

PRODUCTION D'IMAGES SYNTHÉTIQUES DE HAUTE RÉOLUTION POUR LA STÉRÉORESTITUTION PHOTOGRAMMÉTRIQUE

par
Florin Savopol, Michel Boulianne et Clément Nolette
Centre de recherche en géomatique
Université Laval, Québec
Canada G1K 7P4
E-mail: Florin.Savopol@scg.ulaval.ca

Commission II, IWG II/III

KEY WORDS: softcopy, CCD camera, sensors, video, fusion, close_range

ABSTRACT

In the past few years, the significant progress achieved in photogrammetry was concentrated mainly upon plotting instruments. The introduction of digital photogrammetry software marked the transition to entirely digital solutions for the plotting phase, while the data capturing relied upon the old analogical method of pictures recorded on photographic film.

This article offers a new and entirely digital method; It replaces film recording and gives a better resolution than single images delivered by CCD cameras. The method is intended for terrestrial photogrammetry. It creates a synthesised image equivalent to an image captured by an imaginary large scale sensor. The data comes from a series of video images captured by a camera sweep (by vertical and horizontal rotation from a fixed point).

The following parameters must be chosen for the synthesised image: orientation of the optical axis, principal distance and pixel scale. The algorithm used calculates the geometry of a synthesised image equivalent to a single high resolution image which would cover the same area as the total of all the individual sub-images. The global synthesised image is created by resampling.

A test site was built in order to test the work's methodology and calibrate the video cameras.

The results demonstrate that one can produce synthesised images of a higher resolution than those of usual CCD cameras. These images can then be used for stereorestitution using any digital video plotter.

RÉSUMÉ

Les progrès importants réalisés en photogrammétrie depuis quelques années ont été axés principalement sur le perfectionnement des instruments de restitution. L'introduction des logiciels de photogrammétrie numérique a marqué le passage à une solution entièrement numérique pour la phase de restitution pendant que l'étape d'acquisition des images reste liée à la solution analogique classique des images sur film photographique. Le présent article propose une solution pour remplacer le captage photographique des images par une méthode entièrement électronique qui pourrait être utilisée pour la photogrammétrie terrestre. Elle est basée sur la création d'une image de synthèse équivalente à une image captée par un capteur CCD (Charge Coupled Device) fictif de grande dimension. On utilise comme source de données une série d'images vidéo captées en mode stationnaire, par "balayage" à partir d'un point fixe, en imprimant à la caméra des mouvements de rotation.

Un site de référence a été conçu et réalisé pour tester la méthode de travail et aussi pour faire le calibrage des caméras vidéo utilisées.

L'image globale de synthèse est réalisée par rééchantillonnage des images du balayage après avoir choisi les paramètres suivants: orientation de l'axe optique, distance focale et échelle de pixels de l'image de synthèse (ou image fictive). L'algorithme utilisé calcule les paramètres de la géométrie d'une image de synthèse équivalente à une seule image de haute résolution qui aurait pu couvrir la même zone que l'ensemble des images individuelles utilisées. Les résultats démontrent qu'on peut produire des images de synthèse d'une résolution supérieure à celle des caméras courantes et les utiliser pour la stéréorestitution photogrammétrique.

1 INTRODUCTION

1.1 Cadre général

Depuis quelques années, la photogrammétrie a fait de nouveaux progrès avec l'apparition des appareils de restitution entièrement numériques. Mais, pour capter des

images de haute résolution, on travaille encore souvent avec des photographies analogiques classiques sur film de format moyen ou grand. Les caméras numériques de haute résolution restent rares et coûteuses. Par exemple, une caméra numérique avec une image d'environ 2000 par 3000 pixels (une résolution inférieure à celle des caméras métriques de format moyen) se vend aux environs de 35 000 \$ US.

Le but des recherches présentées dans cette communication est de remplacer, dans le flux de données, le volet analogique (photos sur film) par une méthode complètement numérique. On propose de créer des images synthétiques à partir de plusieurs images individuelles captées à l'aide d'une caméra vidéo de type CCD (Charge Coupled Device) de format courant. L'image de synthèse produite aura des dimensions sensiblement supérieures à celles de chaque image individuelle et sera équivalente à une image captée par un senseur CCD fictif de grande dimension.

1.2 Systèmes existants pour l'acquisition des images numériques

Comme le mentionnait Light, les systèmes d'acquisition d'images restent tributaires du film pour la photogrammétrie aérienne:

"The lack of quality large format digital cameras is a major impediment to digital image photogrammetry at this time." (Light, D.L., 1996).

Cette affirmation est valable principalement pour la photogrammétrie aérienne. Dans le cas de la photogrammétrie terrestre, elle reste valable pour les applications concernant des objets en mouvement. Pour les objets fixes, des solutions ont été déjà conçues dans le but d'augmenter la résolution des images numériques.

D'après la littérature disponible, il y a seulement deux solutions pour obtenir des images numériques d'une résolution supérieure à la résolution d'un seul senseur (une seule caméra CCD standard): les caméras CCD avec balayage interne, qui peut être "macro" ou "micro" (voir section 1.2.1) et les systèmes de macro-balayage ("macro-scanning system" en anglais).

1.2.1 Caméras CCD avec balayage interne

Les caméras CCD avec balayage interne utilisent deux principes pour augmenter la résolution des images obtenues: le macro-balayage et le micro-balayage (Lenz et Lenz, 1993).

Le macro-balayage consiste à déplacer un senseur CCD classique dans le plan focal d'une caméra et ensuite additionner les images individuelles pour former une image plus grande. Un système de mesure de grande précision est indispensable pour pouvoir positionner chaque image individuelle dans le plan focal. On peut partager ces caméras en fonction du type du senseur:

- les caméras utilisant un senseur linéaire ("Line Scanning Camera") où une barrette d'éléments de type CCD est déplacée dans une direction perpendiculaire à l'axe longitudinal du senseur. Un exemple est la caméra Rollei LSC qui a un mécanisme de précision pour déplacer la barrette avec des "pas" de 7 microns avec une précision (répétabilité) de 2 microns (Miedlig, E. et Wester-Ebbinghaus, W. 1991).

- les caméras utilisant un senseur CCD bi-dimensionnel qui se déplace dans les deux directions du plan focal. Une des solutions les plus perfectionnées pour positionner chaque image individuelle est adoptée par les caméras avec balayage de réseau ("Réseau Scanning Cameras" ou RSC). Dans ces caméras, le capteur CCD est déplacé parallèlement à une plaque de verre sur laquelle un réseau de points calibrés est gravé. Les positions de tous les points du réseau sont connues avec une grande précision. Un minimum de 4 points du réseau doivent être visibles sur toutes les images individuelles qui seront positionnées en appliquant une transformation affine. Une image globale sera rééchantillonnée pour couvrir la superficie du plan focal couverte par les images individuelles. Des détails sur les caméras-réseau sont présentés par Miedlig, E. et Wester-Ebbinghaus, W. (1991) et Peipe et al (1992). Une comparaison entre la "Réseau-Scanning" caméra et d'autres techniques de mesure a été faite par Riechmann, W. (1992).

Le micro-balayage consiste à déplacer le senseur CCD dans le plan focal de la caméra dans les deux directions sur des très courtes distances, inférieures à la largeur d'un pixel du capteur. On parle ici d'un pixel physique du capteur CCD ou d'un élément d'enregistrement. L'image est ensuite rééchantillonnée en utilisant des algorithmes d'interpolation pour calculer des valeurs pour des pixels de dimensions inférieures aux pixels originaux (Lenz et Lenz, 1993). Toutes ces solutions restent coûteuses car elles impliquent des caméras avec des pièces mécaniques de grande précision.

1.2.2 Les systèmes de macro-balayage

Les systèmes de macro-balayage ("macro-scanning systems") consistent à enregistrer plusieurs images à partir d'un point fixe en imprimant à la caméra des mouvements de rotation et d'inclinaison et à enregistrer avec précision les angles de rotation. Cette solution est discutée par Wester-Ebbinghaus, W., (1988) et dans Chapman et al (1992) où l'on retrouve des détails sur une utilisation dans un environnement dangereux (une centrale nucléaire). En pratique, il faut construire un photothéodolite numérique (ou vidéo-théodolite).

La mathématique pour le cas général d'un système de caméra vidéo avec rotation et inclinaison ("digital turning and tilting camera") a été présentée par Uffenkamp (1993). Il donne aussi les formules pour tenir compte des erreurs dues à la non-perpendicularité des axes de rotation. Uffenkamp fait la distinction entre les vidéothéodolites et les systèmes des caméras vidéo avec rotation et inclinaison. La différence correspond plutôt aux méthodes d'exploitation des images obtenues: le vidéothéodolite est utilisé comme un photothéodolite classique où le film a été remplacé par une caméra CCD tandis que la conception du système de caméra CCD tournante et inclinable correspond aux techniques photogrammétriques de balayage séquentiel des objets. La construction mécanique reste la même. Il s'agit donc d'un instrument mécanique de haute précision, avec un système de mesure des angles comparable à un théodolite:

"The two bi-axial device should be equipped with a two high precision angle measurement units." Uffenkamp (1993).

1.3 Solution proposée

Le présent article propose une nouvelle solution pour obtenir des images numériques d'une résolution supérieure à la résolution d'un seul senseur (ou une seule caméra CCD courante). Plusieurs images individuelles sont utilisées pour produire une image de synthèse équivalente à une seule image de très haute résolution qui aurait pu couvrir la même zone que l'ensemble des images individuelles utilisées. Le principe de la construction de l'image de synthèse est présenté de façon schématique à la figure 1.

2. Procédures et algorithmes utilisés.

2.1 Orientation des images.

Dans une première approche, les images individuelles ont été enregistrées en utilisant un montage de type "caméra vidéo avec rotation et inclinaison" que l'on peut aussi appeler un "système vidéo avec macro-balayage par rotation". Les angles mesurés ont été utilisés seulement pour orienter (positionner) avec précision les images individuelles entre elles.

Pour produire l'image de synthèse globale il faut connaître avec précision les orientations relatives entre les axes des images captées. Leur orientation absolue peut être utile dans certains cas, tout dépendant de la méthode de restitution photogrammétrique envisagée et la disponibilité des points d'appui. Par exemple, si l'on envisage la stéréorestitution, il faut avoir une connaissance approximative de l'orientation absolue des images enregistrées pour pouvoir choisir l'orientation de l'axe optique de chaque image de synthèse de manière à pouvoir former des couples stéréoscopiques.

Une deuxième approche prend en considération un montage plus économique, sans système de mesure d'angles. Un logiciel de calcul par gerbes spatiales est utilisé pour obtenir les angles entre les axes optiques des images individuelles.

2.2 Calcul de l'image de synthèse

L'algorithme pour le calcul de l'image de synthèse est une adaptation directe de la méthode présentée par Wolf, P. (1983) pour le calcul du déplacement de l'image d'un point sur une photographie inclinée par rapport à une photographie verticale équivalente. Ce déplacement est égal à la différence entre la distance radiale (par rapport à l'isocentre) d'un point de l'image verticale équivalente et la distance radiale de l'image du même point sur la photographie inclinée (voir figure 2). L'angle λ est mesuré à l'isocentre dans le sens horaire à partir de la ligne principale. La valeur du déplacement est donnée par:

$$dt = (r_j)^2 \sin t \cos 2 \lambda / (f - (r_j) \sin t \cos \lambda) \quad (1)$$

où (r_j) est la distance radiale d'un point "j" par rapport à l'isocentre, "f" est la distance focale et "t" est l'angle d'inclinaison de la photographie (voir la figure 2).

Pour la construction de l'image de synthèse il faut considérer séparément la relation entre chaque image individuelle et l'image nouvelle. Il faut donc entre autres obtenir l'orientation de chaque image par rapport à la future image de synthèse et trouver les valeurs de l'angle "t" et de la position de l'isocentre pour chaque couple formé par l'image globale et chacune des images individuelles. La formule (1) est alors utilisée pour former l'image de synthèse en retrouvant, pour chaque pixel de la nouvelle image, son correspondant sur les images originales. L'image de synthèse est considérée comme l'image verticale équivalente et les images individuelles comme des images inclinées. Le rééchantillonnage est fait successivement pour chaque image individuelle.

3. Réalisation pratique

Pour mettre en pratique la méthode proposée par la présente proposition, un montage expérimental a été construit et un logiciel a été mis au point. Plusieurs images synthétiques ont été produites.

3.1 Caméra et montage expérimental

La prise de vue se fait à l'aide d'une caméra vidéo Sony CCD VX3 utilisant la norme RS-170 qui représente le format vidéo courant en Amérique du Nord. La carte de numérisation utilisée est de type Pulsar^{MD} de la compagnie MATROX Inc. de Montréal.

Un montage expérimental a été réalisé au Laboratoire de métrologie du Département des sciences géomatiques de L'Université Laval. Il permet d'imprimer à la caméra vidéo des mouvements de rotation et d'inclinaison et de mesurer les angles de rotation. La caméra a été attachée à la lunette d'un théodolite Wild T3 à l'aide d'un dispositif de fixation rigide à trois points. Un autre montage, plus économique et plus léger est en préparation. Il ne comprend qu'un dispositif de fixation permettant des rotations de la caméra, sans aucun système de mesure d'angles. L'axe optique de la caméra passe par le point d'intersection des deux axes de rotation. Le centre de perspective se trouve le plus près possible du point d'intersection des deux axes de rotation.

3.2 Calibrage du système

Le calibrage des caméras vidéo a été fait sur un site de calibrage tridimensionnel comprenant 133 cibles de différentes grandeurs. Ce site sert aussi de référence pour les présents travaux. La position des cibles a été déterminée à l'aide des méthodes classiques de microgéodésie. Le calibrage a été fait en utilisant la technique d'auto-calibrage (Kenefick et al., 1972). Pour être rigoureux, il faut parler du calibrage du "système

d'acquisition d'images numériques". La caméra vidéo est seulement une partie de l'ensemble caméra/carte de numérisation d'image qui forme le système d'acquisition d'images numériques et il a été démontré qu'il faut faire le calibrage du système en entier, car:

"The location of the principal point depends on the configuration of the frame grabber."
(Gruen et Beyrer, 1992).

3.3 Enregistrement des images

Une série d'images individuelles ayant un recouvrement de 25% à 30% ont été captées en mode stationnaire ("balayage" à partir d'un point fixe en imprimant à la caméra des mouvements de rotation et d'inclinaison). Pour la prise de vue on a utilisé le site de référence qui a servi aussi pour le calibrage des caméras. Les angles de rotation de la caméra sont mesurés directement.

3.4 Rééchantillonnage

La construction de l'image de synthèse est faite en deux étapes, soit:

Dans un premier temps, l'opérateur choisit les paramètres de l'image de synthèse (orientation de l'axe optique fictive, position du point principal, nombre de pixels, distance focale);

Dans une deuxième étape, le logiciel calcule d'abord les paramètres pour chaque couple formé par une image originale et l'image de synthèse, soit la position de l'isocentre, l'orientation de la ligne principale, les limites de la zone de couverture. Le logiciel procède ensuite au rééchantillonnage proprement dit.

Un exemple d'image de synthèse est présenté à la figure 3.

4. L'évaluation des résultats

L'évaluation des images de synthèse peut se faire de plusieurs manières:

- visuellement, en vérifiant la qualité des raccords des images;
- en formant un modèle stéréoscopique à l'aide de 2 images synthétiques et en prenant des mesures sur des points de vérification;
- en redressant l'image de synthèse sur un des plans déterminés par des cibles du site de référence et en utilisant les cibles se trouvant dans le même plan comme des points de vérification (vérification simplifiée).

Les premières évaluations ont été faites en utilisant des images de synthèse redressées. Une vingtaine des points de vérification ont été mesurés sur chaque image de synthèse évaluée. L'erreur moyenne quadratique obtenue a été de 1,1 pixels en X et de 0.7 pixels en Y.

Les résultats de ces premières évaluations montrent que la précision des images de synthèse exprimée en pixels de

l'image est similaire à celle des images vidéo individuelles. L'avantage de la nouvelle méthode est qu'au contraire des images vidéo individuelles qui possèdent des dimensions fixes, déterminées par le format vidéo de la caméra (480 lignes pour la norme RS-170), les images de synthèse peuvent avoir des dimensions largement supérieures, en fonction du nombre d'images individuelles utilisées pour produire la nouvelle image.

La différence de précision entre la direction X et Y obtenue dans les expériences précédentes peut avoir deux explications:

a.- Les images vidéo ont été numérisées en utilisant un pas d'échantillonnage produisant un nombre de 640 pixels pour une ligne de l'image (direction X de l'image) et obtenir de cette manière des pixels carrés. Cependant, le fabricant annonce une résolution horizontale de 530 lignes pour cette caméra vidéo. On peut considérer que la différence de précision en X et Y est due, de moins en partie, à la construction du capteur CCD qui utilise des pixels physiques (éléments d'enregistrement) non-carrés, ayant leur dimension dans l'axe des X plus grande que celle dans l'axe des Y.

b.- On peut aussi considérer que la précision inférieure dans la direction X est due, en partie, à l'influence du "ligne jitter", tel que décrit par Bayer (1990).

5. Travaux en cours, recherches planifiées

Dans le but de mettre au point une méthode économique de prise de vue, des images seront enregistrées sans mesurer les angles, avec un montage simplifié. Un programme utilisant le principe des gerbes spatiales sera utilisé pour retrouver les angles entre les images individuelles à partir des points de liaison qui seront identifiés et pointés manuellement sur chaque zone de recouvrement de deux images successives. Dans une deuxième phase de raffinement de la méthode, cette étape sera automatisée dans la mesure du possible en utilisant des techniques d'autocorrélation sur les points de liaison.

De plus, une étude sera réalisée sur les limites théoriques et pratiques du système (nombre maximal des images versus réduction de la précision)

6. Conclusions

Une méthode de construction (rééchantillonnage) d'une seule image globale artificielle de précision supérieure aux images individuelles a été présentée. Les premiers résultats sont encourageants et démontrent qu'il est possible d'utiliser une caméra vidéo courante (fournissant des images de 480 lignes) pour produire des images de synthèse d'une résolution supérieure et d'augmenter de cette manière les limites de la précision de mesure en vidéogrammétrie.

7. Remerciements

Le montage expérimental utilisé pour les présentes recherches a été réalisé par les techniciens du Laboratoire de métrologie du Département des sciences géomatiques de L'Université Laval. Les auteurs veulent les remercier pour leur précieuse collaboration.

8. RÉFÉRENCES

Chapman, D., Deacon, A. et Hamid, A. (1992). CAD Modelling of Radioactive Plant: the Role of Digital Photogrammetry in Hazardous Nuclear Environments. ISPRS Congress Washington, 1992, Vol 29. B5, p.p. 741-752.

R. Lenz et U. Lenz (1993). New Developments in High Resolution Image Acquisition with CCD Area Sensors. Optical 3-D Measurement Techniques II, Zurich, Switzerland, October 4-7, 1993, p.p. 53-62.

Beyer, H. (1990). Ligne jitter and Geometric Calibration of CCD-Cameras. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 45, 1990, p.p. 17-32.

Gruen, A. et Beyer, H. (1992). System Calibration Through Self-Calibration.

Kenefick, J.F., Gyer, M.S. et Harp, B.F. (1972). Analytical Self-Calibration. Phot. Eng., Vol. 38, No. 11, 1972.

Miedlig, E. et Wester-Ebbinghaus, W. (1991). Digital Photogrammetric Systems from Rollei, Digital Photogrammetric Systems, Ebner, Fritsch, Heipke (Eds.) Wichmann, Karlsruhe, 1991

Peipe, J. (1992) Development of a 4 x 5" Réseau Camera for High Precision Industrial Photogrammetry. ISPRS Congress, Washington, 1992, Vol 29. B5, p.p. 19-23.

Riechmann, W. (1992). The accuracy of the Réseau-Scanning caméra (RSC) in comparison with theodolite and photogrammetric systems, ISPRS Congress, Washington, 1992, Vol 29. B5, p.p. 582-593.

Uffenkamp (1993) : Conception of a digital turning and tilting camera, Optical 3-D Measurement Techniques II, Zurich, Switzerland, October 4-7, 1993, p.p. 72-79.

Wester-Ebbinghaus, W., (1988). High Resolution Object Recording by Vidéo-Théodolite, ISPRS Congress, Com. V, Kyoto.

Wolf, P. (1983). Elements of photogrammetry, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.

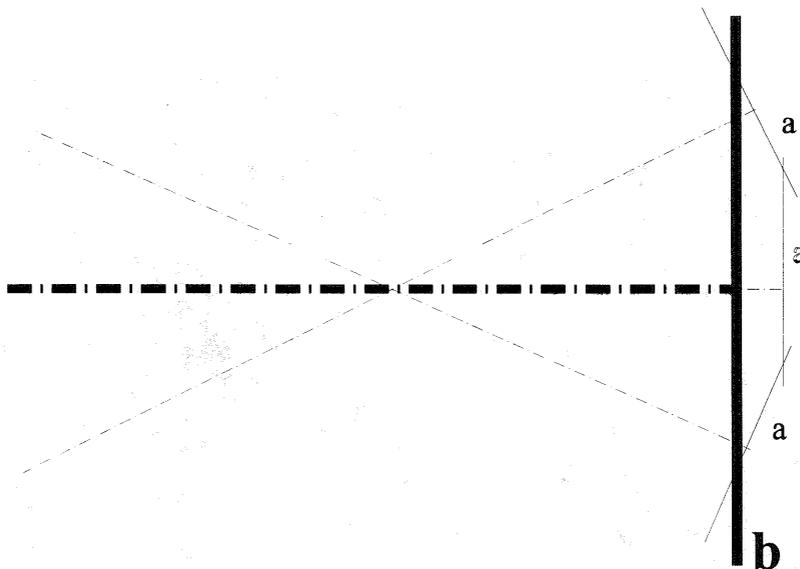


Figure3. Exemple d'image de synthèse.

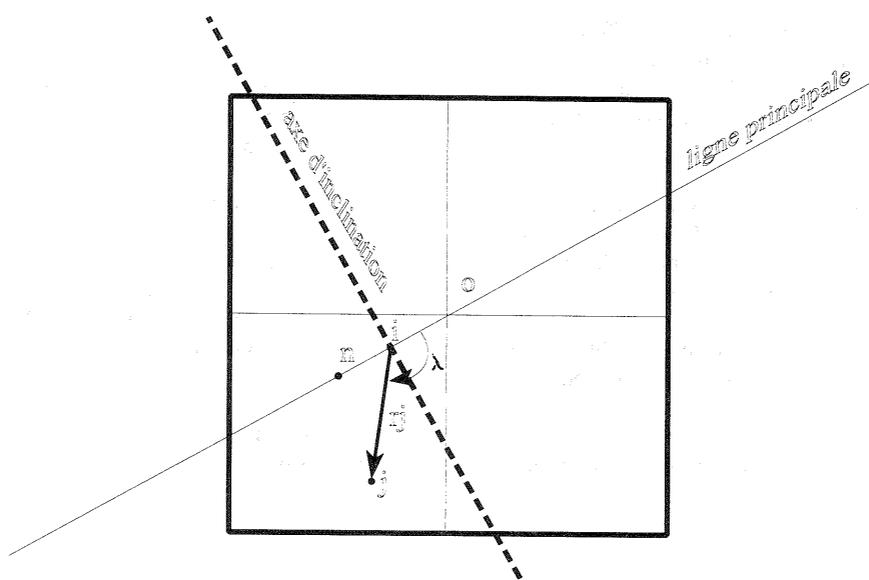


Figure 2: Géométrie d'une photographie inclinée: (i) isocentre, et distance radiale " r_j ".

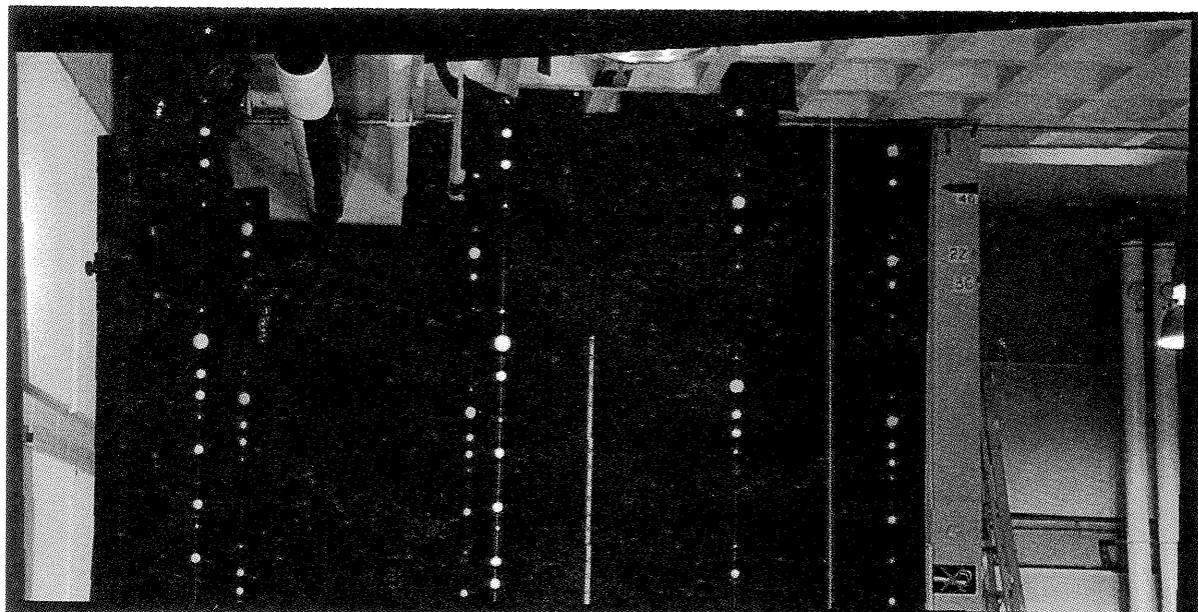


Figure3. Exemple d'image de synthèse.