

# Acquisition de nuages de points denses par photogrammétrie terrestre.

## Application à la mission d'archéologie de Kilwa, Arabie Saoudite

■ Jean-François HULLO

### ■ MOTS-CLÉS

Corrélation Épipoilaire Dense, Photogrammétrie, Archéologie, Epigraphie, Modèles 3D texturés, PhotoModeler® Scanner

*Bien que la théorie de corrélation épipoilaire dense (CED) d'images soit connue depuis plusieurs dizaines d'années, les capacités matérielles des stations de travail classiques ne permettaient pas de réaliser simplement cette opération. L'évolution conjointe des appareils photographiques et des ordinateurs a permis la création d'outils nouveaux, dont nous allons parler dans cet article. La vision par ordinateur et la photogrammétrie produisent des données, mais avec des objectifs différents. Pour la reconstruction 3D des images à faible résolution, la communauté de la vision par ordinateur utilise généralement des caméras non calibrées.*

*Dans beaucoup d'applications la contrainte de traitement en temps réel supplante celle de l'exactitude. Un grand nombre de configurations est maintenant géré par les algorithmes issus de la géométrie projective. L'approche photogrammétrique issue de l'analogique s'intéresse principalement à la précision, plus qu'à l'automatisation. Strecha et al., (2008), Furukawa et Ponce, (2007) ont montré l'utilisation de la CED avec une grande exactitude sur des images terrestres à haute résolution, intégrant la calibration dans leur processus. Mais très souvent, le photogrammètre peut calibrer sa caméra et est donc à même d'utiliser ces paramètres comme des constantes, réduisant ainsi les temps de calcul sans perte de précision. Différents algorithmes d'appariement sur base de géométrie épipoilaire sont comparés dans Seitz et al., (2006). Fassi, (2007) compare les techniques de CED et de scanner laser, et il est maintenant clair que la CED offre plus qu'une alternative.*

**D**ernièrement, plusieurs solutions commerciales ont été développées et de premières expériences ont été réalisées dans le domaine de la sauvegarde du patrimoine : Reznicek et Pavelka (2008), Remondino et Menna, (2008).

Dans cet article, nous discuterons d'une approche pour l'application de la CED sur des fouilles archéologiques et des prospections épigraphiques. Premièrement, nous rappellerons brièvement les principes et théories, avec un bref état de l'art des solutions académiques et commerciales. Nous nous intéresserons par la suite plus en détail aux paramètres qui influencent la qualité des résultats. Nous présenterons ensuite nos travaux, avec les résultats tant pour les cas de simple et de plusieurs couples d'images stéréo. Enfin, nous comparerons la CED à d'autres technologies actuelles afin de suggérer des champs d'applications à chacune d'entre elles. Pour les applications, nous utiliserons le logiciel PhotoModeler® Scanner de la société EOS Systems.

### Théorie et organigrammes

Pour les aspects théoriques de la CED, nous considérerons le cas d'une simple paire d'images. Lors de l'utilisation de

plus d'une stéréopaire, une compensation en bloc est calculée pour l'ensemble des photographies, mais chaque couple est appareillé indépendamment.

### ■ Idée et principes

Les équations de la stéréophotogrammétrie permettent d'acquérir la position 3D de points homologues situés sur les deux images d'un couple. L'idée générale est la suivante : "Pour chaque pixel dans une image de référence, trouver son homologue dans l'autre image." Un premier cas, le plus simple, serait de considérer la valeur d'intensité d'un pixel dans une image, et de localiser un pixel de même valeur d'intensité dans la seconde image. Premièrement, nous nous trouvons dans un cas typique de problème dit "mal posé" (Hadamard, 1902) ; la solution peut : 1. ne pas être unique (l'ambiguïté est causée par la présence de plusieurs pixels de même valeur d'intensité), 2. ne pas exister (en raison du bruit), et/ou 3. être instable (en raison de radiométries globalement changeante). Deuxièmement, avec des images à haute résolution, un appariement brut entraîne une explosion combinatoire. En conséquence, pour traiter ces deux problèmes, nous devons utiliser des contraintes (cf. Tikhonov, 1963), "Kasser et Egels (Digital Photogrammetry - 2001)" détaillant deux contraintes.

► Une première contrainte consiste à repenser l'outil d'appariement. Afin de réduire l'ambiguïté, nous considérons le voisinage du pixel. Ainsi, nous travaillons avec un vecteur incluant les valeurs des pixels situés dans la fenêtre de recherche. De plus, la non-existence de la solution en raison du bruit doit elle aussi être résolue. On utilise un score de corrélation pour décrire la similarité. Le score de corrélation est communément obtenu en calculant le produit scalaire des deux vecteurs. Enfin, pour traiter les cas de variation globale de radiométrie, nous normalisons l'indice en calculant la cross-corrélation des vecteurs. Le problème devient dès lors "bien posé" dans le sens où l'existence, unicité et stabilité ont été améliorées. On notera que cette corrélation peut être effectuée à un niveau subpixelaire, nous l'appliquons dans un exemple numérique ci-après :

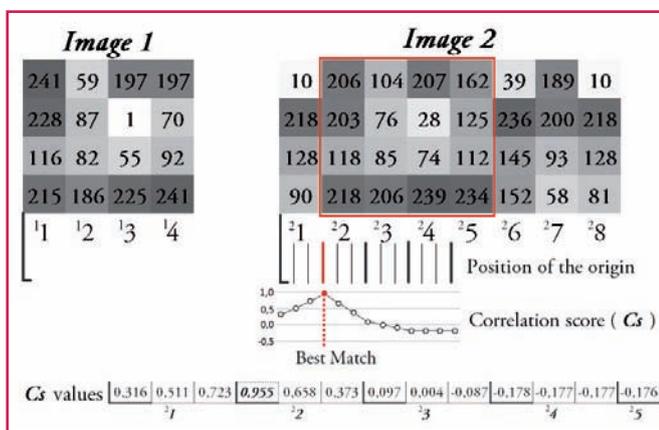


Figure 1. Calcul de l'appariement au niveau subpixelaire (ici 1/3 de pixel)

Afin de contrer l'explosion combinatoire, nous devons définir une contrainte qui réduise le nombre de tests d'appariements. La géométrie épipolaire en offre une. Pour chaque point observé dans une image, le même point sera situé dans l'autre image le long d'une ligne épipolaire connue. Par conséquent, l'intervalle de recherche se situe le long d'une ligne dans l'image et non plus dans l'image entière. Mais cet intervalle peut encore être réduit : si l'on dispose d'information sur la forme globale de l'objet, et que l'on peut définir les distances min/max à un plan moyen, ou

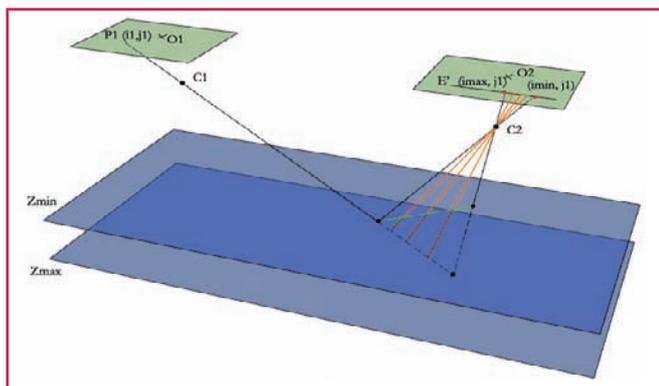


Figure 2. Géométrie épipolaire et contrainte géométrique.

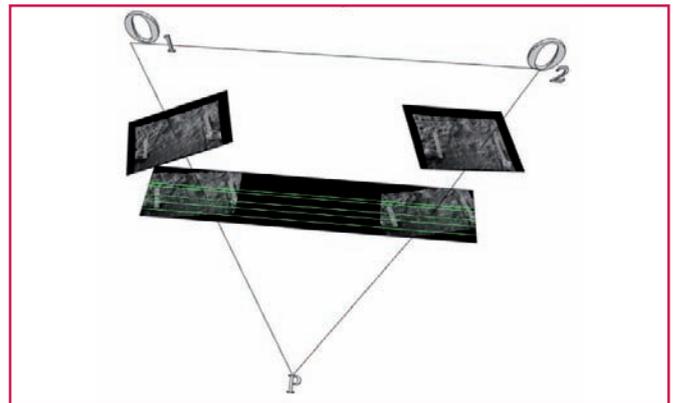


Figure 3. Rectification épipolaire.

à un modèle grossier de référence, alors l'intervalle de recherche dans l'image se situera entre deux bornes le long de la ligne épipolaire. Dès lors le problème se trouve dans une seule dimension.

La géométrie épipolaire peut être déterminée de manière différente en vision par ordinateur et en photogrammétrie.

### ■ Influence des paramètres

Etant donné que les appareils photographiques ne remplissent pas les conditions exactes d'un modèle de "pinhole camera"<sup>1</sup>, les sources d'erreurs doivent être déterminées et estimées. Plusieurs types de perturbation peuvent exister : le bruit, le manque d'exactitude de positionnement et de rendu visuel. Ces sources peuvent être qualifiées soit par le moment où elles sont créées, soit par le moment où elles sont insérées dans le traitement. Dans le but d'aider l'utilisateur à les prendre en compte, et donc à tenter de les minimiser, nous les listerons ci-après par leur origine.

Durant l'acquisition des images de l'objet, l'opérateur doit prendre en compte plusieurs paramètres.

En premier lieu, l'emplacement et l'orientation des images doivent respecter une contrainte géométrique. Le calcul de l'orientation relative requiert des intersections franches entre les rayons, le rapport  $R = \text{base} / \text{éloignement}$  doit donc être supérieur à 1/20. Un R plus faible entraînerait un cas défavorable avec de très fortes erreurs dans le calcul des profondeurs. Pour le cas de multiples stéréopaires, la géométrie nécessite des vues additionnelles obliques afin de consolider le bloc, conformément aux règles 3 x 3 du CIPA. Une comparaison des techniques d'orientation sont détaillées dans (Grussenmeyer et Al Khalil, 2002).

En second lieu, même si cela peut sembler évident dans le cas d'une simple paire, il est important d'assurer un recouvrement pour chaque zone qui doit être mesurée. Cela est également vrai pour les cibles et les points de contrôle.

Enfin, l'objet et son environnement doivent être pris en considération. Pour assurer un appariement exact, la texture doit être appropriée sur les images. En fonction du type de matériau de l'objet, la taille de projection du pixel doit être ajustée

(1) Pinhole Camera : Modèle idéal d'un appareil photo, constitué d'un trou de taille infime et qui projette l'image sur un plan perpendiculaire à l'axe optique.



Valeur de R (base/éloignement)	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Géométrie											
Recouvrement											
Corrélation											
R optimal											

**Tableau 1.** Détermination du rapport R (base/éloignement) optimal.

Les aires sombres représentent une valeur favorable du paramètre. Une valeur optimale de R nécessite la validation simultanée des 3 paramètres (Géométrie, recouvrement et corrélation).

en variant la distance à l'objet et/ou la distance focale de l'objectif. Si la texture n'offre pas assez de contraste, le score de corrélation n'aura pas de maximum distinct, et le choix de l'homologue ne serait sûrement pas exact. Le résultat serait un nuage de point très bruité. Les lumières peuvent également offrir de la texture sur l'objet par l'intermédiaire des ombres qu'elles génèrent. Cependant, le rapport R doit être correctement choisi afin de minimiser les différences de représentation d'un même objet dans les images, sans quoi l'appariement n'est pas possible. Généralement,  $R < 0.4$  est suffisant. Et enfin, la radiométrie ne doit pas varier localement sur les images, soit lors de l'acquisition soit lors d'un traitement d'images postérieur, faute de quoi l'appariement ne saurait être exact.

Durant l'orientation, la géométrie épipolaire est déterminée. On choisira par conséquent un nombre de points homologues utilisés supérieur aux cinq nécessaires, afin d'assurer une redondance suffisante. Un autre paramètre majeur est la calibration. Etant donné que les optiques ne sont pas parfaites, nous devons mesurer les distorsions pour chacune d'entre elles. La qualité de cette calibration est réellement importante, afin d'enlever les effets courbants des distorsions sur les lignes épipolaires (Zhang, 1996).

### ■ Organigramme détaillé

<b>Acquisition des données</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calibration</li> <li>2. Disposition des cibles</li> <li>3. Acquisition d'un couple</li> <li>4. Suppression des distorsions</li> </ol>
<b>Orientation des images</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Détermination de points homologues</li> <li>2. Calcul d'orientation</li> <li>3. Détermination de la géométrie épipolaire</li> <li>4. Mise à l'échelle</li> </ol>
<b>Corrélation Epipolaire Dense</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rectification épipolaire</li> <li>2. Ajustement des paramètres</li> <li>3. Appariement des homologues</li> <li>4. Calcul des coordonnées 3D</li> </ol>
<b>Traitement</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nettoyage du nuage</li> <li>2. Maillage</li> <li>3. Nettoyage du modèle maillé</li> <li>4. Texturage</li> </ol>

Nous remarquerons que tous les paramètres cités ont une influence finale dans l'espace image [pixels], étant donné que la CED génère un modèle au facteur d'échelle près. Ainsi, la taille réelle de l'objet n'entre pas en compte dans le processus de traitement de la CED ; c'est un point important.

## Expérimentations

### ■ Présentation du site et des problématiques.

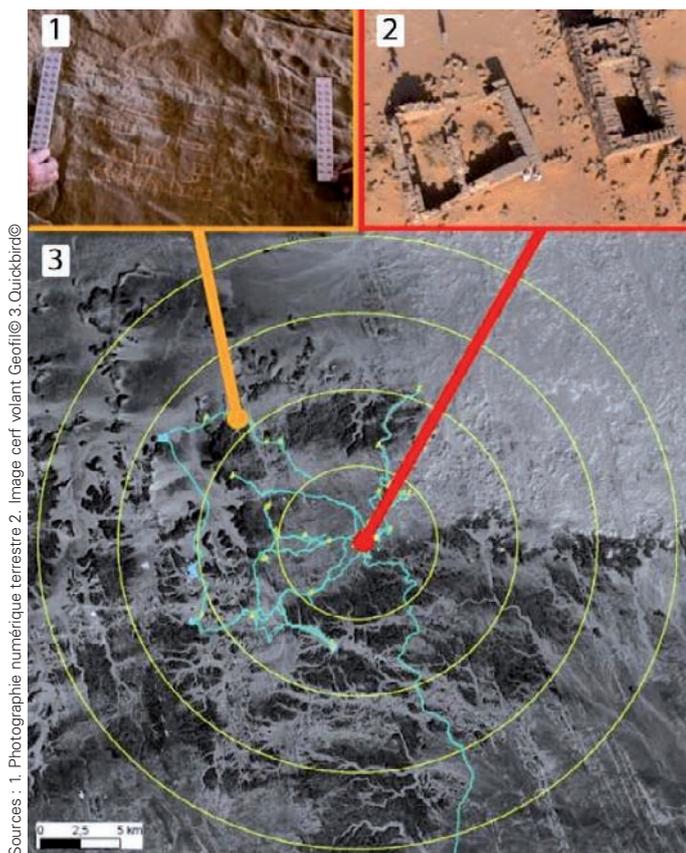


**Figure 4.** Localisation du site de Kilwa, Arabie Saoudite (A).

La mission de Kilwa<sup>2</sup> rassemble des spécialistes autour de deux grandes problématiques : l'épigraphie et l'archéologie. Les recherches s'effectuent dans une zone de 25 km de rayon autour du site central.

Dans cette aire centrale, architectes, dessinateurs et archéologues travaillent ensemble. Deux bâtiments (bassins de décantation) partiellement ruinés sont à l'étude. De nombreuses autres cellules sont plus endommagées. Traditionnellement, le relevé des bâtiments combine des mesures topographiques et des dessins architecturaux. Mais les techniques requièrent plusieurs jours ou semaines de travail, pour des informations ciblées et partielles.

(2) Mission française d'archéologie de Kilwa (Arabie Saoudite), dirigée par Saba Fares, cofinancée par la sous-direction des sciences humaines et de l'archéologie, le ministère français des affaires étrangères, la commission saoudienne pour le tourisme et les antiquités, et l'université Nancy 2 (France).



Sources : 1. Photographie numérique terrestre 2. Image cerf volant Geofili© 3. Quickbird©

Figure 5. Zone de prospection et zone de fouille.

► Un projet à plusieurs stéréopaires a été réalisé sur l'un des deux bassins. Le but était d'obtenir un modèle 3D texturé, avec les détails suffisants pour permettre l'interprétation architecturale. Les difficultés de transport, le prix important de location et le besoin de textures de haute qualité n'ont pas permis l'utilisation d'un scanner laser terrestre.

A côté de cela, les épigraphistes prospectent une large zone, dans le but de découvrir, enregistrer et analyser des gravures de différentes périodes. Un SIG collecte les informations (période, type, localisation GPS...) en lien avec une base de données photo. Beaucoup de ces gravures et inscriptions ne peuvent être comprises et analysées qu'en les joignant à d'autres.

Ce travail d'analyse est principalement fait au bureau, de retour de mission, le mois de terrain n'étant destiné qu'à la collecte des données. Généralement, les inscriptions sont réalisées sur des roches quasi planes, et un simple couple de photographies permet en un point de vue de restituer l'objet. L'avantage majeur est que deux images seulement sont nécessaires ; le temps d'acquisition est donc minimal, et la création d'un modèle 3D n'excède pas 15 minutes pour la génération. La CED a été testée sur une dizaine de gravures, avec une simple stéréopaire pour chacune d'entre elles. Pour l'acquisition, nous avons utilisé un Canon EOS 5D Mark I, avec un jeu de focales de 28, 50 et 85 mm. Pour le traitement et la génération des nuages de points, nous avons utilisé PhotoModeler® Scanner.

## ■ Application à une stéréopaire unique

Avant tout, avant même l'acquisition des images sur le site, nous avons besoin de calibrer la caméra (boîtier et optiques). La connaissance des paramètres intrinsèques de l'appareil (taille de capteur et résolution, coordonnées du point principal, longueur focale, distorsions optiques) est directement liée à l'exactitude finale des résultats. Dans PhotoModeler® Scanner, le modèle de distorsion est basé sur un modèle polynomiale des distorsions radiales, et tangentielles.



Figure 6. Deux exemples de stéréopaires acquises. En haut, un mur ; en bas une inscription.

Comme le montre la partie théorique du début de cet article, il est important d'assurer des valeurs correctes des paramètres pendant l'acquisition des photographies : le ratio R, le recouvrement des cibles sur les deux images, et l'éclairage. Il est également recommandé de prendre un triplet d'images, afin de se prémunir des erreurs lors de l'orientation.

Ensuite, le premier pas du calcul est l'orientation du couple. Le meilleur couple pour la CED est choisi grâce aux paramètres de position et d'orientation des caméras (rapport R, angles entre les visées). Durant cette étape, la géométrie épipolaire est (implicitement) calculée. Par la suite, nous préparons les images pour l'appariement par CED. D'abord, nous créons deux nouvelles images, exemptes de distorsions, en appliquant aux images d'origine les équations inverses de distorsion.

Une fois que ces images "idéalisées" sont créées, ainsi que leur caméras respectives, les lignes épipolaires sont droites, mais pas encore parallèles, car convergentes vers les épipoles. L'opération suivante, dite "rectification épipolaire", qui permet de placer les épipoles aux infinis et donc de redresser et paralléliser les lignes épipolaires, se déroule dans PhotoModeler® Scanner après avoir défini le pas d'échantillonnage : c'est la première étape du calcul. Deux images bitmap sont créées dans le répertoire du projet. D'autres paramètres doivent être réglés (distance min/max du modèle, niveau de pointé subpixelaire, taille de la fenêtre de recherche, type de texture), puis le calcul est

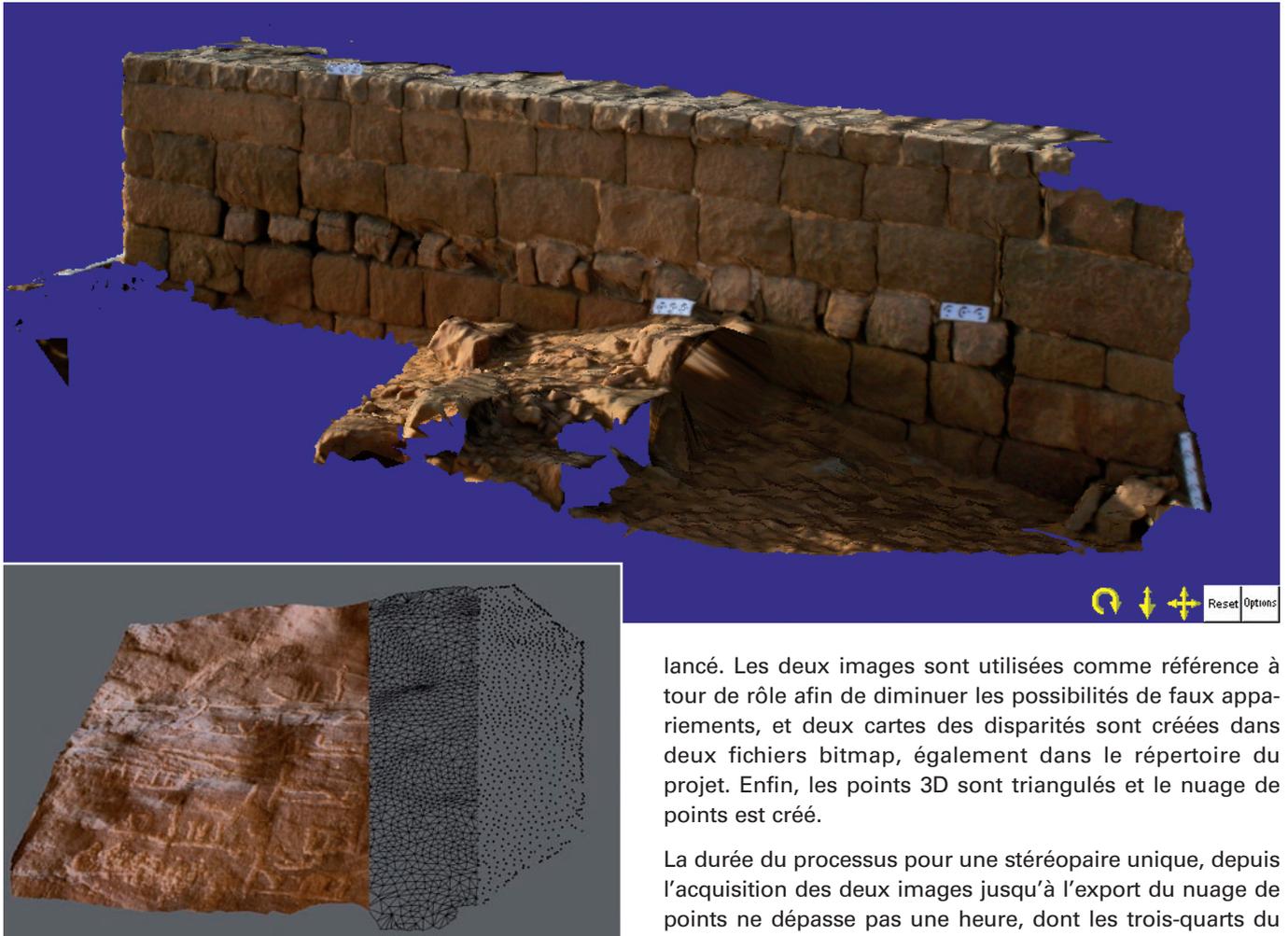


Figure 7. Modèles 3D résultants de l'application de la CED.

lancé. Les deux images sont utilisées comme référence à tour de rôle afin de diminuer les possibilités de faux appariements, et deux cartes des disparités sont créées dans deux fichiers bitmap, également dans le répertoire du projet. Enfin, les points 3D sont triangulés et le nuage de points est créé.

La durée du processus pour une stéréopaire unique, depuis l'acquisition des deux images jusqu'à l'export du nuage de points ne dépasse pas une heure, dont les trois-quarts du temps ne requièrent pas d'intervention de l'opérateur.

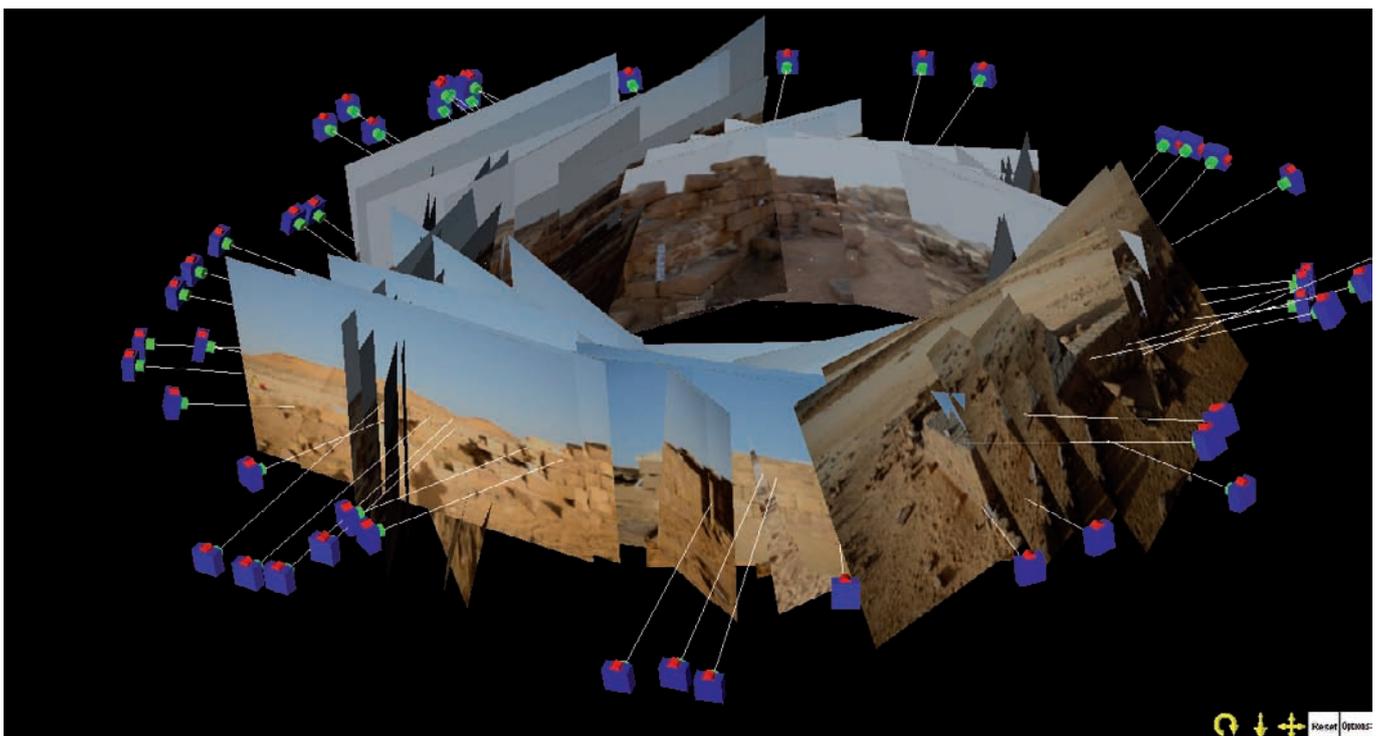


Figure 8. Modèle d'orientation des photographies utilisées pour la modélisation du bassin de décantation.



**Figure 9.** Vue du nuage de point du bâtiment (1 200 000 points), et détail.

▶ Par la suite, le nuage de points peut être débruité, segmenté, maillé et texturé dans PhotoModeler®. Les données 3D peuvent être ensuite exportées dans un grand nombre de formats courants. Durant ce projet nous avons utilisé l'\*.obj et le \*.wrl. Pour la diffusion, nous avons intégré le modèle \*.obj dans un \*.pdf 3D. Cette extension intégrée à tous les Adobe Reader depuis la version 8 s'avère bien plus souple, légère et paramétrable que les lecteurs de \*.wrl (tels que Cortona par exemple).

### ■ Application à plus d'une stéréopaire

Pour les bâtiments, un point de vue unique ne permet pas de couvrir l'ensemble de l'objet. De fait, nous avons multiplié les stéréopaires afin de restituer un modèle complet du bâtiment, au pas voulu (1point/5mm). Nous avons également ajouté des vues obliques en suivant les 3x3 règles du CIPA (<http://cipa.icomos.org>). De nombreuses cibles ont été placées tout autour du bâtiment, et finalement, 50 images ont été utilisées. Pour la mise à l'échelle, et le rattachement des différentes parties du bâtiment, nous avons utilisé 20 points de contrôle par tachéométrie.

Après l'orientation du bloc, les meilleures stéréopaires ont été appareillées par CED. Les paramètres ont été réglés séparément pour chacun des couples, afin d'adapter ceux-ci aux conditions d'éclairage, de géométrie et d'acquisition. Suite au débruitage du modèle, nous avons assemblé les nuages de points via l'outil intégré à PhotoModeler® Scanner.

Enfin, nous avons traité ce nuage de point assemblé de façon classique : maillage, bouchage des trous, unification des normales et lissage dans PhotoModeler® Scanner.

La richesse des fonctions qu'offre ce logiciel est un avantage très net. Couramment les travaux 3D requièrent l'utilisation de logiciels différents pour chaque étape du traitement, augmentant d'autant les coûts et la complexité de l'organigramme.

Le modèle a également été converti au format \*.pdf 3D, et également inséré dans le modèle numérique de terrain du site.

Pour certains projets plus restreints, mais nécessitant tout de même plusieurs points de vue, nous avons réalisé des modèles à partir de trois ou six stéréopaires.



### Intérêts et limitations

Afin d'aborder la réflexion de manière objective, nous devons considérer deux aspects. En premier lieu, la réponse aux besoins initiaux (géométrie, rendu) doit être étudiée. Ensuite, la CED doit être comparée aux autres techniques telles que le scanner laser terrestre ou le relevé traditionnel, afin de peser les tenants et les aboutissants de chacune. Il est enfin possible de définir certains cas d'utilisation pour chacune d'entre elles.

### ■ Critères de validation des besoins initiaux

La première obligation pour valider la CED est l'exactitude du modèle géométrique. Nous devons distinguer les étapes successives du processus afin de comprendre les combinaisons d'erreurs. En outre, il convient de distinguer les erreurs en positionnement et le bruit. Premièrement, durant l'orientation, les écarts-types doivent être subpixelaires. Afin d'atteindre ces résultats, l'utilisation de cibles (codées) est fortement recommandée. Pour la mise à l'échelle, nous avons utilisé des points de contrôle (cas à plusieurs stéréopaires, besoin de géolocalisation), ou une simple distance (pour les stéréopaires uniques, pas de géolocalisation). Finalement, le bruit est un problème complexe à résoudre sans une bonne connaissance du processus. De nombreuses sources d'erreurs peuvent générer un nuage bruité (cf. Théorie et principes). Durant ce projet, les déviations standard se réduisaient dans le sens de la diminution de la zone d'intérêt :



GPS Non différentiel : 10 m	zone de prospection : 25km de rayon
GPS différentiel : 0,2m	zone du site large: 1km de rayon
Levé topo, MNT : 7cm	zone du site: 500m de rayon
Modèle photo global : 5 pix. # 3cm	bâtiment: 10m de rayon
Séréopaire : 1pixel # 2-3mm	mur: 3m de rayon

Figure 10. Erreurs maximales attendues et étendue approximative pour chaque type de données.

Pour l'analyse des inscriptions, une texture de bonne qualité est nécessaire, mais de simples images n'offrent qu'une information partielle. L'apport de la troisième dimension est un atout considérable pour la visualisation et la compréhension. Avec des bandes de cibles disposées autour des gravures, le calcul d'orientation est quasi instantané. Sur des objets d'une envergure ne dépassant pas le mètre, il est possible d'obtenir une résolution du millimètre avec une stéréopaire d'images obtenues par un reflex numérique de bonne qualité.

### ■ Comparaison aux autres techniques

Les dessins manuels sont encore un moyen très utilisé en archéologie et en architecture. De fait, avec un investissement matériel quasi nul, cette technique permet d'extraire un certain nombre d'informations précises. En revanche, l'utilisation a posteriori de tels dessins reste focalisée pour des travaux d'architecture. Les modèles 3D réalistes offrent quant à eux d'autres perspectives de travail : simulation, rendu historique, diffusion... Grâce à la CED, nous ne perdons que peu d'informations sur les matériaux, la profondeur et le relief.

Mais les modèles 3D ne sont jamais une fin en eux-mêmes, ils ne sont que la base pour des travaux et études dans bien des domaines.

Les scanners laser ont l'énorme avantage d'offrir un modèle 3D exact et très dense. Les informations de texture fournies par les scanners actuels n'atteignent pas le rendu des images obtenues par reflex numérique, en obtenant tout de même des informations de couleur. Il est certes possible de plaquer sur un modèle des photos de haute résolution, mais une telle opération requiert les paramètres d'orientation des caméras, i.e. un projet photogrammétrique complet en sus.

Les inconvénients sont avant tout le coût, la complexité de transport, d'utilisation et de traitement, et la fragilité. Pour ces raisons, bien des missions archéologiques n'ont pas besoin et/ou ne peuvent s'offrir une campagne de scan. Seuls de larges et complexes objets ou édifices se prêtent à de tels travaux, mais les résultats restent bien souvent sous-exploités en raison de l'importance et de la complexité des données.

### ■ Types de travaux

Nous l'avons vu, bien que dans certains cas complexes, l'application de la CED reste délicate, la solution d'acquisition proposée dans cet article offre plus qu'une alternative aux scanners laser pour bien des cas.

Nous avons montré que la stéréopaire est très simple à réaliser et concluante pour bien des objets sur un site archéologique. Eboulis, murs, zones de fouilles, inscriptions et gravures peuvent être modélisés en moins d'une heure, avec un matériel d'acquisition photographique souvent disponible sur le site.

L'un des autres avantages majeurs de cette technique est sa flexibilité : la taille des objets n'influence que le rapport base/éloignement, si bien que de très nombreux objets peuvent être modélisés exactement de la même manière. Pour les épigraphistes du site de Kilwa, ce type de résultats fut réellement apprécié pour les avantages que nous lui avons cités dans cet article. Il ne fait aucun doute que le format de diffusion (\*.pdf avec contenu 3D) les a aidés à se familiariser avec ce nouveau type de données.

### Conclusion

Bien que les solutions commerciales de CED terrestre ne soient apparues qu'au cours de ces deux dernières années, elles ont offert d'excellents résultats, de beaucoup de points de vue. Premièrement, il est possible d'atteindre une très bonne précision, tant pour la géométrie que pour le rendu visuel. De plus, la photogrammétrie conserve à travers la CED toute sa flexibilité et ses avantages de coût, tout en permettant la restitution de nuages de points denses. Enfin, la phase d'acquisition des données ne requiert pas un niveau de connaissance particulier, si bien qu'avec quelques recom-

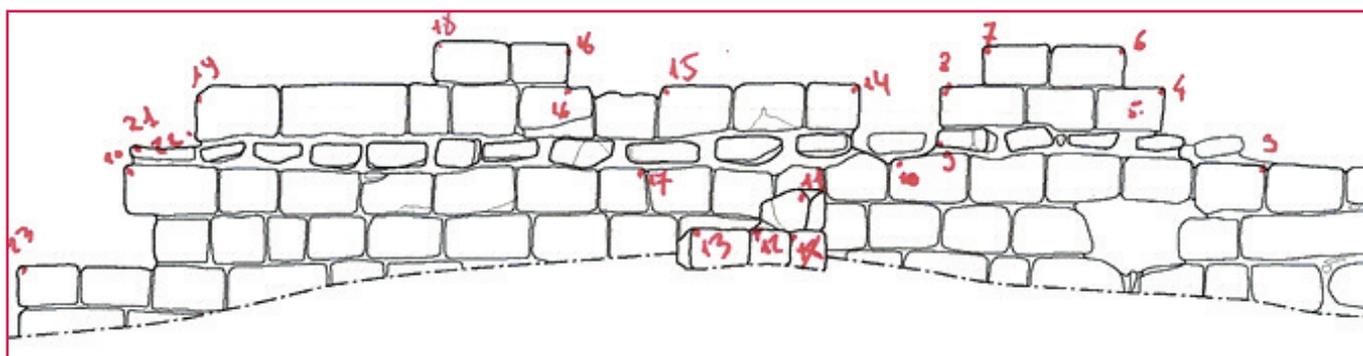


Figure 11. Levé architectural manuel d'un mur du bassin de décantation.

mandations, de nombreuses personnes seront à même de prendre les photographies de la bonne manière. Cependant, suivant les propriétés de texture de l'objet, cette solution de stéréo passive ne peut encore être appliquée sur des matériaux particulièrement uniformes ou réfléchissants.

En comparaison avec les autres techniques, il n'est pas possible de dire que la CED remplace aujourd'hui les scanners lasers ou d'autres techniques de relevé. Mais toutes les personnes intéressées dans le même temps par les caractéristiques géométriques et visuelles d'un objet trouveront dans la CED un moyen économique, facile, rapide et précis de les documenter.

Tous ses avantages et évolutions futures aideront à n'en pas douter la communauté de conservation et sauvegarde du patrimoine à s'approprier cet outil, et à simplement prendre deux photographies au lieu d'une pour disposer de la troisième dimension. ●

## Bibliographie

### Ouvrages :

Hartley, R. - Zisserman, A. - 2004, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, - 2nd edition: pp. 237-360.

Kasser, M. - Egels, Y. - 2001, *Digital Photogrammetry*, Taylor & Francis, - pp. 168-221.

### Journaux :

Grussenmeyer, P. - Al Khalil, O. - 2002, *Solutions for exterior orientation in photogrammetry, a review, The photogrammetric record*, an international journal of photogrammetry, Vol. 17, N°100, October 2002, p. 615-634.

Meyer, E. - Parisel, C. - Grussenmeyer, P. - Revez, J. - Tidafi, T. - 2006, A computerized solution for the epigraphic survey in Egyptian Temples, In, *Journal of Archaeological Science*, Volume 33, Issue 11, November 2006, Pages 1605-1616.

### Autres documentations :

Kalantari M.- Kasser M. - 2008, *Photogrammétrie et vision par ordinateur*. In XYZ n° 117

Fassi, F. - 2007, *3D modeling of complex architecture integrating different techniques - a critical overview*, ISPRS Commission V WG VI/4 Furukawa, Y., Ponce, J., 2007, *Accurate, dense, and robust multi view stereopsis*. In Proc. Int'l Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1-8.

Kauhanen H. - Heiska N. et Kurkela M. *Long focal length imaging for photogrammetric reconstruction, 3DArch09*. Commission 5 ISPRS, 09.

Remondino, F. - Fabio Menna, F. - 2008, *Image-based surface measurement for close-range heritage documentation*, ISPRS08 Commission V

Reznicek J. et Pavelka K. - 2008, *New low-cost 3D scanning techniques for cultural heritage documentation* ISPRS Commission VI, WG V/2. - pp. 237-240.

Seitz S. et al. - 2006, *A comparison and evaluation of multiview stereo reconstruction algorithms*, In Proc. Int'l Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. - IEEE, 2006. Volume 1,- pp. 519-528.

Strecha, C. - Von Hausen, W. - Van Gool, J. L. - Fua, P. - Thoennessen, U. - 2008, *On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery*. CVPR 2008.

Tebourbi R. et Belhadj Z. *Rectification épipolaire d'images stéréoscopiques*, International Symposium on Image/Video Communications over Fixed and Mobile Networks. - 2004.

Tikhonov A.N. - 1963, *Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method*, Soviet Math Dokl 4, pp. 1035-1038.

Zhang Z. - 1996, *On the epipolar geometry between two images with lens distortion*, Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition, Vol. I. - pp. 407-411.

## Contact

Jean-François HULLO

jf.hullo@gmail.com

## ABSTRACT

**Keywords:** Dense Stereo Matching, Photogrammetry, Archaeology, Epigraphy, 3D textured models, PhotoModeler® Scanner

Since a couple of years, several commercial solutions of dense stereo matching have been developed. This process offers a really cheap, flexible and accurate solution to get 3D point clouds and textured models. The calibration of the camera allows a subpixel correlation for correctly textured objects. In order to define the limits of such a process for cultural heritage applications, the Photomodeler Scanner® software has been tested on an archaeological site. The French project of archaeology and epigraphy in the region of Kilwa (Saudi Arabia) is aimed on two main works: prospecting and excavating. During the annual mission of one month a lot of information is collected, but the analysis of this data cannot be done on the go. During prospecting in the area of 25km radius, epigraphs and carvings are registered in a GIS with links to simple pictures in the database. But to describe, analyze and interpret those epigraphs, simple pictures are often not sufficient. Laser scanning cannot be used in this case for several reasons: difficulty of access and conditions (desert wind, heat), location of epigraphs, cost. Therefore, solutions based on Dense Stereo Matching have been investigated. Two kinds of models are presented in the paper. The first application is the modeling of epigraphs from a single stereopair during prospecting. Another application has been established on the site of Kilwa, where a building has been photographed and modelled. For this model, we get about 50 pictures. We inserted it on a Digital Elevation Model of the site obtained by tacheometry in order to meet the needs of the architects and archaeologists and to make assumptions on the original condition of the site. The main advantage of this photogrammetric methodology is to get in the same time a point cloud (resolution depends on the size of the pixel on the object), and therefore a mesh, and oriented high resolution images. After processing, we can use the data exactly as a laser scanning point cloud, with really better raster information for textures.