

# ETUDE DE LA TECHNIQUE DE CORRELATION EPIPOLAIRE DENSE (CED), APPLICATION AU CHANTIER ARCHEOLOGIQUE DE KILWA, ARABIE SAOUDITE.

Société d'accueil : *Equipe MAP PAGE, INSA Strasbourg*  
*Equipe EA 1132 HiSCANT, Université Nancy 2*



Nancy-Université  
Université Nancy 2

PFE présenté par : **Jean-François Hullo**

Directeur (directrice) du PFE : *Pierre Grussenmeyer*

*Saba Fares*

Correcteurs : *Pierre Grussenmeyer*

*Emmanuel Alby*

---

## 1. Introduction

Depuis quelques dizaines d'années, les scanners laser ont démontré leur efficacité dans la production de nuage de points denses. D'un autre côté, la photogrammétrie avait atteint un degré d'automatisation important dans la détection d'entités linéaires, et dans la génération de nuages de points quasi-denses, c'est-à-dire de points dits « d'intérêts » (arêtes, coins), mais n'offrait pas de solutions simples pour la génération de nuages de points denses.

En 2007 sont apparues plusieurs solutions commerciales implémentant les contraintes épipolaires d'un couple stéréoscopique. Guidant ainsi les opérations d'appariement, ces contraintes permettent la détermination subpixelaire des positions des points homologues.

L'équipe MAP PAGE UMR 694 de l'INSA de Strasbourg s'intéresse depuis plusieurs années aux applications terrestres de cette technique pour la conservation du patrimoine.

Les objectifs de ce projet de fin d'études furent les suivants :

- Réaliser un état de l'art de la Corrélation Epipolaire Dense, et effectuer une veille tout au long du projet sur les avancées du domaine
- Comprendre la théorie de cette méthode, isoler les sources d'erreurs et leur influence
- Etablir une méthodologie d'acquisition et de traitement
- Tester le logiciel PhotoModeler® Scanner pour des applications archéologiques
- Analyser les résultats, du point de vue de la réponse aux besoins des archéologues, et en comparaison à d'autres techniques
- Proposer des types de travaux et de rendus réalisables grâce à cet outil
- Fournir une base de départ pour les utilisateurs ou développeurs à venir

La technique a été expérimentée au cours de la mission archéologique franco-saoudienne de Kilwa, en Arabie Saoudite, co-dirigée par Saba Fares, Université Nancy 2, et Khalifa Al-Khalifa, directeur du musée archéologique de Riyad, en Arabie Saoudite.

## 2. Les principes de la Corrélation Epipolaire Dense

L'idée générale de la CED est de déterminer pour chaque point de l'image de référence, à un pas défini (pixelaire ou subpixelaire), son homologue dans la deuxième image du couple stéréoscopique. Les relations de stéréophotogrammétrie nous permettent alors de calculer la position 3D du point correspondant pour chaque point homologue.

L'appariement des points homologues appartient à la catégorie des problèmes « mal-posés ». En effet, la solution peut ne pas être unique (plusieurs pixels peuvent avoir la même valeur d'intensité), peut ne pas exister (en raison du bruit), et/ou être instable (radiométries globales des images différentes). Il convient donc d'appliquer des contraintes à ce problème pour converger vers une solution existante, unique et stable.

La CED utilise deux contraintes, pour un couple dans le cas normal (axes de prises de vue parallèles, base perpendiculaire à ces axes) :

- Utilisation du voisinage dans l'appariement : en ne considérant plus seulement une valeur unique, mais un vecteur composé des intensités des pixels voisins, il est alors possible d'utiliser un descripteur de ressemblance entre les deux vecteurs, et donc de déterminer un maximum de ressemblance en un point.
- Utilisation de la contrainte épipolaire : dans un couple stéréoscopique, la géométrie épipolaire nous informe que pour chaque point observé dans une image, ce même point ne peut être observé dans l'autre image que le long d'une droite, dite « épipolaire », et connue (Fig.1). De plus, la définition d'un intervalle d'éloignement de l'objet par rapport aux prises de vues correspond à un intervalle le long de cette droite. L'intervalle de recherche pour l'appariement n'est donc plus toute l'image, mais situé le long d'un segment.

On distingue tout au long du processus (de l'acquisition à la génération du modèle 3D) un ensemble de sources d'erreurs qu'il convient d'isoler pour en comprendre l'influence, et tenter de les minimiser :

- Le rapport  $R = \text{Base}/\text{Eloignement}$  influe, différemment, sur la géométrie des prises de vue (intersections des faisceaux homologues), le recouvrement des images, et l'apparence des objets sur les deux images du couple.
- Les paramètres intrinsèques de la caméra, et en particulier les distorsions optiques qui transforment les droites (dont les épipolaires) en courbes. (Fig.2)
- La position et l'orientation des caméras, qui diffèrent du cas normal.

Le rapport  $R$  doit être optimisé lors de l'acquisition des photographies, les paramètres intrinsèques sont déterminés pendant la calibration de l'appareil, et distorsions et écart au cas normal sont corrigés par rectification épipolaire (création de deux caméras idéales virtuelles, dans le cas normal).

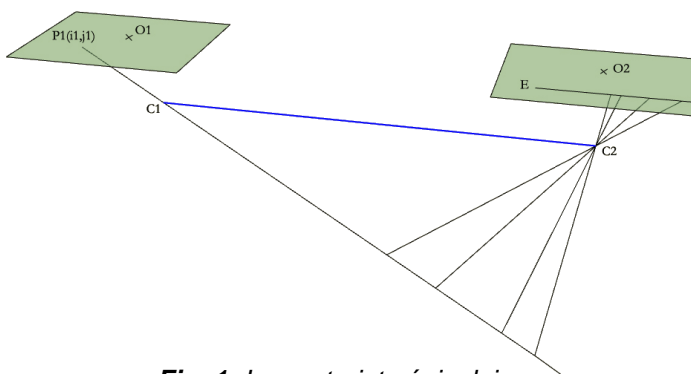


Fig. 1: La contrainte épipolaire

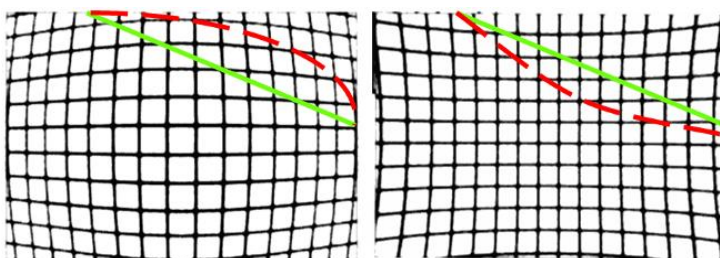


Fig. 2: Influence des distorsions optiques sur la ligne épipolaire

Acquisition des données	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calibration</li> <li>2. Cibles sur l'objet *</li> <li>3. Acquisition de la stéréopaire</li> <li>4. Correction de distorsions</li> </ol>
Orientation des images	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Détermination de points homologues (automatique; manuelle)</li> <li>2. Calcul d'orientation</li> <li>3. Echelle</li> <li>4. Détermination de la géométrie épipolaire</li> </ol>
Corrélation Epipolaire Dense	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rectification épipolaire *</li> <li>2. Intervalle de recherche 3D&gt;1D</li> <li>3. Homologues épipolaires</li> <li>4. Triangulation 3D</li> </ol>
Post processing	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nettoyage du nuage (débruitage, segmentation)</li> <li>2. Maillage</li> <li>3. Nettoyage du modèle maillé (lissage, bouchage des trous, unification des normales)</li> </ol>

\* : Facultatif, mais utile

Fig. 3: Etapes de la CED

La détermination des limites de l'influence des paramètres sur l'exactitude et la précision des résultats nous permet d'établir les étapes du processus, en définissant des recommandations à chaque étape. (Fig.3)

### 3. Expérimentations sur le site de Kilwa, Arabie Saoudite

Du 6 au 27 avril, la première mission de fouille et de prospection franco-saoudienne s'est déroulée du côté saoudien de la frontière avec la Jordanie. Le site se trouve à 500 km à l'Est du golf d'Aqaba, en plein désert. On trouve au centre de la zone de recherche d'un rayon de 25 km (Fig.4) des restes d'installations qui, d'après les premières recherches, dateraient des neuvièmes ou dixièmes siècles. Les vingt personnes de l'équipe sur place se sont partagées autour des deux grandes problématiques : épigraphie et archéologie.

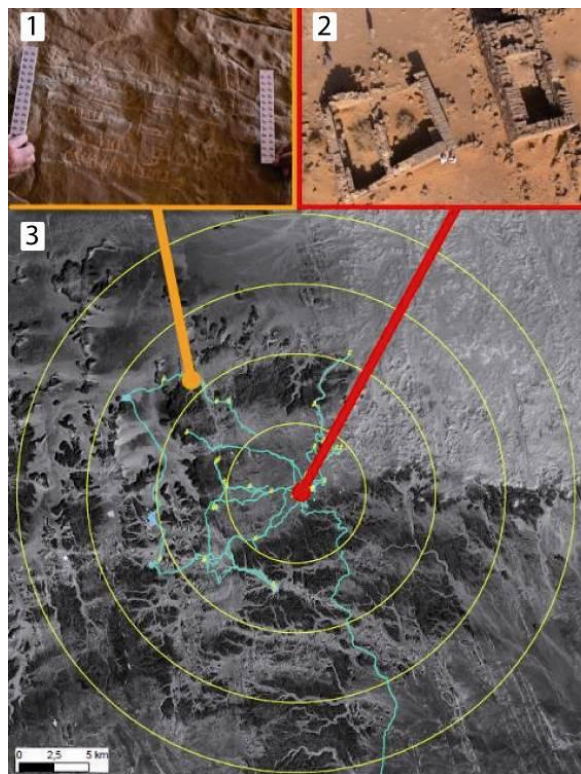


Fig. 4: Zones de prospections et de fouille/relevés



Fig. 5: gauche : modèle 3D ; droite : couple stéréo

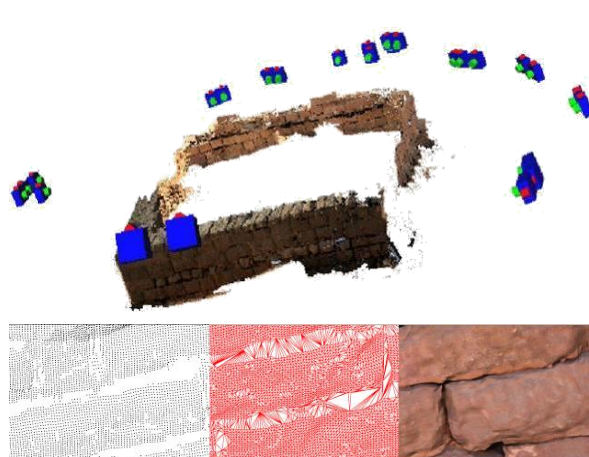


Fig. 6: haut : modèle 3D complet ; bas : détail.

Pour l'épigraphie, la principale demande résidait dans la documentation des sites prospectés. Un SIG est déjà en place, comprenant différents champs descriptifs des gravures et inscriptions rencontrées, et des liens vers une base de données photos. Dans le cas de découvertes spécifiques demandant leur relevé, les méthodes restent soit très lentes et peu descriptives, soit très peu précises quant à la géométrie du levé. Il fallait donc une technique, visuellement exacte, géométriquement correcte, rapide, souple, adaptative et peu onéreuse.

Des couples stéréoscopiques ont été acquis pour une dizaine d'inscriptions avec un Canon EOS 5D Mark I, puis modélisée par CED sous PhotoModeler Scanner (Fig.5). Formes, grain et nature de la roche, conditions d'éclairage contenu ont été variées, afin de disposer d'un échantillon qui soit le plus représentatif possible des types d'objets relevables dans ces régions.

Pour l'archéologie, les travaux se déroulèrent dans l'aire centrale de quelques centaines de mètres de côté, au centre de la zone. Les façades extérieures d'un bâtiment ont été relevées par CED (Fig. 6). Dans le même temps, un architecte effectua un relevé manuel pierre à pierre de ces façades, à des fins de comparaison des techniques.

Le relevé comporte une cinquantaine de photographies, et la résolution du nuage de points et du demi-centimètre. Lors du levé du Modèle Numérique de Terrain de la zone, une vingtaine de points furent également levés sur le bâtiment par tachéométrie, assurant géoréférencement et contrôle.

Les différents résultats produits pour cette mission furent les suivants :

- Modèle Numérique de Terrain, intégré au SIG pour la simulation de remplissage d'eau de la partie basse du site.
- Modèle 3D (diffusion \*.pdf) de :
  - Inscriptions et gravures
  - Bâtiment

#### **4. Discussion sur les résultats**

En premier lieu, nous nous sommes intéressés à la réponse de cette technique aux besoins des archéologues et épigraphistes. Trois catégories de critères ont été élaborées :

- sur la géométrie
  - niveau de détail
  - exactitude du modèle
- sur la lisibilité et le rendu
  - textures
  - format et forme de diffusion
- sur la réponse aux contraintes de missions (financières, temporelles et pratiques).

En second lieu, nous avons confronté la CED aux autres techniques actuellement utilisés pour de tels relevés. En confrontant avantages et inconvénients, nous avons déduit les objets relevables, les types de rendu et les analyses pour chacune d'entre elles.

Nous sommes enfin revenus sur une analyse rétrospective du matériel et de la méthode utilisés, et des propositions ont été faites sur certains points de la méthodologie. La mise en évidence des limites actuelles (matérielles et logicielles), ainsi que la veille tout au long du projet des solutions commerciales et universitaires en cours de développement ont montré très clairement la direction que prenaient les avancées dans le domaine.

#### **5. Conclusion**

La Corrélation Epipolaire Dense a connu un développement récent grâce à l'interaction des différents domaines qui s'en sont emparés (robotique, intelligence artificielle, biosciences). Cette technique anciennement utilisée en photogrammétrie aérienne pour la création de modèle numérique de terrain s'est avérée extrêmement performante pour les applications terrestres, grâce aux avancées des matériels photographiques et informatiques, et de l'algorithmique.

Pour les applications de conservation et la sauvegarde du patrimoine, cette technique souple, fiable, et bon marché permet d'offrir de nouvelles formes d'informations. Géométriquement très performante, indépendante de la taille de l'objet, elle permet d'offrir des modèles texturés de très bonne qualité visuelle.

Nous avons vu qu'à l'heure actuelle une très bonne maîtrise des aspects théoriques reste essentielle pour maîtriser les outils encore un peu obscur qui sont à la disposition du grand public. Mais il ne fait aucun doute, au regard de la vitesse avec cela évolue, que des solutions logicielles sauront reprendre ces outils, et les rendre à la fois plus stable, plus ergonomiques et plus automatisés.

Avec une phase de relevé ne nécessitant principalement que des recommandations mais pas forcément de connaissances photogrammétriques théoriques, elle ouvre encore un peu plus la porte de la troisième dimension si utile dans l'analyse des objets à un plus vaste public.

Mais au-delà de l'excellente qualité de texture qu'elle permet d'acquérir, la CED permet, par le type de données produites, de repenser certains aspects plus vastes comme par exemple la fusion des données.