de reconstruire un modèle à partir de l'ensemble des données acquises. Cette nouvelle étape précède le placage de texture jusqu'à l'obtention d'un modèle photo-réaliste. La reconstruction de la surface est réalisée par maillage fidèle aux points créés (interpolation). Cette méthode est très couramment utilisée. Elle consiste en la conception d'un maillage triangulé des primitives et en l'obtention de facettes triangulaires. Ce réseau peut être créé manuellement, cependant ce travail peut rapidement devenir fastidieux ! Il existe des logiciels orientés reverse engineering 3D<sup>2</sup> qui permettent la reconstruction de surfaces à partir de nuages de points [AME 98] [MOR 00].

Le logiciel que nous utilisons pour cette étape est 3DReshaper de la société TECHNODIGIT.

En utilisant notre technique, nous n'avons pas besoin de prétraitement des données (nettoyage) puisque tous les points sont supposés appartenir à la surface (à la différence des nuages de points issus des scan3D qui eux fournissent des données accompagnées de "bruit"). La méthode pour traiter ce problème est basée sur un algorithme en deux phases : une triangulation 3D de Delaunay (tétraèdres) est tout d'abord construite à partir du nuage de points, ensuite l'algorithme extrait une surface polygonale en sélectionnant les triangles adéquats de la triangulation 3D à partir de considérations géométriques et topologiques [BOI 02].

(2) Le reverse engineering est en fait la conception inverse, on part d'un produit existant, que l'on va numériser, afin de créer un fichier informatique.



**Modèle surfacique, lissage et densification du maillage.**

L'intérêt de ces algorithmes réside dans le fait que les données entrées ne sont pas détériorées par un ajustement. De plus, l'interpolation permet de densifier le maillage ou encore de l'alléger. Ainsi, une étape de lissage sans rétrécissement de la surface permet d'éliminer des erreurs produites par la procédure de triangulation, puis une étape d'optimisation est appliquée pour supprimer les sommets redondants. L'appréhension de l'ensemble de ces considérations a été simplifiée par l'utilisation du logiciel 3DReshaper.

Les modèles issus de cette nouvelle étape sont les modèles finaux en ce qui concerne la structure géométrique. Cependant, ils présentent toujours une carence en informations photométriques. Les modèles reconstruits sont maintenant prêts à subir l'application de texture.

#### **■ Rendu des textures**

Madame Christine Germain-Donnat a porté tout au long de cette étude une attention particulière quant à la numérisation des œuvres, éprouvant les techniques sur des formes diverses et de plus en plus complexes ou encore insistant sur des détails de modélisation tels que les têtes, les pieds ou encore les mains personnages sculptés.

Mais plus grandes étaient ses exigences concernant le rendu de la texture des différentes œuvres d'arts. En effet le rendu de texture donne une nouvelle dimension au modèle surfacique, le rendant plus similaire au modèle réel, plus abordable à la perception humaine et à l'entendement. Ces modèles texturés peuvent être aisément utilisés à la place des objets réels pour des études aussi bien géométriques que descriptives.

De tels modèles 3D texturés photoréalistes fournissent un grand nombre d'informations additionnelles pour les sujets de recherche à la condition bien sûr que l'application de texture soit réalisée avec précision. Toutes les informations photométriques reconstruites permettent de réaliser des mesures sur des points caractéristiques difficilement identifiables sur un modèle surfacique nu.

Ainsi des effets tels que des décors flammés (issus d'un mode de cuisson particulier : utilisation de sel) ou encore des créations de décors comme le pâte sur pâte (décor en relief) demandent une attention importante quand à leur rendu.

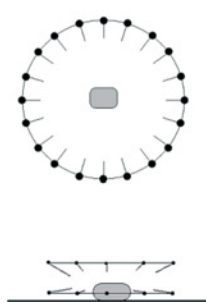
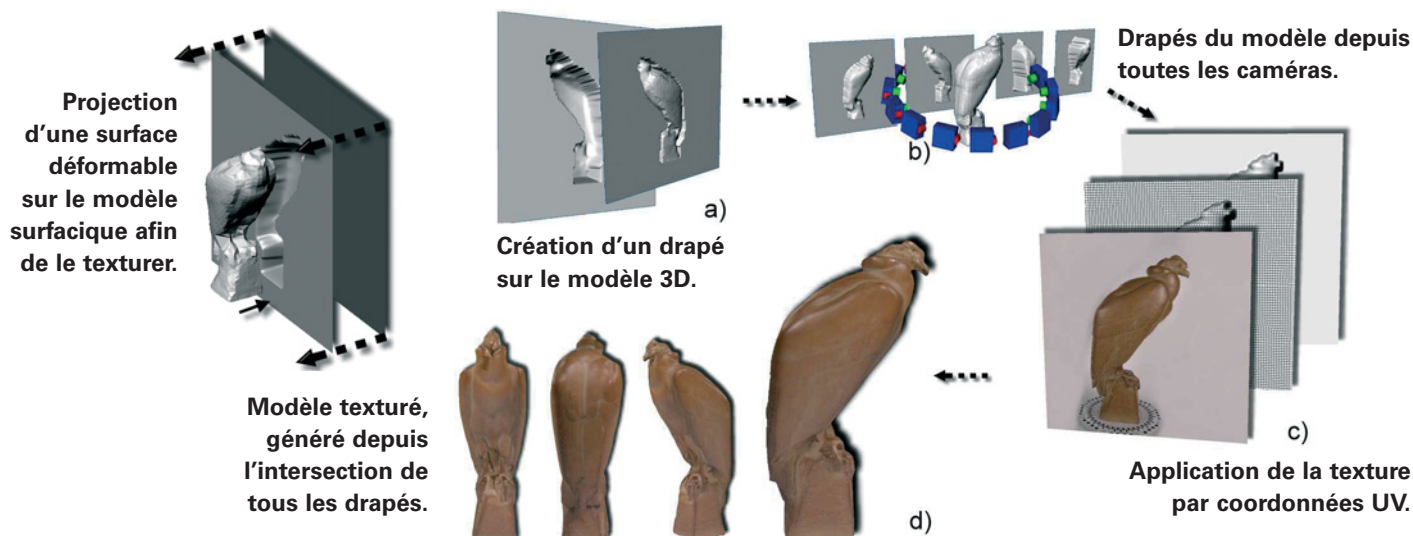


Schéma de prise de vue en anneaux [Eos systems, 03] et séquence d'acquisition pour le Condor de Bachelet.



## ■ ■ ■ Acquisition de la texture

Nous avons établi afin d'acquérir correctement la carte des textures, un processus de prise de vue systématique de l'intégralité des modèles [HAR 00].

Les modèles 3D dépendent aussi de la nature des photos. Il est ainsi essentiel de réaliser une couverture complète des objets à modéliser. Une solution efficace pour réaliser cette couverture est une méthode en anneaux. Nous réutilisons pour l'occasion notre plateau diviseur. Notre méthode d'acquisition consiste donc en un plateau tournant et une caméra fixe. L'éclairage et la caméra étant fixes, la luminosité, le contraste ainsi que la netteté des prises de vues ont été optimisés.

La pièce de musée faisant l'objet d'une acquisition, est placée sur un plateau tournant et une séquence de photos est réalisée à angles fixés : typiquement tous les 18 degrés, ce qui nous donne une séquence de 20 photos.

A partir d'une telle séquence et des données déjà en notre possession (modèle surfacique et position des caméras de prise de vue), nous réalisons l'application de la texture par projection de surfaces déformables issues des points de prise de vue (technique de projection de drapés orientés). Cette technique est basée sur le caméra matching, qui consiste en la création de caméras virtuelles positionnées dans les mêmes conditions d'orientation que les caméras réelles ayant servi à la prise de photos.

Nous nous attelons ainsi au mappage du modèle surfacique depuis tous les points de prise de vue. Chaque drapé est alors texturé par sa photo correspondante et le modèle 3D texturé photoréaliste final provient de l'intersection de toutes les surfaces déformables. Cette dernière étape de rendu de texture achève la partie modélisation de notre étude, nous allons maintenant pouvoir analyser l'ensemble des outils et des apports que nous proposons à Madame Christine Germain-Donnat pour l'aider dans sa mission de conservation.

## Les apports de la photogrammétrie pour la muséologie

### ■ Définition des besoins, des attentes et des réalisations

L'ensemble de nos apports ont été motivés par des constatations et des considérations concernant les tâches et les missions des conservateurs. Le climat de confiance et d'émulation entretenu avec madame Germain-Donnat nous a permis d'établir avec justesse et réactivité l'ensemble des besoins.

Ainsi nos contributions ont porté sur :

#### • Une meilleure connaissance des collections

La collection XIX<sup>e</sup>/XX<sup>e</sup> siècle du musée de la Céramique est composée d'œuvres en porcelaine ou en grès envoyées par la manufacture de Sèvres entre la fin du XIX<sup>e</sup> et les années

1930. Ces œuvres n'ont jamais été documentées. La photogrammétrie a permis d'établir pour chaque pièce, une fiche signalétique comportant les mensurations du vase (hauteur, largeur, profondeur, diamètre de col, diamètre de base, profil) ainsi que son volume de stockage et donc les dimensions d'une caisse de transport.

Par ailleurs, certains vases comme le vase Rulmann ou le vase Gensoli aux "danseuses cambodgiennes", comportent un décor tournant sur toute leur surface. La réalisation de "déroulés" a permis de confronter pour la première fois de manière aussi précise et détaillée, le dessin préparatoire conçu par l'artiste au décor effectivement réalisé à Sèvres.

- **Une préfiguration muséographique**

Quatre-vingt nouvelles pièces environ seront présentées cet automne au public.

Les réserves du musée de la Céramique sont situées au 6<sup>e</sup> étage du bâtiment, sous les combles.

Les pièces ont été déplacées une fois pour la prise de photographies puis ont réintégré les réserves. Après avoir numérisé les œuvres les plus significatives de la collection ainsi que les deux futures salles d'exposition, la photogrammétrie a permis d'envisager sereinement différents types de présentation muséographiques sans avoir à déplacer à nouveau des pièces souvent lourdes (jusqu'à 100 kg) et fragiles ni faire appel à des manutentionnaires.

Les manipulations des objets ont été considérablement réduites. Il en résulte une plus grande sécurité pour les œuvres, une moindre pénibilité pour le conservateur, un gain de temps, et un gain d'argent (manutentionnaires).

Les difficultés consistant à imaginer l'œuvre dans l'espace, à envisager les circulations du public autour des vitrines ou d'œuvres sur socle ont pu être abordées grâce à ce procédé. L'éclairage, (problèmes de reflet, lumière du soleil), la couleur des salles ont également fait l'objet d'une réflexion anticipée grâce à cette technique.

- **Une visite virtuelle**

La réalisation d'une visite virtuelle des deux nouvelles salles, disponible sur DVD et consultable sur une borne au ré de chaussée du musée, rend la collection accessible au plus grand nombre. Le musée peut également s'exporter hors-murs, dans les centres de loisirs, les maisons de retraite par exemple, et offrir la vision la plus juste de ses collections.

- **La création d'une base de données en 3D**

La base de données en 3D permet à l'amateur comme au scientifique de considérer l'objet de la meilleure manière qui soit, du point de vue des dimensions, du volume, mais aussi de la texture. Le rendu des surfaces et reliefs a été soigné, de façon à donner de l'objet une vision parfaitement illusionniste. Outre le pedigree de l'œuvre, chaque fiche propose des détails et des informations complémentaires : dessin préparatoire, œuvres de comparaison, signature. Les images 3D de la base donnent à la céramique un aspect vivant voire ludique, propre à faciliter l'accès à la connaissance de l'amateur et enrichir la vision du scientifique.

## ■ **Détail sur la création des outils**

### **Des données physiques ...**

Concernant la meilleure connaissance des collections, les œuvres d'art sont des objets de formes compliquées. De plus les informations concernant leurs caractéristiques physiques ne sont que très rarement répertoriées et sont le plus souvent incomplètes ; dans le cadre de la campagne muséologique de cette nouvelle collection, la photogrammétrie s'est présentée comme l'alternative heureuse à une intervention manuelle sur tous les vases.

Du reste, les données extraites peuvent être de plusieurs types : géométriques (points, lignes, surfaces) mais aussi visuelles (photométrie).

La richesse des données physiques des objets numérisés a rasséréiné Madame Germain-Donnat (Conservatrice du Musée de la Céramique de Rouen) dans son choix de faire confiance à la photogrammétrie.

Les exploitations des données et des modèles fournis par photogrammétrie sont nombreuses :

- Les mensurations des œuvres sont disponibles affichant une précision au-delà des besoins des conservateurs (besoins millimétrique pour une précision d'acquisition sub-millimétrique).
- La surface et le volume des objets sont déterminés. Cela permet notamment l'obtention des dimensions de la caisse (boîte) permettant l'emménagement de l'objet. De ce volume, il devient donc possible la gestion et le calcul de l'espace de stockage nécessaire dans les réserves.
- Les recherches concernant l'origine et l'histoire des vases sont facilitées. En effet, les vases sont inventoriés et classés par formes. La génération de coupes transversales et longitudinales permet la création de profils types. Le vase est alors caractérisé.
- Une documentation complète des œuvres est réalisée : photos, mesures ; dynamisant et consolidant la conservation préventive.

### **Un peu d'aide concernant les préfigurations scénographiques...**

Pour apporter notre aide à la scénographie, nous nous basons sur l'utilisation de modèles virtuels en lieu et place des modèles réels.

Nous avons créé le mobilier nécessaire à notre préfiguration grâce au logiciel Photomodeler et nous réutilisons les modèles 3D créés. Le processus de modélisation s'appuie sur la même théorie que précédemment. Une préfiguration que nous présentons ici est la réalisation d'une scénographie concernant une vitrine. Nous permettons au conservateur de matérialiser plusieurs aménagements de la vitrine et d'imaginer plusieurs mises en couleurs. Pour placer les objets dans la vitrine, nous utilisons une application VRML. Une fois leur place déterminée, nous générons une image permettant d'archiver et de conserver le travail effectué. En utilisant cette technique, nous avons créé des espaces de circulation : réflexion sur le placement des œuvres imposantes.







Caractérisation du volume de stockage et de la caisse de transport, dégagement des profils caractéristiques, sections et coupes.

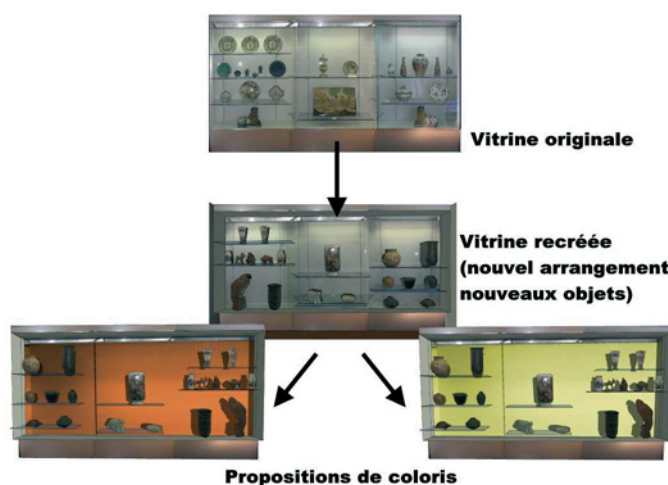
■ ■ ■ Nous avons permis au conservateur d'observer l'impact de la lumière du jour sur les vitrines ainsi que les éventuels reflets en fonction de l'heure de la journée (Figure 16 : Impacts des rayons du soleil sur les vitrines). Ces différents paradigmes sont réalisés grâce à la mise en coordonnées relatives des salles du musée par rapport au soleil et à la définition d'un jeu de lumières (système solaire).

## Concernant la base de données 3d...

Nous proposons une base de données 3D selon un modèle de type réseau (données fixes). La base a été créée par programmation HTML, et est consultable comme un site Web. Différents liens hypertextes permettent à l'utilisateur de réaliser sa recherche. Nous proposons ainsi plusieurs modes de consultation : accès aux fiches des objets par classement thématique (Artiste, date, couleur ...), par visionnage de l'ensemble des miniatures ou par visite guidée (proposition de la découverte d'un artiste ou d'une oeuvre). Les fiches des objets sont toutes créées selon un gabarit type et sont éditables. De plus il est possible d'y ajouter de nouveaux objets. La valeur ajoutée de notre base réside en la présence d'une fenêtre VRML permettant la consultation du modèle 3D de l'oeuvre, l'affichage des profils créés et l'accès à des outils d'études tels que les déroulés des décors filant (mise à plat des décors).

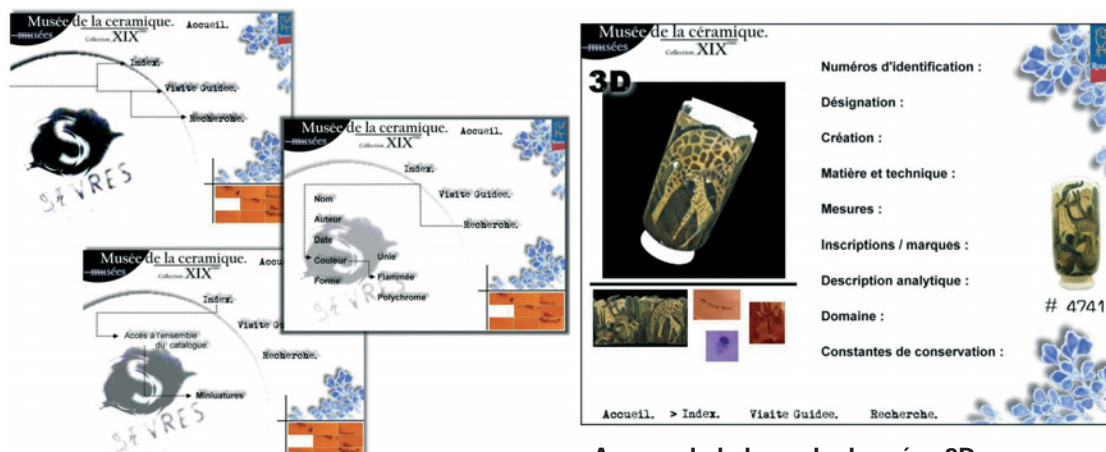
## Production de déroulés

Les déroulés sont les surfaces mises à plat des vases. Afin de les créer, nous tirons parti de notre méthode d'acquisition et



## Mise en espace d'une vitrine (position des objets et travail sur les couleurs).

de modélisation. Nous rappelons que la méthode d'acquisition consiste en la prise de vingt photos autour de l'objet et en la création de la surface du vase. Ainsi le vase, c'est à dire sa surface, se trouve décomposé en vingt sections. Nous calculons alors vingt orthophotos. Chaque orthophoto est composée d'une partie centrale propre à elle et de deux parties latérales réalisant la jonction avec la photo précédente et la photo suivante. Puis le déroulé est créé en accolant toutes les orthophotos extraites les unes aux autres à l'aide d'un logiciel de retouche d'images.



Aperçu de la base de données 3D.



Le vase Rulhman, son dessin préparatoire, et son déroulé

Cette production de déroulé permet au visiteur comme au scientifique d'appréhender le décor dans son ensemble, en effet le plus souvent les vases sont présentés en vitrine et ne permettent pas l'observation de tout le décor.

## Conclusion

Notre étude devait s'atteler à montrer quels pouvaient être les apports de la photogrammétrie et plus largement ceux de la modélisation 3D à la muséologie, en particulier sur leurs capacités à générer des modèles 3D photoréalistes et à proposer des outils d'aide au travail des conservateurs.

Ainsi nous avons présenté une approche de la modélisation 3D se basant sur la photogrammétrie rapprochée et utilisant deux procédés : projection de cibles lumineuses, extraction de primitives dans le but d'une généralisation. L'extraction des primitives a été simplifiée par l'utilisation du logiciel Photomodeler. Et nous avons proposé une solution originale pour le placage des textures (Drapés).

Puis, nous nous sommes axés sur la valorisation de l'ensemble de ces modèles 3D, afin de proposer des solutions techniques pour la conservation préventive, la scénographie, la gestion des collections et le partage de données.

Ainsi, nous pouvons affirmer que la photogrammétrie rapprochée a su être efficace et satisfaisante mais aussi bon marché pour l'acquisition des données. En effet, il nous faut comparer cette technique avec l'utilisation de scanners 3D par exemple. Ces nouveaux produits (Leica HDS, Trimble GS Mensi) sont onéreux à l'achat mais ils présentent de très bons résultats concernant l'acquisition (précision, densité).

Dans notre cas, l'utilisation d'un tel matériel n'était pas envisageable, d'autant plus que ces appareils ne fournissent pas de modèles surfaciques mais un nuage de points. Ce dernier doit encore subir les mêmes traitements que nous avons décrits.

Finalement, notre approche de la numérisation 3D a été testée sur quatre-vingt œuvres d'art et a permis la création de profils (caractérisation des œuvres), la mise en ligne d'une visite virtuelle, la réalisation d'une base de données 3D de la collection ou encore la production de déroulés et la reconstruction de pièces

manquantes. Nous pouvons dire que ce projet n'en est qu'à ses balbutiements vue l'ampleur de la mission de conservation. ●

## Références

[AME 98] Amenta N., Bern M., Kamvysselis M., [1998], *A New Voronoi-Based Surface Reconstruction Algorithm*, ACM Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH), p. 415-421.

[BOI 02] Boissonnat J.D., Cazals F., [2002], *Smooth Surface Reconstruction via Natural Neighbour Interpolation of Distance Functions*, Computational Geometry - Theory and Application, 22(1).

[Eos systems, 03] Eos systems, Inc., [2003], *Photomodeler Pro User's Manual*, Version 5, Vancouver, B.C., Canada.

[FAU 93] O. Faugeras, [1993], *Three dimensional computer vision : a geometric viewpoint*, MIT press.

[HAR 00] Hartley R., Zisserman A., [2000], *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, juin 2000.

[MOR 00] Morris D., Kanade T., [2000], *Image-Consistent Surface Triangulation*, Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hilton Head Island, South Carolina, USA.

## Contact

Sébastien VAREA  
ttvarea@yahoo.fr

## ABSTRACT

*This paper reports an approach based on multi images photogrammetry for 3D Modeling and reshaping and proposes original technique for orientation and target location. We apply this new technique for preventive conservation and muséology. Our 3D modeling approach has been extensively tested with nearly 80 objets. We also propose to help curator's works with the creation of a 3D Data Bas, a virtual visit and study tools (unrolled).*

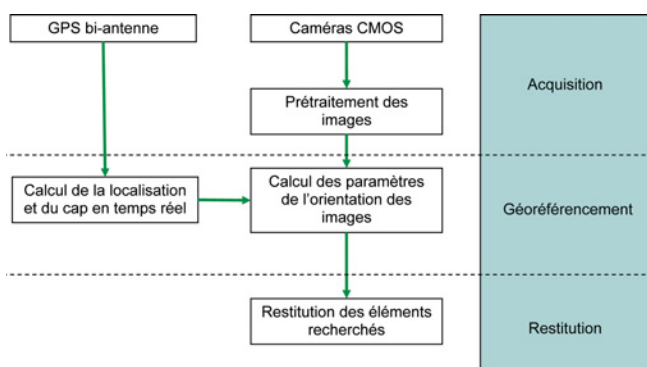
# Réalisation d'un système de stéréovision mobile routier

■ Nicolas JANVIER

*Dans le cadre de l'enrichissement des bases de données routières, l'élaboration d'un système de lever topométrique mobile s'impose comme étant la solution incontestable. Ainsi, le Laboratoire de Topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne développe le projet Photobus permettant de déterminer précisément la géométrie d'une route. Mon sujet de travail de diplôme s'imbrique dans cette problématique et se propose de réaliser un système de stéréovision mobile de précision submétrique, en s'inscrivant dans une stratégie low cost et open source. Sa singularité réside principalement dans l'utilisation de capteurs d'imagerie basés sur la technologie CMOS. Le concept est l'acquisition de clichés géoréférencés afin d'autoriser une restitution photogrammétrique pour localiser les éléments d'intérêts (c'est-à-dire l'axe, les panneaux de signalisation et la largeur des voies), à partir d'un système GPS bi-antenne.*

**L**e Laboratoire de Topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne met au point un système de lever topométrique mobile pour déterminer la géométrie d'une route : le Photobus. Ce projet s'inscrit dans le cadre de l'enrichissement des bases de données routières, via la collecte d'informations telles que la position précise de l'axe de la route, des panneaux de signalisation, ainsi que la détermination du nombre et de la largeur des voies. Ce travail de fin d'études s'inscrit dans le cadre de ce projet et consiste en la réalisation d'un système de stéréovision mobile de précision submétrique en respectant une stratégie de prix bas pour la partie matériel, et en privilégiant l'utilisation de logiciels issus de la communauté libre d'Internet.

Un système de stéréovision mobile est un cas particulier de "mobile mapping system" puisqu'il résulte de la fusion d'une composante localisation, via un système GPS bi-antenne dans ce travail, et d'une composante imagerie, soit ici deux caméras de type CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor).



**Figure 1 :** Principe de fonctionnement du système de stéréovision mobile.

L'investigation a sensiblement été orientée sur la composante imagerie, et la stratégie open source a nécessité la conception et la réalisation de programmes pour l'orientation des images et la restitution des objets et ce, à partir de bibliothèques librement accessibles sur Internet.

## Généralités sur les capteurs d'images numériques

Un capteur d'images numériques exploite l'effet photoélectrique de manière à mesurer l'intensité du flux lumineux incident. Les deux types de capteur existants sont les capteurs CCD (Charge-Coupled Device) et les capteurs CMOS. La différence primordiale entre ces deux technologies réside dans l'étape de conversion charge tension. Pour un capteur CCD, cette phase est effectuée juste avant la diffusion de l'image vers l'extérieur, tandis que pour un capteur CMOS, elle a lieu au niveau même du pixel.

Ces deux technologies possèdent un rendement quantique similaire dans la gamme des visibles, de l'ordre de 90%. Le CCD est incontestablement la référence pour les applications requérant un faible niveau de bruit, une grande résolution d'image et pour les applications à faible éclairage. Outre un prix et un encombrement moindres à matrice pixellaire équivalente, la technologie CMOS confère aux images acquises un contenu plus riche, mais au détriment de la qualité. Elle autorise aussi un accès indépendant à chaque pixel par une technique d'adressage x-y et permet ainsi de focaliser l'acquisition sur des régions d'intérêt. Enfin, cette technologie offre la possibilité de rassembler l'ensemble des fonctions d'une caméra dans un seul boîtier et permet même de réaliser des capteurs "intelligents" qui embarquent des fonctionnalités de traitement d'image. Elle présente une vitesse d'acquisition élevée



Capteur CMOS logarithmique

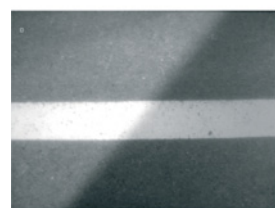
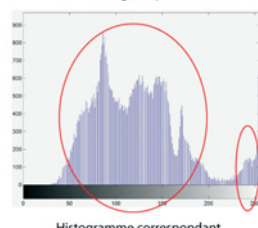


Image acquise

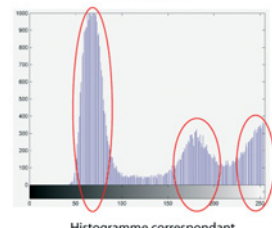


Histogramme correspondant

Capteur CCD



Image acquise



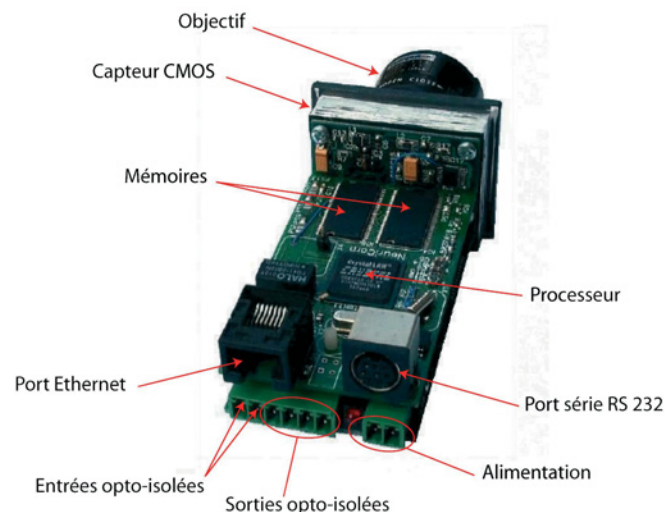
Histogramme correspondant

**Figure 2 : Comparaison d'une image acquise avec un capteur CMOS logarithmique et un CCD.**

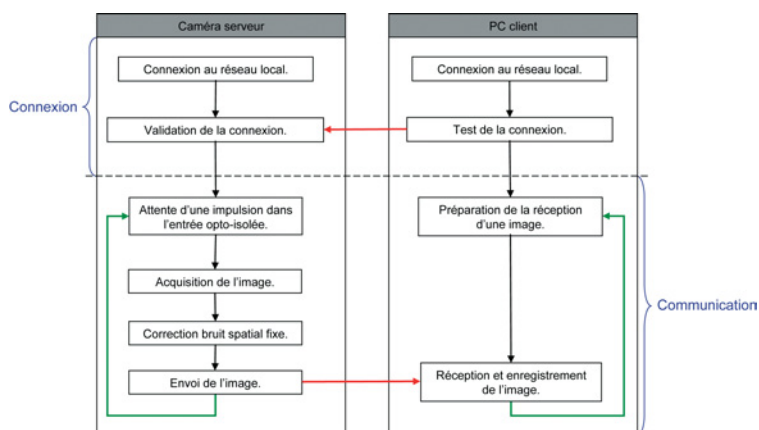
et le traitement peut être effectué dans la foulée. La technologie CMOS logarithmique est parfaitement adaptée au Photobus puisqu'elle possède une bonne réaction à l'illumination en évitant la saturation. Ceci est particulièrement utile en lever routier où les conditions d'éclairage varient fortement entre les zones d'ombre et de soleil.

## Etude du capteur d'imagerie Ethercam

L'Ethercam, fabriquée par Neuricam, est un système de vision complet combinant les fonctions d'acquisition et de traitement d'images dans un boîtier compact. Les images brutes ou interprétées sont transmises à un ordinateur client via une connexion Ethernet 10 Mbps. Une interface série RS-232 et trois lignes I/O opto-isolées autorisent une acquisition d'image synchronisée avec le temps GPS. Cette caméra est équipée d'un capteur monochromatique CMOS de taille VGA. La réponse du pixel est une fonction logarithmique de l'intensité lumineuse, conférant au capteur une gamme dynamique de six décades (120 dB). Comme pour tout capteur



**Figure 3 : Capteur d'imagerie Ethercam.**

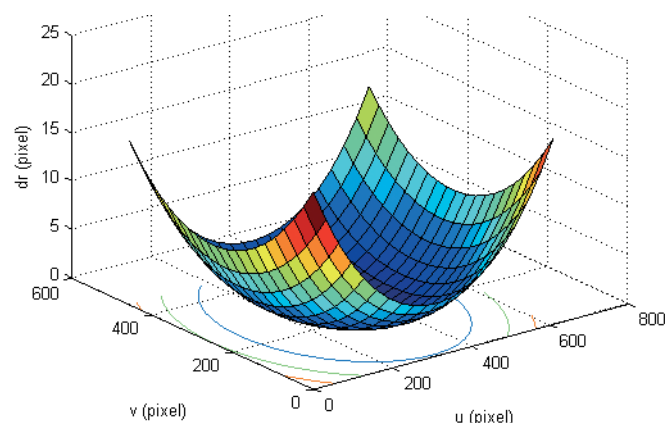


**Figure 4 : Architecture et interaction des programmes serveur et client.**

CMOS, les images brutes sont fortement entachées du bruit spatial fixe. La correction peut directement être effectuée sur la caméra avant le transfert vers l'ordinateur client.

L'Ethercam est entièrement programmable, sa gestion se découpe en trois parties : communication, acquisition et traitement de l'image. L'interaction de la caméra avec l'ordinateur fonctionne selon le principe du LAN (Local Area Network ou réseau local). Deux programmes interagissent : un serveur pour l'acquisition et le traitement des images par la caméra, et un client pour l'enregistrement des images sur l'ordinateur. L'architecture des programmes serveur et client est similaire et composée de deux séquences : une routine de connexion et une boucle de communication, comme illustrée sur la figure 4. Le traitement effectué se limite à la correction du bruit spatial fixe afin de conserver une cadence d'acquisition des images élevée.

Enfin, l'étalonnage des deux caméras a été effectué à l'aide de Camera Calibration Toolbox for Matlab de J.-Y. Bouguet, gratuitement disponible sur Internet<sup>1</sup>. L'avantage de cette boîte d'outil est qu'elle ne nécessite pas de polygone d'étalonnage puisqu'elle exploite les images d'un damier de carrés de côtés connus. La mise en œuvre est ainsi simplifiée, mais l'estimation des paramètres, notamment celle de la focale, est moins optimal qu'avec un polygone car les points connus sont disposés sur une surface



**Figure 5 : Modélisation de la distorsion pour une Ethercam avec CCT for Matlab de J.-Y. Bouguet.**

■ ■ ■ et non dans un volume. Les prises de vue du damier sont réalisées à différentes distances et sous plusieurs angles afin d'estimer au mieux les paramètres intrinsèques. Le calcul des éléments de l'étalonnage est basé sur l'exploitation de la relation entre les coordonnées image et terrain des points mesurés, soit l'équation de colinéarité. En connaissant les deux coordonnées il est alors possible de calculer les corrections à apporter pour améliorer l'exactitude de la relation. La distorsion des deux objectifs est très importante en bord d'image, puisque de l'ordre d'une quinzaine de pixels. Des comparaisons avec d'autres solutions de calibration, comme BINGO, ont été menées afin de vérifier la qualité de l'étalonnage réalisé.

## Conception et réalisation du système de stéréovision mobile

Le système de stéréovision mobile est une plateforme regroupant les deux capteurs d'imagerie et le dispositif de localisation afin de collecter des couples d'images géoréférencées pour restituer les objets d'intérêt. Une telle opération nécessite la connaissance des paramètres d'orientation interne et externe. Les premiers ont été déterminés lors de l'étalonnage des caméras et sont constants au cours du temps. Les seconds doivent être collectés au cours du déplacement du système. Le géoréférencement direct des images sans points d'appui est basé sur l'extrapolation des paramètres d'orientation et conditionne directement la qualité de la restitution. Il passe par une localisation dynamique précise des caméras à partir des données du GPS. Ceci nécessite une synchronisation parfaite des capteurs d'imagerie et de localisation sur une base de temps commune. Le principe de synchronisation repose sur l'émission d'une impulsion par le port série d'un ordinateur vers un synchronisateur qui divise le signal en trois impulsions qui vont simultanément déclencher les deux acquisitions d'images et la datation par le récepteur GPS.

La réalisation d'une structure rigide garantissant un repositionnement subcentimétrique des caméras CMOS sur le toit du véhicule est indispensable pour fixer les positions relatives des deux antennes et des deux caméras. Afin de réduire les effets de la distorsion, les caméras sont inclinées de façon à ramener la zone d'intérêt au centre de l'image. La base entre les deux caméras influence directement la précision de la restitution, mais elle est

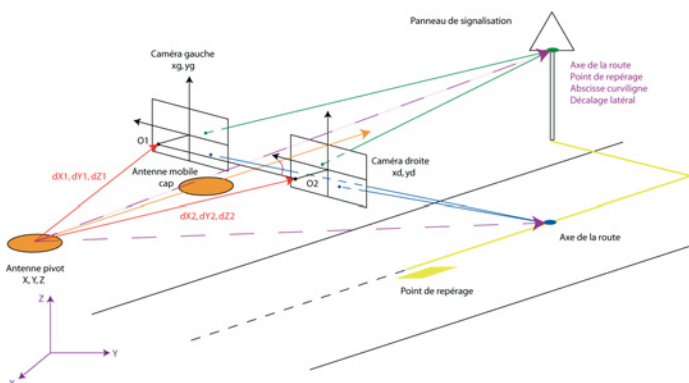


Figure 6 : Système de stéréovision mobile.

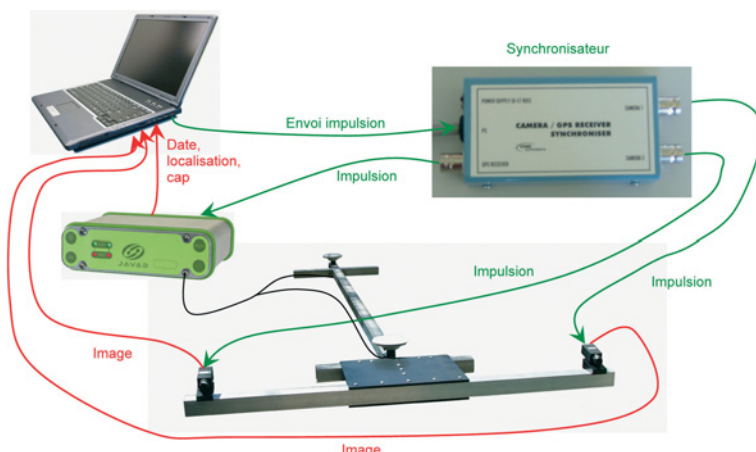


Figure 7 : Fonctionnement du système de stéréovision mobile conçu.

limitée par la largeur du véhicule et doit respecter la législation routière. La mise au point est réalisée à la distance du plan dans lequel sont situés les objets à restituer. Pratiquement, la profondeur de champ est déterminée en tenant compte de la diversité des scènes à observer variant d'une simple route à une 2x3 voies. Il est ensuite aisé d'effectuer la mise au point en fonction du premier et du dernier plan net. Le démarrage du système demande une bonne organisation. Le récepteur GPS doit être mis en marche en premier pour récupérer des observations d'initialisation et s'assurer d'un nombre de satellites visibles suffisant. Ensuite les caméras doivent être démarrées et connectées au LAN<sup>2</sup> séparément. Enfin le synchronisateur est activé et le bon fonctionnement du dispositif peut être vérifié.

La vitesse du véhicule lors des deux tests réalisés oscillait entre 30 et 40 km/h tandis que la cadence d'acquisition est fixée à 2 images par seconde. Il est primordial de garder une vitesse constante pour un espacement entre les couples d'image régulier. Il existe en effet une interaction entre la vitesse du système, la cadence d'acquisition et l'espacement entre deux couples successifs. Le nombre de couples sur lesquels un point sera visible, donc la qualité de restitution, dépend de la vitesse du véhicule.

## Géoréférencement direct des images

Le concept du géoréférencement direct autorise l'acquisition d'images géoréférencées, c'est-à-dire que chaque cliché se voit attribuer indépendamment des autres ses paramètres de localisation et d'orientation. Dans le cadre de ce travail, le géoréférencement direct est basé sur la transformation repère antenne - repère image, qui est fixe au cours du déplacement du véhicule grâce à la structure. Cette transformation implique l'expression des positions des deux antennes GPS dans les repères images. Les deux antennes définissent un repère, dénommé repère antenne, dont l'origine est l'antenne arrière, le plan xOy est horizontal, l'axe Ox dirigé selon la

(1) [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)

(2) Local Network Area ou réseau local, ici le protocole d'accès est Ethernet.

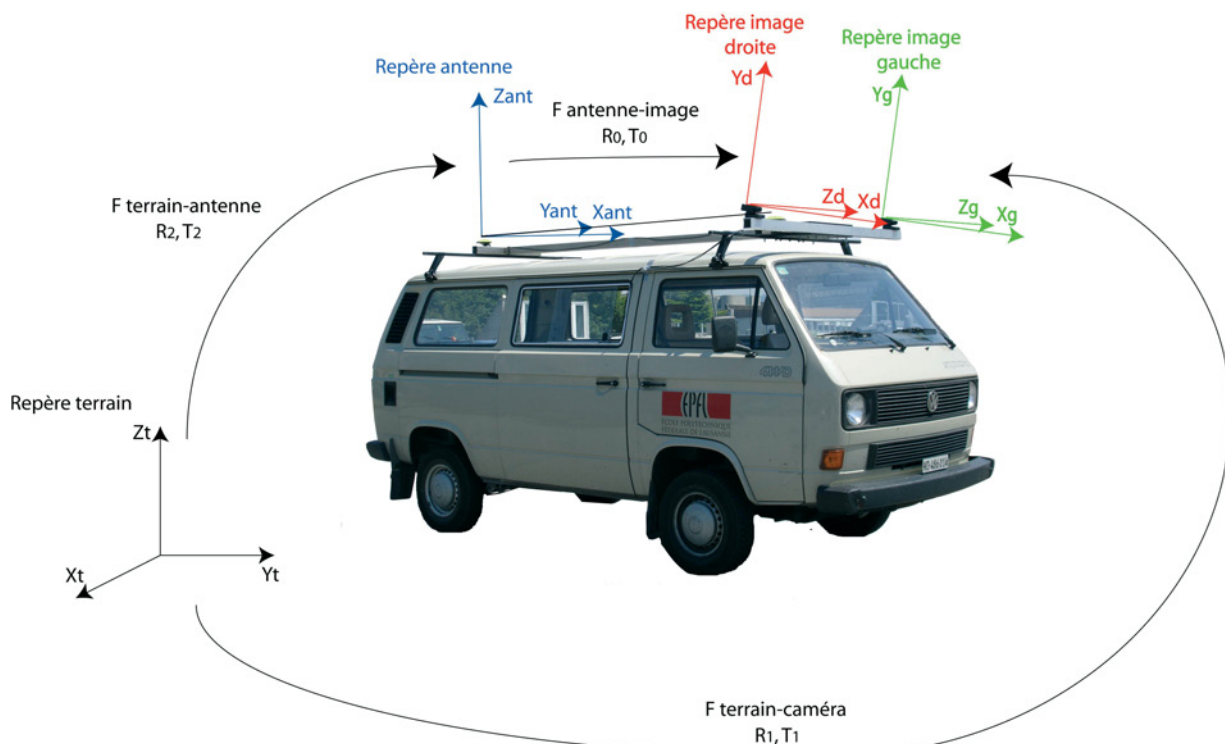


Figure 8 : Les différents repères utilisés.

droite définie par les deux antennes et l'axe Oz vertical. L'axe Oy complète le repère de façon à ce qu'il forme une base orthogonale directe. Les deux repères images sont donc fixes par rapport au repère antenne. Cette transformation sera alors déterminée lors d'un calibrage et ensuite utilisée pour géoréférencer les images acquises en la combinant avec la transformation entre le repère terrain, afin d'obtenir la localisation et l'orientation des images dans le repère terrain à partir des coordonnées des deux antennes.

Les passages entre ces repères sont régis par des transformations 3D qui peuvent être modélisées de la façon suivante :

$$\text{Repère antenne - caméra } F_0 : \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} = R_{\text{topo}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{antenne}} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = R_0 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{antenne}} + T_0$$

$$\text{Repère caméra - terrain } F_1 : \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{terrain}} = R_{\text{topo}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = R_1 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} + T_1$$

$$\text{Repère terrain - antenne } F_2 : \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{antenne}} = R_s \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{terrain}} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = R_2 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{terrain}} + T_2$$

Le principe de détermination de la fonction de géoréférencement consiste à réaliser des mesures GPS et acquérir des couples d'images simultanées devant un polygone composé de cibles connues en coordonnées. En combinant l'acquisition de mesures GPS avec des prises d'image du polygone, il est possible de calculer la transformation repère caméra - repère terrain (F1), grâce à l'équation de colinéarité qui fournit la matrice de rotation entre le repère antenne et terrain ainsi que les coordonnées du sommet dans le repère terrain. Ensuite, la transformation entre le repère terrain et celui des antennes GPS est aisément obtenu en résolvant l'équation F2,

après avoir exprimées les coordonnées terrain des antennes dans le repère antenne :

$$X_{\text{antenne arrière}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; X_{\text{antenne avant}} = \begin{bmatrix} \sqrt{(X_{\text{terrain arrière}} - X_{\text{terrain avant}})^2 + (Y_{\text{terrain arrière}} - Y_{\text{terrain avant}})^2} \\ 0 \\ Z_{\text{terrain arrière}} - Z_{\text{terrain avant}} \end{bmatrix}$$

Les éléments recherchés sont alors obtenus en composant les transformations F1 et F2 :

$$R_0 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} + T_0 = R_2 \cdot \left( R_1 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} + T_1 \right) + T_2 \quad \text{soit} \begin{cases} R_0 = R_2 \cdot R_1 \\ T_0 = R_2 \cdot T_1 + T_2 \end{cases}$$

Ainsi au moment de la restitution, chaque image sera géoréférencée à l'aide des formules suivantes :

$$X_S^{\text{terrain}} = X_{\text{arrière}}^{\text{terrain}} + R_2^{-1} \cdot T_0$$

$$R = R_2^{-1} \cdot R_0$$

La transformation F2 dépend de la position du véhicule au moment de la mesure, elle est donc calculée pour chaque couple d'images. Il convient de remarquer que le roulis et le tangage sont négligés. Du fait de la position des deux antennes, le roulis n'est pas accessible, mais comme le dévers de la route varie de 2.5% à 5%, l'erreur commise est minime puisqu'inférieure au centimètre. Les pentes rencontrées usuellement sur les routes sont de l'ordre de 6%, soit un tangage de 3.5°. Le cadre de ce travail étant l'évaluation de la stéréovision mobile CMOS, les acquisitions seront réalisées en milieu découvert et relativement plat, les pentes seront donc largement inférieures à 6%. Le tangage sera alors de l'ordre de 1°, il peut donc être négligé.



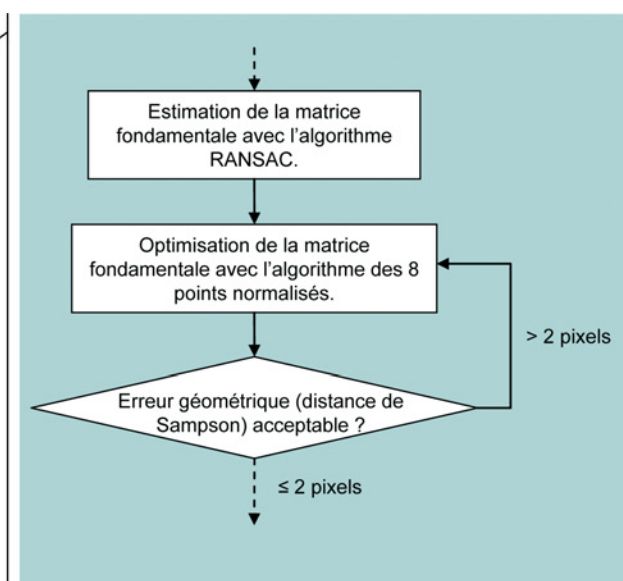
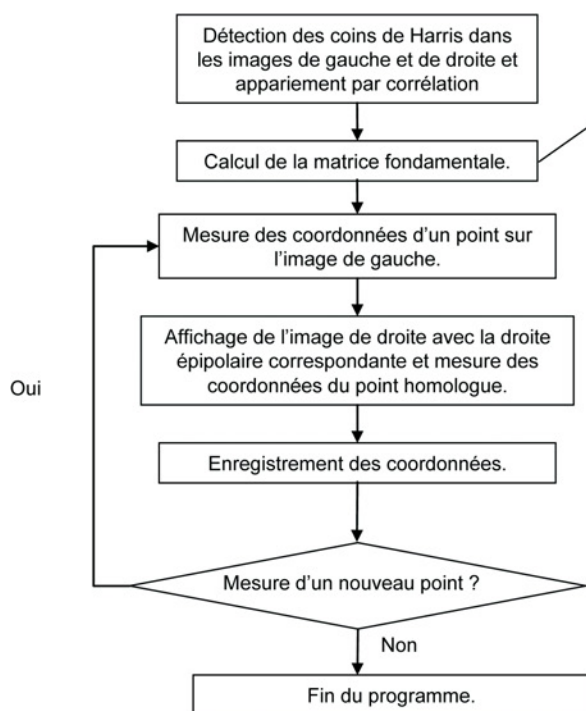


Figure 9 : Organigramme du module de mesure.

## ■ ■ ■ Identification des caractéristiques d'une route par restitution photogrammétrique

La restitution implique la mesure des coordonnées image des points d'intérêt. Elles sont ensuite introduites dans les équations inverses de la colinéarité pour l'obtention des coordonnées terrain :

$$\begin{cases} X = X_s + (Z - Z_s) \frac{r'_{11}x + r'_{12}y - r'_{13}c}{r'_{31}x + r'_{32}y - r'_{33}c} \\ Y = Y_s + (Z - Z_s) \frac{r'_{21}x + r'_{22}y - r'_{23}c}{r'_{31}x + r'_{32}y - r'_{33}c} \end{cases}$$

avec (X,Y,Z) les coordonnées terrain du point mesuré, (x,y) les coordonnées image du point mesuré, (X<sub>s</sub>,Y<sub>s</sub>,Z<sub>s</sub>) les coordonnées terrain du sommet perspectif de la caméra, c la focale et r'<sub>ij</sub> les termes de la matrice de rotation de l'image considérée.

Tout d'abord, un module de mesure des coordonnées image a été développé en utilisant la géométrie épipolaire afin de faciliter l'identification des points d'intérêt dans l'image de droite. Sa mise en œuvre s'appuie sur deux boîtes d'outils librement accessibles sur Internet : *MATLAB Functions for Computer Vision and Image Analysis*<sup>3</sup> de Peter Kovesi et *Structure and Motion Toolkit for Matlab*<sup>4</sup> de Philip Torr. La mise en œuvre de la géométrie épipolaire repose sur un calcul de la matrice fondamentale à partir des coins de Harris dans les images de gauche et de droite, qui sont ensuite appariés via une comparaison basée sur le maximum de corrélation. La matrice fondamentale est ensuite estimée à l'aide de l'algorithme de RANSAC, qui permet

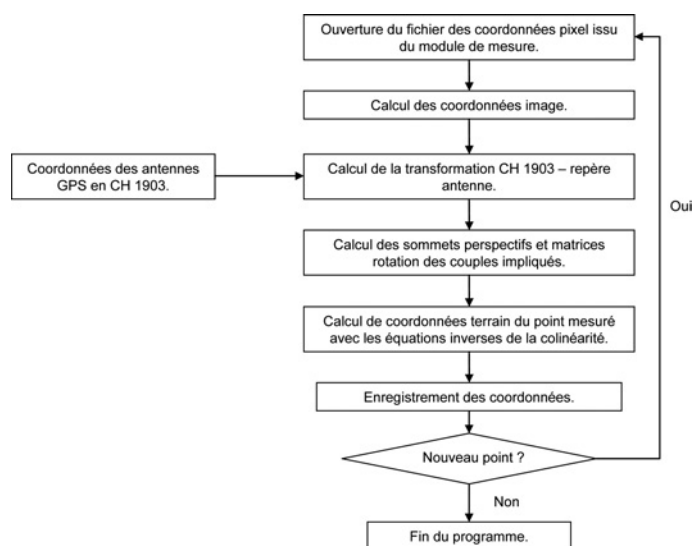


Figure 10 : Organigramme du module de restitution.

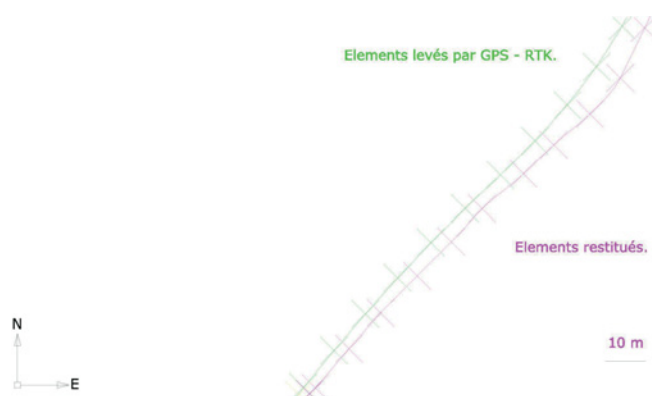


Figure 11 : Plan des axes obtenus par levé GPS-RTK et par restitution.

(3) <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>

(4) <http://research.microsoft.com/~philip/torr/>

d'éliminer les erreurs d'appariement et d'obtenir un premier résultat fiable. Le calcul est ensuite affiné de façon itérative avec l'algorithme des 8 points (Longuet - Higgins, revu par Hartley - 1997), le critère d'itération étant une distance de Sampson inférieure à deux pixels.

Ensuite, un module de restitution a été conçu pour appliquer aux coordonnées précédemment mesurées, les équations inverses de la condition de la colinéarité en fonction des données de géoréférencement direct. Il est indispensable de s'assurer que les paramètres fixes dans la fonction de géoréférencement respectent bien la géométrie des deux caméras déterminée par la structure les accueillant.

Les premiers résultats mettent en évidence une erreur importante de 4 à 5 mètres dans le sens latéral. Mais la précision n'a pas pu être vraiment estimée puisqu'un problème de communication est venu perturber le test. En effet un décalage au niveau de la numérotation des images a été remarqué, l'image de gauche numéro 882 correspond à l'image de droite numéro 875. Un phénomène d'embouteillage a vraisemblablement eu lieu au niveau de la connexion Ethernet.

## Conclusion

L'étude des caméras CMOS logarithmiques montrent qu'elles sont parfaitement adaptées à la capture d'image en extérieur, notamment en zones soumises à de brusques variations d'éclairement. De plus, ces capteurs intelligents autorisent la réalisation de traitements embarqués afin de soulager l'ordinateur hébergeant le logiciel de mobile mapping de certaines tâches de post-traitement. De part leur coût, elles permettent de respecter pleinement la tactique de prix bas.

La conception des programmes nécessaires à la mise en place du processus photogrammétrique a pu en partie s'appuyer sur des boîtes d'outils performantes et gratuitement disponibles sur Internet. L'étalonnage des caméras et la détermination de la géométrie épipolaire ont été réalisés par ce biais avec satisfaction. Les logiciels de mesure et de restitution ont été spécialement développés en utilisant les techniques de la photogrammétrie. La stratégie d'*open source* est ainsi respectée.

La conception du dispositif d'acquisition a débouché sur l'élaboration d'une structure accueillant les capteurs et la détermination de la méthode de synchronisation. Le géoréférencement a ensuite pu être réalisé à l'aide d'un système GPS bi-antenne exploitant le concept de station de référence mobile.

Les éléments essentiels dans l'élaboration d'un système de stéréovision mobile bon marché et efficace sont une parfaite synchronisation des capteurs d'imagerie et de localisation, un étalonnage des caméras optimal, ainsi qu'un géoréférencement direct précis. Ces deux dernières conditions ont été remplies. ●

## Bibliographie

- Chong. A. K. (2004)** *Optimizing the accuracy of a low-cost photogrammetric motion and study system*, University of Otago, New Zeland, The Photogrammetric Record 19(108) : 296-310, December.
- Gontran. H. (2005)** *Thèse en préparation*, Laboratoire de Topométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Gontran. H., Skalous. J. et Gilléron. P.-Y. (2004)** *Photobus : en route vers la cartographie mobile en temps réel*, Laboratoire de Topométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Géomatique Suisse, septembre.
- Heikkilä. J., Silvén. O. (1997)** *A four step camera calibration procedure with implicit image correction*, Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, Finland, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97), San Juan, Puerto Rico, p1106-1112.
- Luhmann. T. (2000)** *Nahbereichsphotogrammetrie*, Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Wichmann, Heidelberg, Deutschland.
- Torr. P. H. S. (2002)** *A Structure and Motion Toolkit in Matlab "Interactive Adventures in S and M"*, Technical Report MSR-TR-2002-56, june.
- Notices d'utilisation Etherecam** *User Manual, Programmer Manual*, axLinux - cdb89712.

## Contact

**Nicolas JANVIER**  
nico.janvier@wanadoo.fr

## ABSTRACT

*Within the framework of the improvement of road databases, the design of a mobile mapping system asserts oneself to be the undisputable solution. In this way, the Geodetic Engineering Laboratory at the Swiss Federal Institute of Technology (EPFL) has developed the Photobus project to determine the geometry of a road with accuracy. The topic of my Master's Thesis tackles this problem and consists in carrying out a mobile stereovision system with a submetric accuracy, within the scope of a low cost and open source strategy. Its singularity resides in the use of image sensors based on CMOS technology. The concept is the acquisition of georeferenced pictures so as to allow a photogrammetric plotting of the elements of interest (i.e the road axis and signs, as well as the width of the lanes). The adopted strategy leads to realize the programs needed to plot, by using open source toolboxes if possible.*