

EVOLUTIONS RECENTES EN PHOTOGRAFOMETRIE ET MODELISATION 3D PAR PHOTO DES MILIEUX NATURELS

RECENT EVOLUTION IN PHOTOGRAFOMETRY AND 3D MODELISATION OF NATURAL SPACES.

MARC PIERROT DESEILLIGNY, ISABELLE CLERY

IGN/MATIS 2 Avenue Pasteur, 94160 Saint Mandé Cedex .

Contact : marc.pierrot-deseilligny@ign.fr

RESUME

En quelques années, on est passé d'une photogrammétrie à but métrologique avec des techniques de modélisation basées sur l'intelligence du restituteur à des techniques capables de calculer un modèle 3D de manière 100% automatique à partir de « masses » d'images. Les raisons de ces progrès spectaculaires sont le passage à la photo numérique, la fusion des approches de photogrammétrie et vision par ordinateur et l'augmentation continue de la puissance de calcul des ordinateurs ; grâce à ces évolutions dans beaucoup d'applications, la photogrammétrie est (re)devenue une alternative au scanner laser. Parmi les solutions logicielles, libres et gratuites, proposées aujourd'hui, celle de l'Institut Géographique National se distingue en étant plus spécifiquement destinée aux scientifiques ; moyennant l'apprentissage de protocoles simples pour la prise de vues, ces outils permettent de réaliser automatiquement des modélisations 3D denses sur une gamme de scènes très variées. Des résultats de modélisation des milieux naturels sont présentés sur différents types d'acquisition : aérienne, terrestre extérieur, terrestre intérieur, aquatique.

MOTS CLE : *PHOTOGRAFOMETRIE, VISION PAR ORDINATEUR, AUTOMATISATION, LOGICIELS LIBRES, MODELISATION 3D DES MILIEUX NATURELS.*

ABSTRACT

In few years, 3D photo modelisation has evolved from manual photogrammetry for metrological purpose to techniques allowing fully automatic 3D modelization out of masses of images. Reasons of this tremendous progress includes : transformation from analogical to numerical photography, fusion of photogrammetry and computer vision approaches, and continuous growing of computation power; due to these evolutions, in many domains, photogrammetry is back again an alternative to laser scanning. Among free open source solution proposed today, IGN's solution is more specifically dedicated to scientist; when used with the right protocols, it can produce dense 3D models on a large type of scenes. Results on 3D modelisation of natural spaces are shown with different way of acquisition: aerial acquisition, indoor and outdoor terrestrial acquisition, acquisitions in aquatic environment.

KEYWORDS: *PHOTOGRAFOMETRY, COMPUTER VISION, AUTOMATISATION, OPEN SOURCE, 3D SURVEYING OF NATURAL SPACES.*

INTRODUCTION

Il est devenu courant, et presque banal, pour beaucoup de disciplines techniques, d'entendre dire qu'elles ont connu une révolution avec le passage à l'ère numérique et le développement d'internet. Pourtant, concernant l'évolution récente de la modélisation 3D à partir de photos, le qualificatif de rupture significative, nous semble loin d'être complètement galvaudé si l'on regarde dix ans en arrière et que l'on compare les usages de la photogrammétrie par les quelques professionnels qui connaissaient cette technique en l'an 2000 avec les services de modélisation 3D offerts au grand public en 2011.

En photogrammétrie « classique » l'exploitation des images requiert qu'elles aient été acquises selon un protocole rigide : image acquise de manière sub-verticale avec une structure de bandes pour la photogrammétrie aériennes, existence de nombreuses cibles relevées par des méthodes topométriques pour la photogrammétrie terrestre. Y-a-t-il alors encore quelque chose de commun entre, d'une part, les suites logicielles proposées par les éditeurs « classiques » de photogrammétrie, telles qu'elles existaient déjà à la fin du millénaire, coûtant parfois plusieurs dizaines de milliers d'euros, nécessitant un apprentissage long et ne permettant d'exploiter que des photos acquises par des caméras métriques selon ces protocoles très contraignants et, d'autre part, des services gratuits (photofly, photosynth, arc3D, ...) permettant à n'importe quel internaute, après avoir visionné une vidéo d'apprentissage de quelques minutes, de réaliser un nuage de point 3D de sa maison à partir de quelques dizaines de photos acquises par un appareil compact, ou encore avec un service tel que google sketch up permettant de saisir un modèle structuré et sémantisé.

L'apparition de ces nouveaux services posent plusieurs questions : Est-ce les mêmes techniques fondamentales qui sont derrières les chaînes traditionnelles et les produits récents que nous avons mentionnés ? Ou au contraire, y-a-t-il eu une vraie révolution technique ? Ces produits tout automatiques offrent-ils les mêmes services en termes de précision que les logiciels classiques de photogrammétrie ? S'ils n'offrent pas ces précisions, est-ce dû à une lacune technique intrinsèque à leur conception ou est-ce essentiellement la conséquence d'une absence de demande identifiée ; dans ce cas cette faiblesse pourrait-elle être facilement comblée si cette demande se structure ?

I – LES EVOLUTIONS RECENTES DE LA PHOTOGRAMMETRIE

1 – La dernière « décennie photogrammétrique » : évolution ou révolution ?

Fondamentalement et mathématiquement, il n'y a pas eu de rupture en « photogrammétrie et vision par ordinateur » depuis une dizaine d'année ; pour une caméra matricielle, la formule d'image reliant un point terrain à ses coordonnées dans la photographie est connue et utilisée depuis plusieurs siècles : cette formule est applicable tant pour les tout derniers appareils numériques que pour les premières chambres noires. L'inversion de cette formule constitue le cœur de la photogrammétrie inventée par Aymé Laussedat il y a 150 ans ; les outils mathématiques nécessaires à l'orientation des images, qu'ils s'appellent matrice essentielle, relèvement dans l'espace, compensation de faisceau ... sont connus et répandus depuis de nombreuses décennies.

Cependant l'assemblage de ces briques algorithmiques anciennes dans des « pipelines logiciels » cohérents capables de générer de manière totalement automatique des modèles 3D à partir d'un simple ensemble d'images (voir figure 1) est un phénomène récent, les premiers démonstrateurs cohérents ne remontent pas tellement avant 2005. Dans la suite de cette partie, nous allons décrire les principaux éléments contextuels et avancées théoriques qui ont permis cette évolution significative.

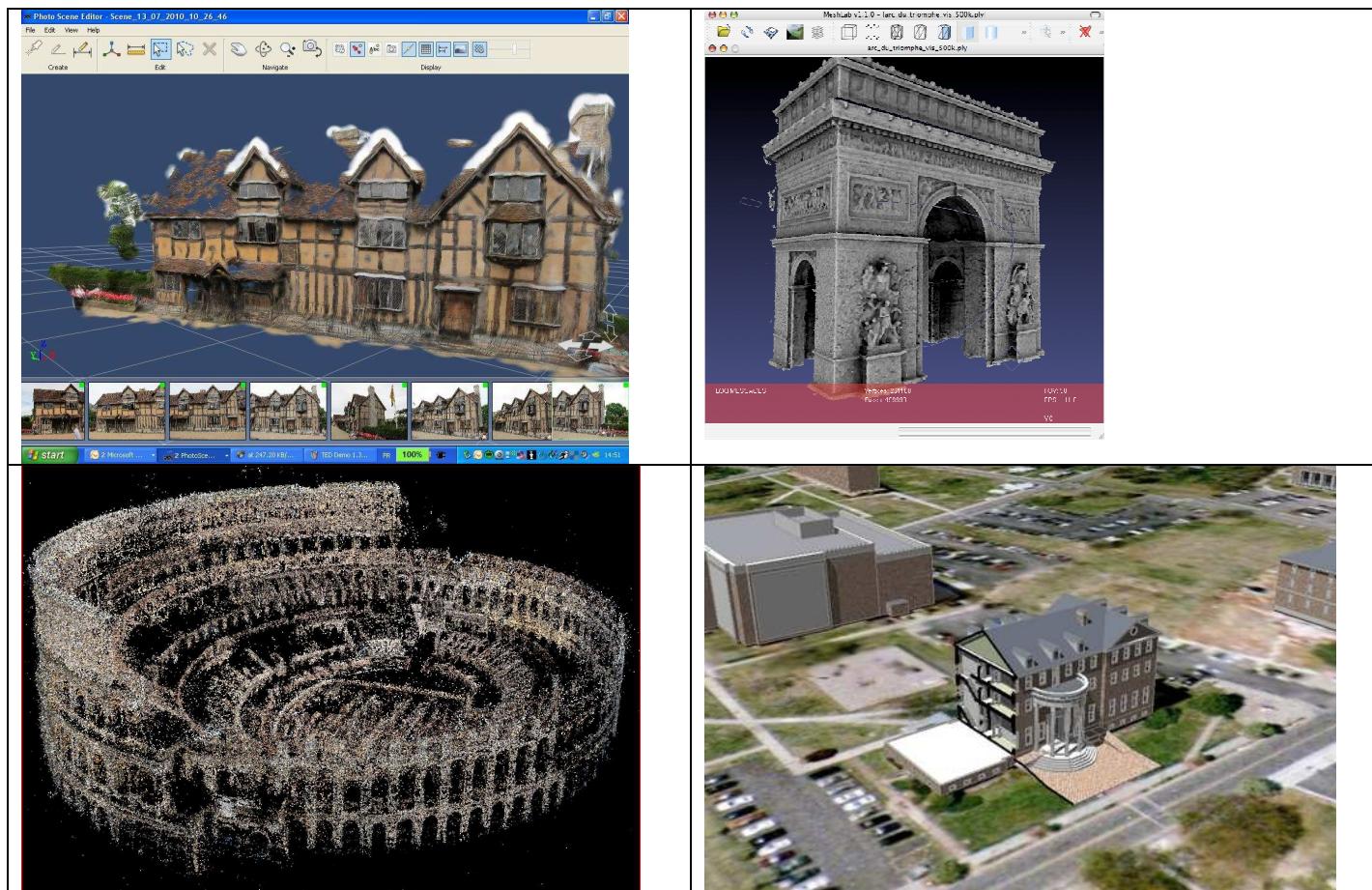


Figure 1 : Quelques exemples de modélisation 3D réalisées à partir de photos en utilisant des services ou logiciels gratuits : service Photofly (autodesk), service Arc3D et logiciels Bundler-PMVS. En bas à droite : modélisation avec google sketch-up.

2 – La photo numérique

Le remplacement de la photo analogique par la photo numérique est incontestablement un des éléments majeurs qui a permis l'apparition de solutions de modélisation 3D totalement automatisées à partir de photo. En effet, si en matière de photographie artistique ou familiale, on peut concevoir une certaine nostalgie de l'ère analogique, en revanche, dans un domaine technique comme la photogrammétrie, la photographie numérique arrivée à son stade de développement actuel ne présente que des avantages et ceux-ci sont tout à fait conséquents. De manière un peu crue, on pourrait dire, en terme économique, qu'on a gagné à la fois sur la qualité et sur le prix : on obtient plus d'information et moins de bruit pour beaucoup moins d'efforts. Mais, si la photo numérique a induit un changement fondamental c'est d'abord parce que, l'acquisition d'une photo supplémentaire devenant quasiment gratuit (en tous cas complètement marginal dans la chaîne de valeur), elle permet l'émergence de nouveaux protocoles d'acquisition où c'est la masse des photos qui apporte la redondance d'information permettant des traitements fiables, précis et automatisés (voir figure 3). Evidemment, le traitement des volumes d'information résultants n'aurait pas été possible, du moins pas à ce rythme, si, parallèlement à l'émergence de la photo numérique, la puissance de calcul et stockage des ordinateur n'avait pas continué de croître selon la loi de Moore.

Du point de vue de la qualité des informations récoltées, un apport assez évident de la photo numérique (Kasser 2001) est l'amélioration du rapport signal à bruit dans le produit obtenu ; pour des caméras aériennes pour lesquelles il existe de nombreuses études, le gain en SNR entre les caméras numériques et les photos argentiques numérisées est estimé à un facteur 10 ; nous

estimons que le gain est du même ordre entre des photos en format brut (i.e. non altérées par une compression dégradante telle que jpeg) prises par appareils reflex et des photos argentique numérisée sur des scanner de moyenne gamme. En appariement d'images (corrélation automatique) cette amélioration de la qualité du signal se traduit directement en termes de fiabilité des appariements, notamment sur les zones à faible contraste ; elle a permis aussi de mesurer les parallaxes (ou leur équivalent en multi-corrélation) avec une précision sub-pixellaire, typiquement de un demi à un dixième de pixels suivant les contextes. Une potentialité, peu développée, serait d'ailleurs d'utiliser les photos prises par des appareils, de moyennes à hautes gammes, pour faire des comparaisons directes de radiométrie dans des applications de type télédétection.

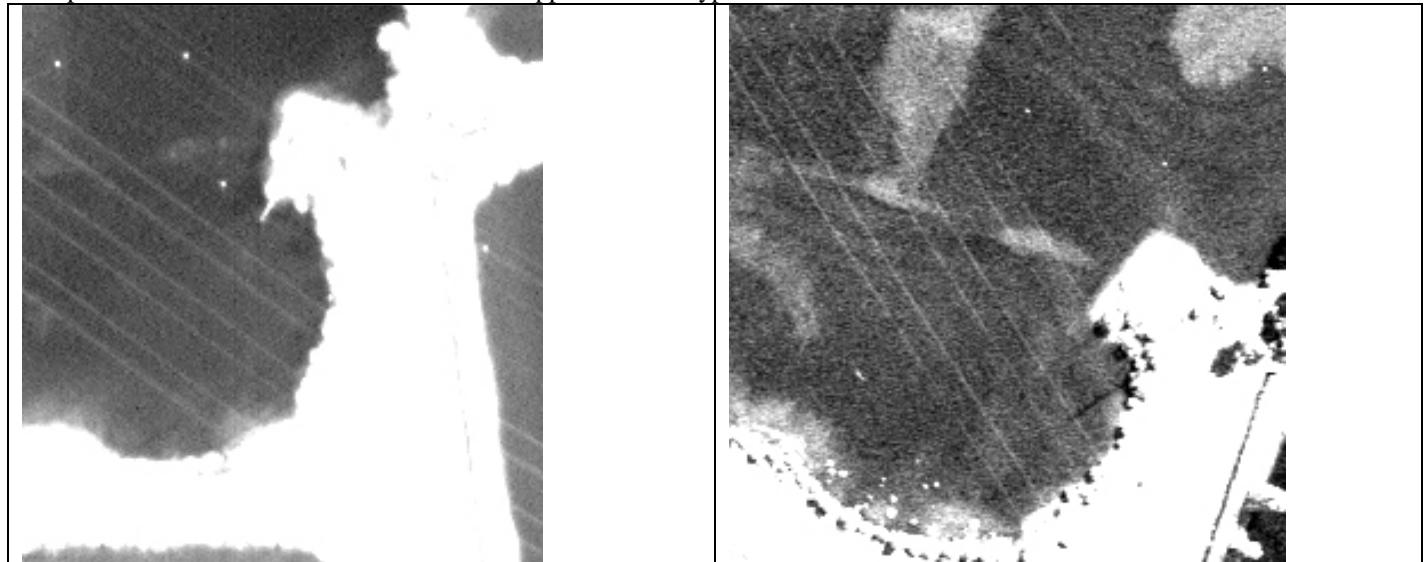


Figure 2 : Comparaison, sur une même zone, entre les premières images numériques aériennes et les images argentiques numérisées. Dans les deux images, on rehaussé le contraste pour faire apparaître les lignes électriques passant sur une surface d'eau.

Dans la chaîne de traitement photogrammétrique classique, un autre apport essentiel du numérique, surtout pour les applications légères, est de supprimer l'étape de calcul de l'orientation du film par rapport au scanner. Evidemment, si l'on veut conserver la précision nécessaire aux applications métrologiques, cela nécessite de garantir la parfaite stabilité du capteur par rapport à l'optique (ainsi que celle de l'optique elle-même ...). Cela est rarement le cas avec les appareils grand public et, en photogrammétrie terrestre, l'offre d'appareil photos dédiés aux applications métrologiques de la photogrammétrie est extrêmement limitée ; on peut y voir une des faiblesses techniques de la photogrammétrie numérique terrestre actuelle ; nous pensons plutôt que cette absence d'offre reflète une absence de demande parce que le marché de la métrologie a été essentiellement capté par les scanners lasers. On ne peut qu'espérer, avec ce que certains auteurs appellent le retour de l'appariement d'image (par exemple Haala, 2009) que, pour les domaines scientifiques, on va voir émerger une offre de caméras numériques métrologiques de prix raisonnable.

Enfin, concernant les changements, les plus fondamentaux, apportés par des protocoles d'acquisitions « massives » (voir figure 3) rendant possibles de nouveaux de traitement plus automatiques et plus fiables on peut citer deux directions principales :

- Premièrement, la possibilité d'acquérir autant de photos que nécessaires pour que tous les points de vue soient reliés entre eux par des images intermédiaires assez proches deux à deux, garantit que les algorithmes de traitement d'image pourront trouver automatiquement suffisamment de points de liaison entre paires consécutives (la formulation rigoureuse de ce point est un peu complexe et fait intervenir la notion de K-connexité) ; cette densité du graphe des photos ayant suffisamment de points communs permet le calcul automatique des solutions initiales au problème de l'orientation relatives et assure la précision finale des résultats dans la phase d'ajustement de faisceaux ; par ailleurs, cette densité des caniveaux photogrammétrique, en augmentant la redondance des systèmes à résoudre, rend aussi possible, au moins pour les applications non métrologiques, les approches d'auto-calibrage de la caméra et allège ainsi très sensiblement le processus ;
- Deuxièmement, la possibilité de photographier le même point terrain depuis un grand nombre de points de vue, permet d'utiliser des méthodes de corrélation multi-images ; dans ces méthodes, au lieu de comparer simplement les « vignettes » images deux à deux, on valide un point en 3D en quantifiant la ressemblance conjointe de l'ensemble de ses projections sur plusieurs (typiquement 3 à 9) images ; on augmente ainsi fortement la fiabilité des appariement puisque la probabilité que les points se ressemblent simultanément dans toutes les images sans être réellement homologues diminue sensiblement quand on utilise 3 ou 4 images ; l'augmentation du nombre de mesures pour un point, permet aussi d'améliorer la précision des mesures.

Lorsque l'on peut contrôler finement l'acquisition (ce n'est pas forcément le cas en aérien), on préférera exploiter en multi corrélation des ensembles d'images correspondant à des bases faibles, typiquement ce sera des rapports base-hauteur entre un et trois dixièmes. En effet, pour la stéréo-restitution manuelle on recommande plutôt des bases fortes (jusqu'à un rapport de B/H de un) parce que l'opérateur humain est très robuste et sait éviter les fautes d'appariement alors qu'en inversement il n'est pas forcément productif pour aller saisir de manière très sub-pixellaire des images qui se ressemblent fortement. Inversement l'opérateur automatisé est assez performant pour appairer finement des images qui se ressemblent alors qu'il peut voir ses performances chuter de manière incontrôlée lorsque la différence des points de vue crée des dissemblances trop fortes entre points homologues.

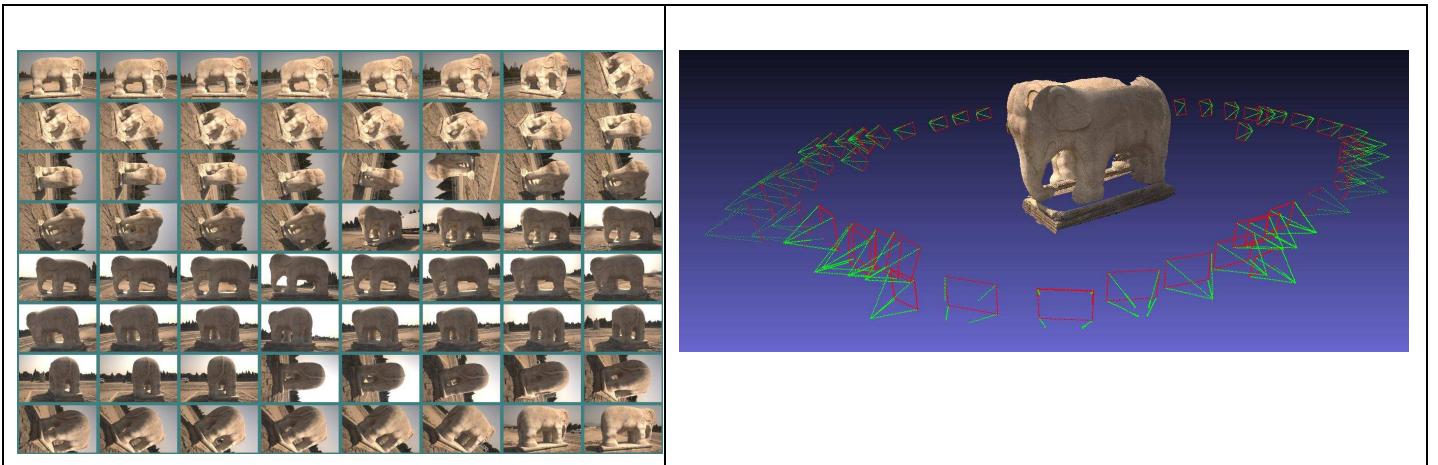


Figure 3 : Exemple des « nouveaux » protocoles d'acquisition utilisés en photogrammétrie numérique, à droite planche des 66 images utilisées pour acquérir le modèle de l'éléphant, à gauche position des caméras.

3-Fusion des approches de photogrammétrie et de vision par ordinateur

Les communautés de photogrammétrie et de vision par ordinateur travaillent sur la même problématique scientifique qui est la modélisation 3D à partir de photo en utilisant le principe de la stéréoscopie artificielle. Cependant malgré ce point commun « fondateur », les deux populations ont longtemps travaillé en parallèle, chacune étant focalisée sur ses objectifs applicatifs et n’ayant qu’une connaissance assez limitée des travaux de l’autre population.

Traditionnellement, la photogrammétrie est d’abord une technique métrologique de mesure de distances ; que ce soit en cartographie, ou pour les applications architecturales et industrielles son objectif principal est la précision des mesures qu’elle fournit beaucoup plus que l’automatisation totale de ses processus. En 2000, les photogrammètres travaillaient donc sur des images argentiques numérisées, les seules à avoir une résolution suffisante, avec des outils de stéréo-restitution faisant fortement appel à la vision et l’intelligence de l’opérateur humain.

La vision par ordinateur, technique beaucoup plus récente, est une branche de la robotique qui a pour objectif d’utiliser des paires d’images stéréoscopiques pour acquérir l’information tridimensionnelle permettant à un robot de naviguer de manière autonome dans un environnement inconnu. Par nécessité, la vision par ordinateur ne s’intéresse qu’à des processus 100 % automatisés, programmables en temps réels et travaille dès le départ sur des images acquises par des caméras numérique qui, dans les années 2000 étaient encore de résolution faible. Par contre la contrainte de précision y est relativement peu présente, l’objectif principal étant une reconstruction relative de l’environnement permettant d’éviter les collisions.

C’est encore l’arrivée d’appareil numérique de qualité de plus en plus grande, qui a motivé des travaux de recherche visant à réaliser des modélisations 3D par photo qui réunissent la précision de la reconstruction photogrammétrique avec l’automatisation des travaux de vision par ordinateur. Au départ c’est surtout les roboticiens qui ont les premiers « franchi la frontière » avec les applications de SLAM (simmultaneous localization and mapping) dans lesquelles le robot ne reconstruit plus simplement son environnement immédiat mais cherche à intégrer l’ensemble des données acquises depuis son départ pour créer une carte 3D complète ; pour éviter les phénomènes de dérive, ils ont « emprunté », puis ont revisité les techniques d’ajustement de faisceaux.

Le développement des appareils, la fusion des deux approches, et la création d’une communauté de recherche spécifique émulée par une compétition très ardente a créé les conditions dans lesquelles ont émergés les progrès spectaculaires déjà décrits ; ces progrès ont souvent été possibles en empruntant des outils mathématiques assez sophistiqués aux domaines connexes. Pour la grande majorité de ces travaux, les progrès ont surtout consisté en améliorations et intégrations de plus en plus poussées de techniques déjà anciennes venant parfois de domaines assez éloignés (tels que les « graph cuts », par exemple Labatut 2007).

Il y a cependant un aspect pour lequel on peut estimer qu’il y a eu un vrai saut c’est le calcul des points de liaisons. Cette étape préliminaire : trouver des points homologues fiables et suffisants à partir des seules images en recouvrement, est le « chainon manquant » qui aurait empêché il y a dix ans de concevoir par assemblage des briques existantes un processus complet de modélisation 3D automatique. Aujourd’hui, avec des algorithmes tels que SIFT (Lowe 2004), le plus célèbre, mais aussi SURF ou MSER, on est capable, étant donné deux images suffisamment texturées visant partiellement la même scène, et rien de plus (aucun a priori sur l’orientation) de trouver de manière rapide, avec très peu de faux appariements, un ensemble conséquent de points homologues. Non seulement, aucun des ces algorithmes n’existait il y a une décennie, mais très peu de personnes auraient à l’époque imaginé que ceci serait réalisable quelques années plus tard. C’est ce qui selon nous différencie une vraie rupture de technologie d’une succession d’évolutions progressives.

4-L’apparition des scanners lasers

Un élément de contexte important pour analyser l’évolution de la modélisation 3D par photo depuis une dizaine d’années est l’apparition à la fin des années 90, puis le déploiement massif dans le courant des années 2000, des scanners laser, qu’ils soient aériens ou terrestre. Lorsque, au-delà des prototypes de laboratoires, la preuve du potentiel opérationnel de ces nouveaux outils est devenue évidente, une partie de la communauté cartographique a prédit la disparition certaine, à plus ou moins brève échéance, de la modélisation 3D par photogrammétrie. La « prédiction » se basait sur la comparaison avec les techniques de corrélation automatique à partir d’images analogiques qui étaient encore majoritaires à l’époque ; elle se serait sans doute réalisée sans l’apparition du numérique, mais on ne refait pas l’histoire.

Comme rappelé précédemment, le numérique a complètement renouvelé les possibilités de restitution 3D automatique par photo, en améliorant la qualité des images et, surtout, en permettant de multiplier à coût quasi nul les points de vue. De manière assez emblématique, un article de la photogrammetric week 2009 s’intitulait « the come back of digital image matching » et montrait, à partir de comparaisons chiffrées, qu’en cartographie aérienne la multi-corrélation d’images numérique avait des performances équivalentes aux acquisitions laser (hors végétation). Depuis quelques temps, certains auteurs, aussi téméraires que les précédents, prédisent d’ailleurs la disparition à moyen terme des scanners laser...

Dans l’état actuel, les deux techniques ont clairement des avantages complémentaires :

- La numérisation par laser donne des résultats avec très peu de fautes, elle fonctionne sur presque tous les matériaux (alors que la photogrammétrie nécessite des matières texturées), en zone végétale de densité modérée une partie des échos atteint le sol et permet ainsi de modéliser simultanément le terrain et la canopée ;
- La numérisation par photo nécessite un matériel moins cher (50 fois) et moins lourd (10 fois) que le laser, elle permet une acquisition plus rapide, le matériel peut donc être embarqué sur un « vecteur » léger (drone, perche, piétons, plongeur, cerf-volant...), le même matériel est utilisable à presque toutes les échelles, en plus de la géométrie on obtient une radiométrie de haute qualité directement superposable aux points 3D.

Ce bref rappel des avantages comparés nous semble suffisant pour affirmer que si une des deux techniques doit un jour supplanter l'autre ce n'est probablement pas à court ou moyen terme. Ce qui est certain est que leur futur est lié et chaque technique doit se positionner par rapport à l'autre; à titre d'exemple, si la modélisation par photo a évolué vers des techniques de plus en plus automatiques et a reculé fortement sur les applications métrologiques, c'est en grande partie une conséquence de l'apparition des techniques lasers.

5- L'environnement numérique

La photogrammétrie, technique maintenant complètement numérique, est évidemment influencée directement par l'évolution générale des techniques informatiques et de la place croissante d'internet dans l'informatisation des processus. Parmi ces évolutions, deux ont déjà commencé à faire évoluer les pratiques de la photogrammétrie :

- Le développement du calcul parallèle à bas coût, notamment grâce aux cartes GPU ; à plus longue échéance, cela permettrait d'envisager que le traitement photogrammétrique automatique se fasse en temps quasi réel et simultanée avec l'acquisition, ce qui serait un progrès fondamental en terme d'ergonomie ;
- Le développement des WEB services dédiées à la photogrammétrie, l'intérêt par rapport à une diffusion classique sous forme de logiciels est évidemment de factoriser la puissance de calcul (cloud computing) et de décharger l'utilisateur des problèmes d'installation et de portabilité des logiciels ; ces services existent déjà pour les applications ludiques à destination du grand public, mais ils sont encore très peu développés dans les applications scientifiques.

Les paragraphes précédents ont analysé les différents éléments permettant d'expliquer les changements fondamentaux qu'a connus la photogrammétrie depuis une dizaine d'années. Dans un environnement très complexe où se combinent de nombreuses évolution continues, souvent de plus en plus rapide, nous avons distingué deux points qui nous semblent avoir été de vrais éléments de rupture : l'apparition de méthode efficace de calcul de points de liaisons, telle que SIFT, et la possibilité, grâce aux appareils numériques, de définir de nouveaux protocole d'acquisition où la masse des photos redondantes permet d'assurer l'automatisation, la robustesse et la précision.

II – LA CHAINE PHOTOGRAFMIQUE « LIBRE » DE L'IGN

1- Positionnement par rapport aux autres solutions.

L'offre de services de numérisation 3D à partir de photos peut prendre les formes suivantes : logiciel traditionnel distribué sous licences commerciales, service WEB, logiciels open source.

L'avantage ressenti des logiciels sous licences commerciales est d'offrir la sécurité d'un service de support et de documentation ; leur inconvénient est d'être relativement chers et, à notre connaissance, de ne pas avoir évolué de manière significative pour prendre en compte la très grande automatisation rendue possible depuis quelques années. L'avantage des services WEB est la simplicité d'utilisation pour l'utilisateur final, la mise en commun des ressources de calcul et, pour les services existants aujourd'hui, la gratuité (mais ce ne pas intrinsèque au modèle, et sans doute provisoire...); leur limitation est de nécessiter de disposer d'une connexion internet, d'imposer à l'utilisateur de communiquer ses images ; par ailleurs, les services actuels ne donnent pas accès au code source ce qui ne permet pas d'adapter les outils finement aux besoins des utilisateurs et met ceux-ci en situation de dépendance.

En modélisation 3D, comme dans tous les domaines numériques, les logiciels open source, libres et gratuits, sont une alternative intéressante pour les utilisateurs, surtout pour le grand public (d'abord sensible à la gratuité) et pour les laboratoires scientifiques (d'abord sensible à l'indépendance). Un site internet recense les solutions photogrammétiques libres [OSP 2010]. La plus connue de ces solutions libres est basée sur bundler (snively 2008) et PMVS (Furukawa 2009). Ces solutions sont conçues d'abord pour le grand public, et leur priorité est de pouvoir opérer sur des photos prises avec un très faible *a priori*, certains travaux s'intéressant même à de la modélisation à partir d'images glanées sur le WEB ! Les résultats obtenus sont souvent d'aspect très satisfaisant : les points 3D mesurés, même peu denses, sont complétés par des phases de triangulation permettant de les habiller avec la texture des images et la géométrie relative est suffisante pour assurer la cohérence visuelle du modèle. Cependant les résultats produits, sont souvent insuffisants pour beaucoup d'applications scientifiques où le modèle 3D est d'abord un instrument de mesure avant d'être un support de communication.

Pour ces applications scientifiques il importe, d'une part, de garantir, autant que possible, une densité de mesure forte et homogène des points 3D et, d'autre part, d'avoir une approche la plus exacte possible dans le calcul d'orientations des images ; ceci implique d'utiliser les modèles mathématiques de capteurs définis en fonction de la modélisation physique rigoureuse des caméras et des possibilités opérationnelle d'estimation précise des paramètres de ces capteurs.

Il est donc nécessaire de définir des protocoles d'acquisition qui prennent en compte à la fois les contraintes opérationnelles de prises de vues et les contraintes photogrammétriques, notamment en termes de densité du canevas qui permettra une reconstruction suffisamment précise. Ces protocoles prenant en compte simultanément les deux types de contraintes, ne peuvent émerger que d'un dialogue entre les scientifiques utilisateurs de ces techniques, architectes, archéologues, géomorphologues... et les scientifiques développant ces outils, photogrammètres, informaticiens... Concernant nos outils, ce dialogue est très largement entamé dans le domaine de l'architecture et du patrimoine (Clery 2010, Godet 2010, Vallet 2010) et nous espérons, notamment à l'occasion de cette école d'été, pouvoir le développer avec les scientifiques travaillant sur les problématiques environnementales. Nous pensons que l'apprentissage en quelques heures de ces protocoles simples, s'il est contraignant pour le grand public qui va en général faire un ou deux modèle 3D avant de passer à un autre « jeu », est très vite rentabilisé pour les professionnels grâce au temps économisé dans les traitements ultérieurs.

Notre chaîne de traitement, est issue de travaux de recherches, initiés en 2003, sur du calcul de modèle d'élévation à partir de mission aérienne numérique multi-stéréoscopique. Cette chaîne est utilisée pour la production de l'IGN et accessible en open source (MicMac, Apero 2010) ; depuis 2007, la chaîne s'est diversifiée et elle contient aujourd'hui le pipeline complet permettant de transformer un ensemble d'image en un modèle 3D. Si à quelques occasions, notamment de « benchmarking », nous l'avons utilisée pour traiter des jeux de données acquis sans aucun protocole, cette chaîne de traitement n'est clairement pas optimisée pour cet usage.

2- Protocoles

Le protocole que nous décrivons ici est typiquement adapté aux utilisateurs qui peuvent acheter un appareil reflex, éventuellement d'entrée de gamme ; il suppose que les réglages de l'appareil (zoom s'il y en a, et mise au point) soient constants. Si l'on dispose d'une caméra photogrammétriquement stable, ce protocole peut évidemment être utilisé en supprimant la première phase de calibrage; il peut être aussi utilisé avec un appareil de type compact mais avec des précisions moins bonnes.

Ce protocole, permettant par exemple de traiter des objets de type statuaire ou des modélisations d'intérieur, est constitué de trois phases :

- Acquisition pour le calcul de la valeur initiale des paramètres internes (focale, point principal, distorsion) ; cette phase est constituée de cinq à dix images convergentes sur une portion de scène texturée et présentant des variations importantes de profondeurs (pour la détermination de la focale) ; cette phase permet de diminuer les risques de divergence dans le calcul de l'orientation de grands blocs ; si cette phase est omise et que le bloc converge quand même, alors cette omission n'aura pas d'influence sur la précision finale ;
- Acquisition pour le calcul de l'orientation du bloc ; les images sont acquises en se déplaçant « lentement » afin que deux images consécutives se ressemblent beaucoup (point de vue proches) et aient un fort recouvrement, à titre d'ordre de grandeur, il est prudent d'assurer un recouvrement de 80 % sur un bloc linéaire et de 60-70% sur un bloc bidimensionnel ;
- Acquisition pour la corrélation, les images de cette phase sont constituées de groupes de 3 à 6 images convergentes à B/H faibles ; dans chaque groupe une image centrale sera utilisée pour donner un nuage de point dans la géométrie de cette image, on obtiendra donc par chaque groupe une structure de donnée équivalente à un scan laser ; comme avec le laser, une des difficultés de cette étape est d'assurer qu'il y aura suffisamment d'images pour ne pas avoir de parties cachées inacceptables.

Pour des acquisitions aériennes, le protocole est plus simple puisque, d'une part, le vecteur ne permet pas en général de spécifier des acquisitions de type convergent et, d'autre part, la géométrie générale de la scène permet une restitution, sous la forme d'une carte $Z=f(X,Y)$, à partir d'acquisitions à axes parallèles. Les spécifications sont donc proches des prises de vue aériennes classiques, à la différence près que l'on recommande si possible des recouvrements forts, par exemple jusqu'à 80x60 ; l'ajustement du taux de recouvrement étant un compromis à trouver entre le coût de vol, le coût de la préparation terrain et le coût de traitement ; plus le bloc est dense : moins il nécessite de point terrain et plus son exploitation sera automatisable.

3- Organisation de la chaîne

Notre « pipeline » de traitements a une architecture relativement classique en trois étapes séquentielles :

- La première étape consiste en un calcul de points de liaisons entre les images, pour ceci nous utilisons l'implémentation SIFT++ de l'algorithme SIFT, que nous avons intégré pour automatiser et accélérer le calcul de gros chantiers ; SIFT étant soumis à une patente de droit US qui peut être restrictive pour certains utilisateurs, il est possible de remplacer cette étape par n'importe quel générateur de points homologues ;
- La deuxième étape, réalisée par le logiciel APERO, consiste à calculer orientation et position des images compatible avec les points homologues et, éventuellement, d'autres observations (telles que points terrain, GPS embarqué etc...) ;
- La troisième étape, réalisée par le logiciel MicMac, consiste à calculer par appariement des cartes de profondeurs qui seront, si nécessaire, directement convertible en nuage de points.

Ce sont des outils en ligne de commande, paramétrable par des fichiers au format XML ; pour permettre une utilisation bas-niveau de ces outils en dehors de l'IGN, une documentation est en train d'être écrite et sera complète fin 2011. Ce niveau d'interface a été choisi pour permettre d'accéder à toutes les fonctionnalités, même les plus ésoptiques ; c'est une couche de portabilité bas-niveau pour des informaticiens voulant développer en se basant sur ce noyau ; mais ce type d'interface n'est clairement pas adapté aux chercheurs thématiques, et plusieurs interfaces ergonomiques sont en phase de développement.

4- Principales caractéristiques techniques de l'orientation

Le logiciel APERO permet de calculer les calibrations externes des images à partir des points de liaisons et d'éventuelles données auxiliaires. En l'absence de toute donnée auxiliaire, les résultats sont bien entendu purement relatifs et définis à un facteur d'échelle, une orientation et une origine près. Les principaux modules d'APERO sont les suivants :

- Module de calcul des solutions relatives initiales, en utilisant les algorithmes classiques de photogrammétrie-vision par ordinateur tels que matrice essentielle, relèvement dans l'espace ;
- Modules permettant le géo-référencement des solutions à partir de points terrains ou de GPS embarqués ;
- Module d'ajustement de faisceau permettant de compenser l'ensemble des observations pour affiner la précision du résultat ;

Lors de la phase de compensation, APERO permet, sous le contrôle de l'utilisateur, de recalculer directement à partir de la mission tout ou partie des paramètres internes des caméras ; ce fonctionnement est recommandé comme l'option par défaut si l'on n'utilise pas de caméra spécialement construite pour assurer la constance de ces paramètres au cours du temps. Il existe par ailleurs des options permettant de laisser chaque image avoir ses propres paramètres internes ; cette option n'est évidemment pas recommandé en général mais elle peut s'avérer utile en macrophotographie d'objet non plan, où l'on est obligé d'activer l'autofocus de la caméra (induisant de fortes variations de focales pour chaque image).

APERO propose un grand nombre de modèles de calibration interne : modèle radial, modèle décentrique, modèles photogrammétriques « classiques » (Ebner et Brown), modèle polynomiaux quelconques et différents modèles de fish-eyes. Le choix du « bon » modèle est important pour éviter les sur ou sous paramétrisation qui sont des sources potentielles d'imprécision. Si le choix entre ces modèles demande une certaine expertise, il faut noter qu'en dehors des applications métrologiques ou de l'utilisation d'optiques très particulières, le choix « prudent » du modèle radial (ou fish-eye équidistant avec un fish-eye) donne en général des résultats stables et satisfaisants.

5- Principales caractéristiques techniques de l'appariement

Le logiciel MicMac calcule la mise en correspondance dense des images en cherchant une carte de profondeur permettant de maximiser la ressemblance des points reprojetés tout en satisfaisant certains *a priori* sur les solutions recherchées.

La mesure utilisée par MicMac est la plus courante des mesures utilisées en appariement d'images, il s'agit du coefficient de corrélation normalisé centré qui a l'avantage d'être invariant aux principales transformations radiométriques. Les méthodes traditionnelles de corrélation stéréoscopiques simples recherchent, pour chaque point d'une image, l'homologue dans l'autre image ayant la meilleure corrélation sur une vignette de taille fixée. La figure 4 illustre la limitation de la stéréoscopie simple : si la vignette est trop petite le résultat est très bruité car il est assez facile pour des points non homologues d'avoir une ressemblance forte, si la vignette est trop grande les détails du relief disparaissent.

En multi-corrélation, pour une profondeur donnée on projette un point 3D hypothétique dans l'ensemble des images qui sont susceptibles de le voir et l'on mesure la ressemblance simultanée de l'ensemble des vignettes obtenues. La probabilité qu'un point 3D faux se projette par hasard sur 3 ou 4 images en des points qui se ressemblent diminue fortement avec le nombre d'images, on obtient ainsi une mesure brute beaucoup plus fiable, même avec de petites vignettes comme le montre la figure 4.D (il reste un peu de bruit, mais aucun détail n'a disparu).

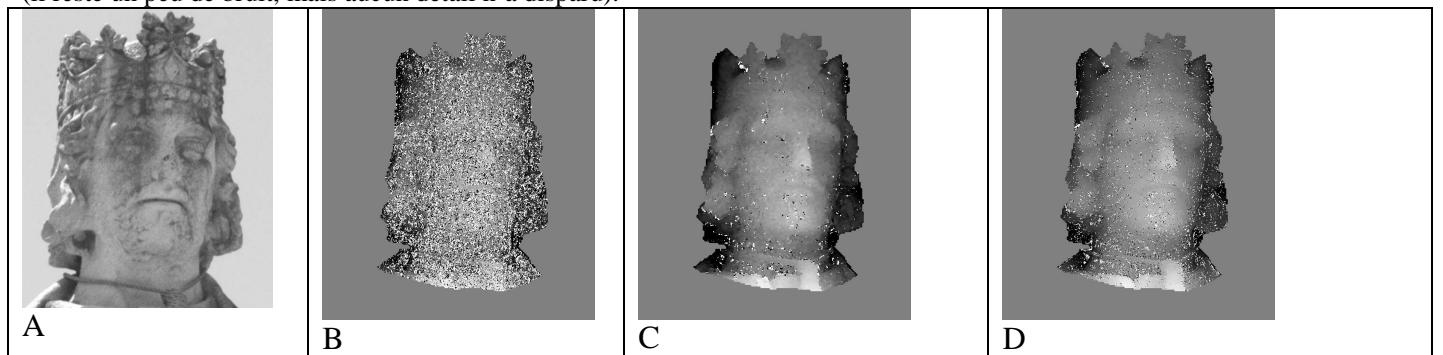


Figure 4 : A une image, B la carte de profondeur calculée en maximisant la corrélation d'une paire stéréo avec de petites vignettes, C idem avec de grande vignettes, D avec de la multi-stéréo et des petites vignettes.

Pour avoir une mesure encore plus robuste, MicMac utilise une approche multi-échelle et multi-résolution dans le calcul de l'appariement. Ces approches partent de la remarque, que lorsque les points sont vraiment homologues, les détails ainsi que leur environnement proche, moyen et lointain doivent se ressembler, autrement dit les vrais homologues se ressemblent à toute les échelles ; par contre les faux homologues peuvent se ressembler fortuitement au niveau du détail fin mais pas de leur environnement. Concrètement, on calcule une pyramide d'image et l'on commence par calculer une carte de profondeur à basse résolution, ensuite à chaque niveau on contraint la carte de profondeur de l'étape précédente à rester relativement proche de celle de l'étape précédente. La figure 5 illustre les différents niveaux de calcul.



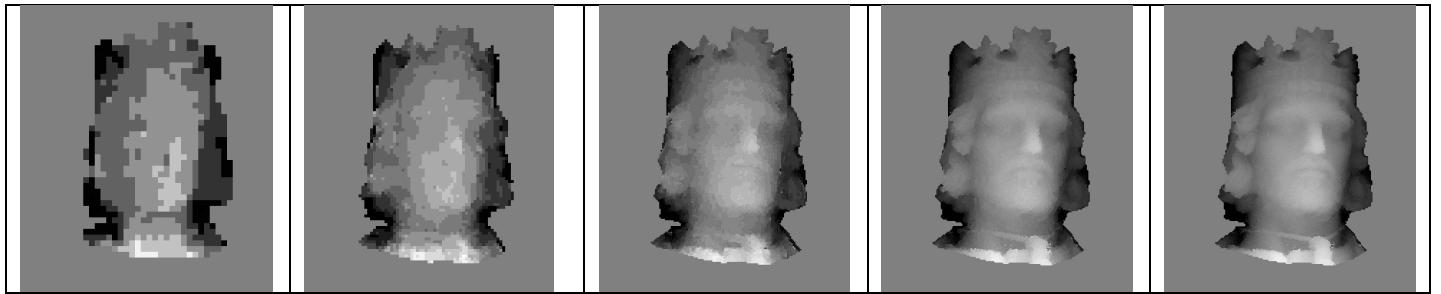


Figure 5: Corrélation multi-échelle multi-résolution, en haut pyramide d'images et en bas pyramide des cartes de profondeurs associées.

L'approche multi-échelle et la mesure multi-corrélation ne sont pas suffisantes pour supprimer toutes les fautes d'appariement et il est nécessaire d'ajouter un « léger » a priori sur les solutions recherchée pour que, toutes choses presque égales par ailleurs sur la ressemblance entre images, on s'oriente sur des solutions ayant une certaine régularité. De manière classique, pour formaliser la satisfaction simultanée de ces deux critères incompatibles, on définit une fonction de coût qui est la somme du critère de ressemblance (corrélation) et du critère de régularité (variations de la profondeur), l'on cherche alors la solution qui minimise globalement l'intégrale ce critère ; un coefficient de régularisation permet de contrôler l'importance données à l'information a priori ; la figure 6 illustre l'effet de ce coefficient.

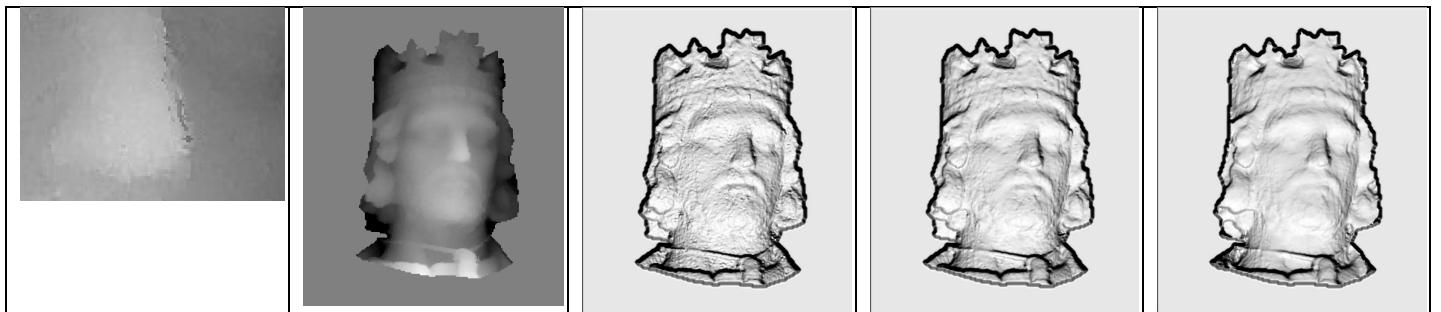


Figure 6: Détail sur un défaut de corrélation, résultat après régularisation. En ombrage trois cartes obtenue avec différents paramètre de régularisation (faible, standard, forte).

6- Version interfacée.

Les outils en ligne de commandes, n'étant pas adaptés aux utilisateurs finaux, une interface graphique, est en cours de développement afin de fournir un accès simplifié et unifié à ces outils, notamment aux architectes, archéologues et géomorphologues. Grâce à l'interface, l'utilisateur peut manipuler les images d'un même chantier et contrôler chaque étape du traitement. Les résultats peuvent être convertis en cartes de profondeur ombrées ou en nuages denses de points 3D (au format standard ply), et peuvent être affichés directement par l'interface.

Pour offrir la possibilité de traiter des chantiers suffisamment variés, tout en masquant la complexité du paramétrage, la démarche retenue est de présenter à l'utilisateur un accès par grande famille de prises de vue, par exemple : chantier convergent, relevé de façades, chantier aérien sub-vertical, modélisation d'intérieur... Une attention particulière est apportée à la qualité de la documentation et à la portabilité du produit sur les principaux types d'ordinateur grand public (Linux, Mac et Windows) ; pour ceci on s'appuie sur la bibliothèque QT qui est libre et portable. Cette interface, bien que non finalisée, permet déjà d'effectuer l'intégralité du traitement de chantiers de type convergent et est disponible en ligne. Des utilisateurs issus des différentes communautés de professionnels ciblées (archéologie, architecture, géologie, photogrammétrie architecturale) l'ont déjà testée et l'interface est régulièrement mise à jour afin de l'adapter aux remarques et demandes de ces testeurs.

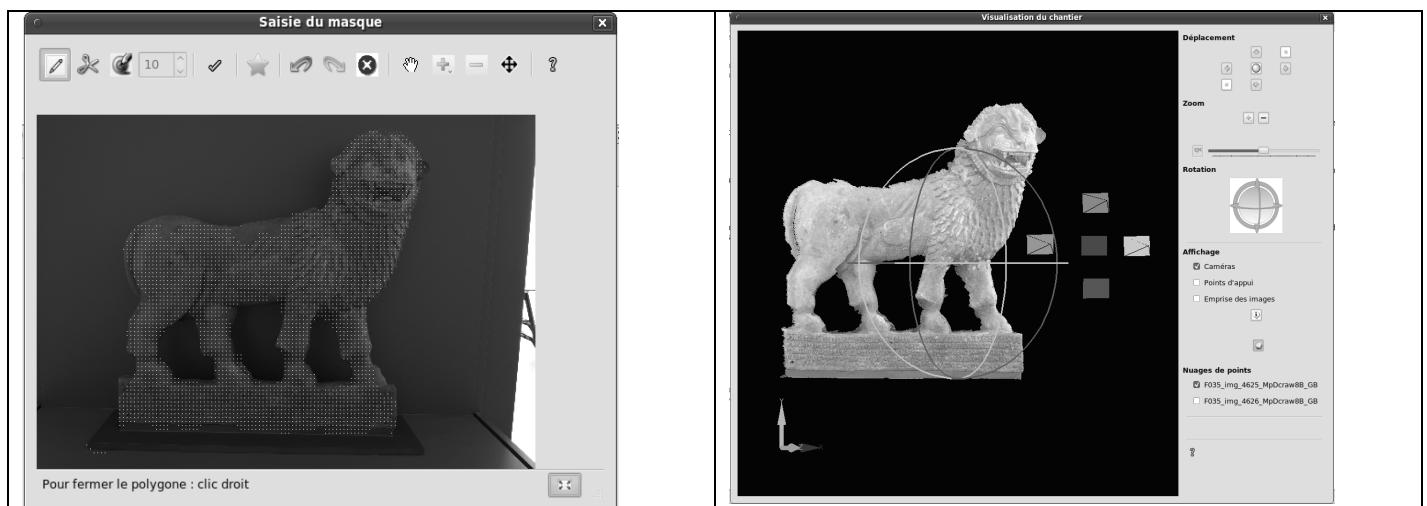


Figure 7: Exemple de fenêtres de dialogue.

7- Précision atteinte.

Une des questions récurrentes des utilisateurs est « quelle précision » peut-on atteindre avec ces outils. Si la question est légitime, il est très difficile d'y répondre. Bien sûr, toutes choses égales par ailleurs, la précision est directement proportionnelle à la résolution des images. Au-delà de cette évidence, la réponse est complexe car cela dépend à la fois de la définition de la précision, du type de scène et des conditions d'acquisition.

A partir des expériences que nous avons faites, de comparaison avec des lasers ou des mesures terrain en photogrammétrie aérienne, la précision est inférieure au pixel dans les conditions suivantes :

- Surface non homogènes, ce critère est presque toujours vérifié sur des terrains naturel, par contre il restreint fortement l'usage pour de la modélisation d'intérieur de bâtiments modernes ;
- Points suffisamment loin des discontinuités, la frontière de ces discontinuités étant restituée avec une imprécision de 1 ou 2 pixel ;
- B/H autour de 0.2 ;
- Portion de blocs sans données d'appuis de taille relativement petits à cause des problèmes de dérive de l'orientation.

Le dernier critère est malheureusement le plus flou. Sur nos expériences, pour un objet de type sculpté dont on fait le tour, et qui est de taille suffisamment faible pour être contenu sur une photo, il n'y a pas de problème de dérive significative. Par contre, sur un objet de type « ruban » en l'absence de donnée d'appuis la dérive est mal connue et probablement importante. Pour ce type de problème, les estimations habituelles basées sur la variance et la covariance ne nous semblent pas suffisantes. Le développement d'estimateur de la stabilité du bloc pourrait être un axe de recherche. En parallèle, pour les scènes d'extérieurs sur des objets éloignés, le couplage précis avec un GPS associé serait sûrement une solution pour améliorer la précision des blocs en évitant les effets de dérive.

III-EXEMPLES DE REALISATIONS ET PROTOCOLES POUR LES MILIEU NATURELS

Dans cette partie nous allons décrire un certains nombre de réalisations, effectuées avec la chaîne de traitements présentée, et illustrer l'aspect souple et adaptable de la photogrammétrie comme technique de modélisation 3D en discutant notamment, sur des exemples concrets, comment cette technique se positionne par rapport au laser.

1- Prise de vue aérienne.

Les figures 8 et 9 présentent des résultats de calcul de modèles numériques de terrain à partir d'acquisitions aériennes avec des moyens très légers et des appareils photos pesant entre 200 et 500 grammes. Dans le cas de la figure 8, il s'agit d'un petit avion en polyester et dans le cas de la figure 9 d'acquisition avec un cerf-volant. Dans ces deux opérations, le vecteur ne permet pas de suivre un plan de vol régulier et le pilotage se fait « à vue », c'est le calcul au sol qui permet de retrouver le tableau d'assemblage puis les orientations. Pour ce type d'acquisition, on fait les calculs directement en géométrie terrain et on obtient un MNE complet sous la forme d'une grille régulière. Pour ces chantiers la résolution était de deux à trois centimètres. Pour des petits chantiers de ce type, de l'ordre de moins d'un kilomètre carré, la réalisation d'un vol lidar, aéroporté ou héliporté, coûterait beaucoup plus cher et n'offrirait pas la même résolution.

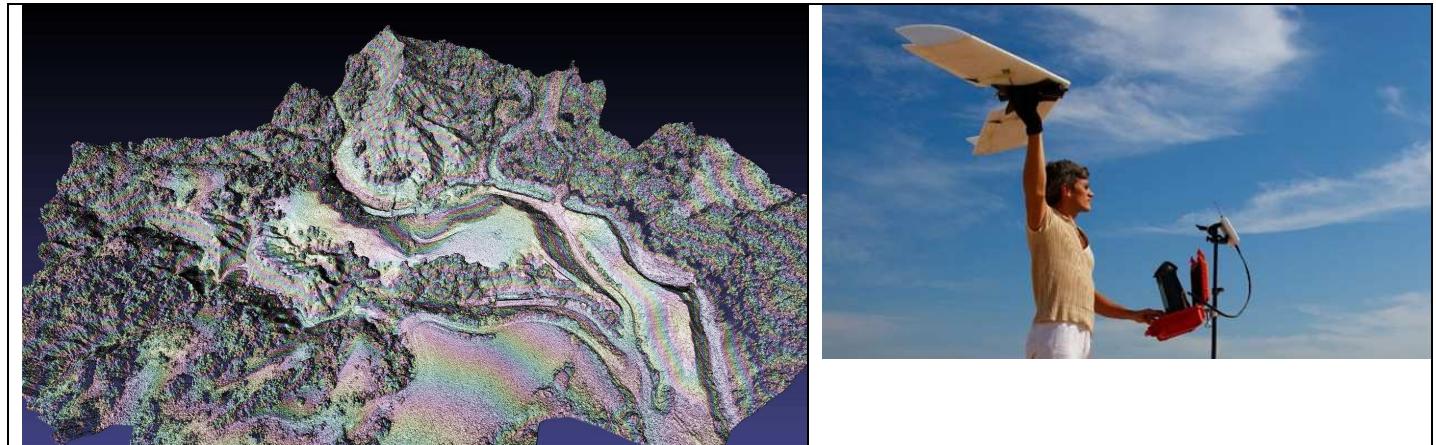


Figure 8: Modèles numériques de terrain calculés à partir : d'un drone Lheman, sur le bassin versant de Draix, visualisation en ombrage et ipsométrie, à droite le drone au décollage.

Pour le MNE sur Draix, on a utilisé 150 images acquises avec un petit appareil compact. L'optique est d'assez mauvaise qualité et c'est un des rares cas où l'on a utilisé un modèle de distorsion complexe (modèle radiale combiné avec un modèle polynomial de degré 5).

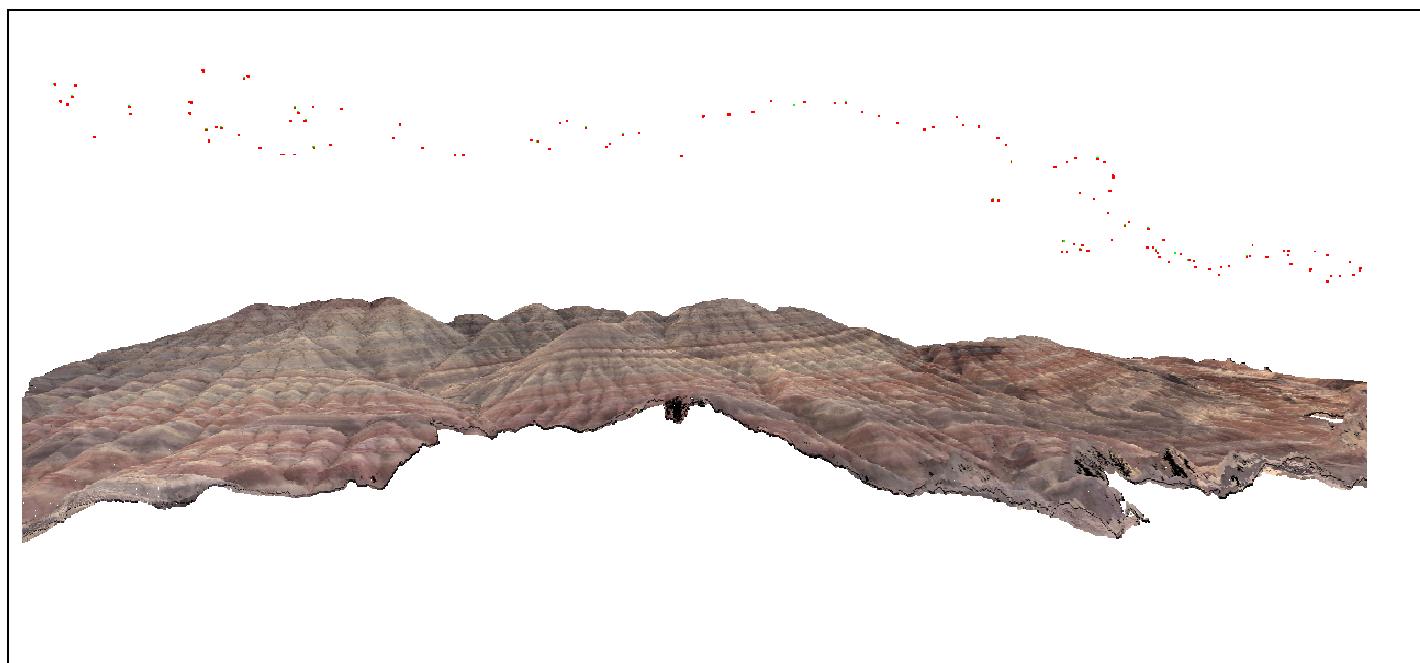


Figure 9: Nuage de point avec drapage d'ortho photo à partir de photos acquise par cerf-volant sur les mines de sel de Dugazi (mission CNRS, photos Sandrine Sanz).

Le MNE sur Dugazi, a utilisé 100 images acquises avec un bridge de bonne qualité. Quelques points terrain mesurés au GPS ont permis de faire un géo-référencement approximatif.

2- Prise de vue terrestre extérieur.

Pour la modélisation d'extérieur à partir d'acquisition terrestre, l'intérêt de la photogrammétrie est le poids du matériel, que l'on peut mettre dans son sac à dos « au cas où », l'instantanéité de la prise de vue que l'on faire au fil de la marche, et l'aspect multi-échelle qui permet d'utiliser le même appareil pour modéliser la motte de terre ou le massif montagneux.



Figure 10: Falaise de Criel-sur-Mer, ruban des 56 photos acquises depuis la plage et modèle 3D de la falaise.

La figure 10 présente un protocole d'acquisition très simple puisque complètement linéaire. Pour modéliser la falaise de Criel sur mer, on a marché sur la plage parallèlement à la falaise et pris des photos à intervalle régulier, en assurant des recouvrements forts (de l'ordre de 80%), avec un reflex de bonne qualité (Cannon 5D Mark 2). Il est probable qu'avec ce type d'acquisition il y ait une dérive assez forte et l'utilisation d'un GPS synchronisé avec la prise de vue serait une des pistes pour limiter cette dérive.



Figure 11: Rouvine de Draix, modélisation depuis le flanc de colline opposée, une des photos et le modèle 3D.

La figure 11 présente un essai de modélisation d'un « petit » bassin versant en faisant des acquisitions depuis le flanc de colline opposé. Les images sont toutes convergentes, pour avoir des conditions de stéréo optimale, on a crée de la parallaxe en 2 dimension en se déplaçant horizontalement et verticalement.



Figure 12 : Photo de sol et modèle 3D utilisé pour des calculs de rugosité.

La figure 12 présente une expérience faite avec l'INRA, pour modéliser par photogrammétrie la surface des sols afin d'en tirer des indicateurs de rugosité. L'acquisition est très simple, faite de 5 photos convergentes acquises en une ou deux minutes.

3-Prise de vue intérieur.

En milieu naturel, la modélisation d'intérieur concerne essentiellement les grottes ; cela nécessite donc que l'on trouve un moyen d'éclairer la scène; une fois cet aspect résolu, l'avantage potentiel de la photogrammétrie pour ce type de milieu est la rapidité des acquisitions, dans un milieu humide et froid où l'on souhaite limiter le temps de séjour, et le poids du matériel pour certaines cavités d'accès peu commode.

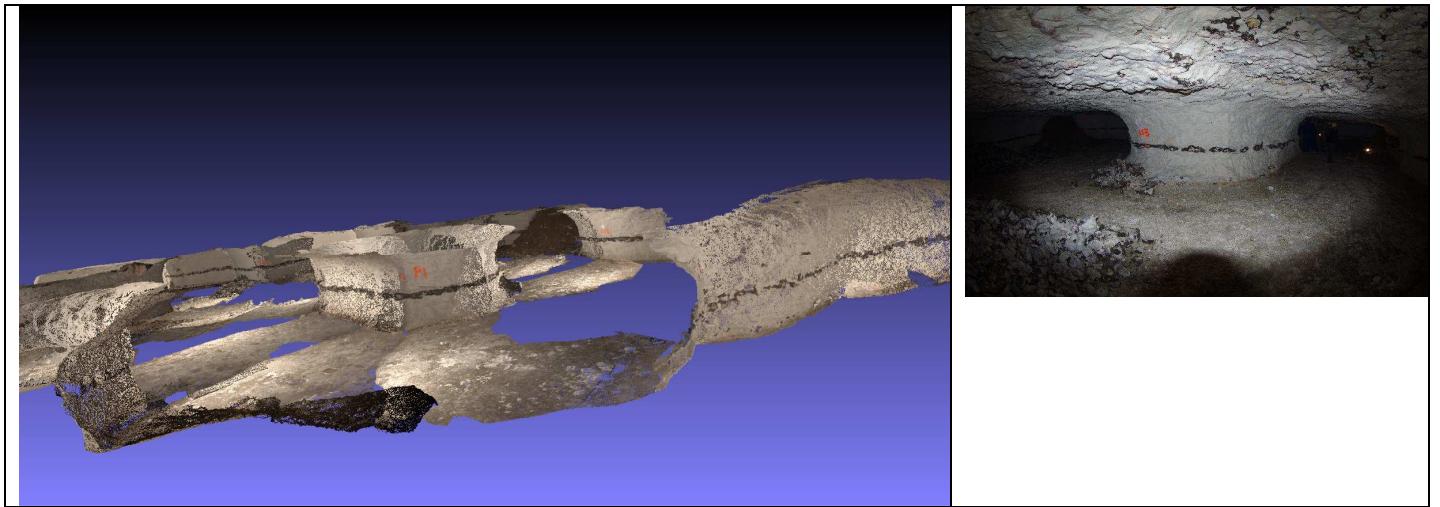


Figure 13 : Marnière de Saint-Nicolas de la Taille modélisée à partir de 350 photos acquises au fish-eye et utilisation du flash, extrait du modèle 3D et une des photos.

La figure 13 présente une acquisition pour de la modélisation global de scène d'intérieur ; ce type d'acquisition est très courant en architecture. En modélisation globale où l'on ne cherche pas nécessairement une grande précision mais où l'on veut couvrir la sphère complète, les objectifs fish-eyes sont très commodes pour limiter le nombre d'images. Les images brutes qu'ils acquièrent sont fortement déformées mais cela n'impacte pas du tout la géométrie du nuage si la distorsion est bien modélisée. On peut d'ailleurs voir sur la figure 15 l'image fish-eye très déformée alors que dans le nuage les lignes droites sont rectifiées. La nouveauté sur la marnière de Saint-Nicolas de la Taille était de travailler au flash intégré afin d'avoir un mode opératoire le plus léger possible. La qualité image résultant du flash n'a pas trop perturbé le calcul ; le seul problème observé est que la portée angulaire de ces petits flashes est très inférieure à l'ouverture du fish-eye, seule donc la moitié de l'image est réellement utilisable.

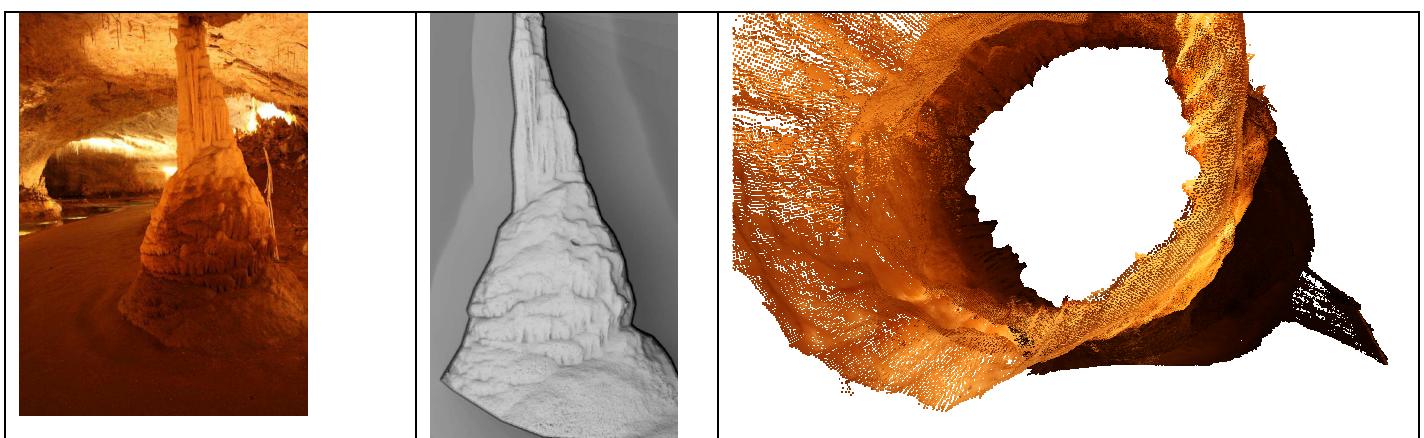


Figure 14 : Stalagmite de la grotte de Chorance : une photo, le modèle ombré d'un des points de vue, et une coupe dans le nuage calculé.

La figure 14 présente une acquisition pour de la modélisation de stalagmite, pour ce modèle on a réalisé 40 photos avec un protocole identique à celui que l'on utilise pour la modélisation de sculpture (voir figure 3) ; l'expérience a été faite dans la grotte de Chorance qui est une grotte visitée et éclairée et les photos ont été faites sur pied, avec des temps de pose assez long (1/10 de seconde) en utilisant l'éclairage existant. De manière générale les grottes ne sont pas éclairées et il est probable que pour la calcite humide constituant ces stalagmites, l'éclairage au flash aurait posé des problèmes de réflexion spéculaire; il suffit alors d'amener un éclairage très léger, de type led ou néon, et d'effectuer des temps de pose longs (1 seconde ou plus) en travaillant sur pied, nous avons expérimenté ces éclairage sur des problématiques archéologiques (grottes de Mayenne science et de Rouffignac) et n'avons rencontré aucune difficulté d'exploitation.

4- Milieux aquatiques.

Si l'avantage de légèreté et l'instantanéité de photo est surtout évidente pour les acquisitions où le point de prise de vue est dans l'air (drone, cerf-volant), ce peut être aussi déterminant dans les milieux où le point de prise de vue est nécessairement sur l'eau ou dans l'eau. Les figures 14 et 15 représentent deux expérimentations en milieu aquatique sur des problématiques architecturale et archéologique.



Figure 15: Modélisation du pont de la tour de constance à Aigues-Mortes à partir de photos acquises depuis une barque, à droite une des photos acquises.

Pour la tour de constance, la contrainte était de modéliser le pont y compris en dessous ; il fallait donc réaliser les acquisitions depuis une embarcation, nous avons choisi d'utiliser un fish-eye afin d'accélérer la prise de vue. Ce type d'acquisition serait, par exemple, tout à fait envisageable pour modéliser des gorges à partir de la rivière. Le modèle a été fait en mélangeant cent images fish-eye acquise depuis l'eau et cinquante images 24mm acquises depuis la terre.

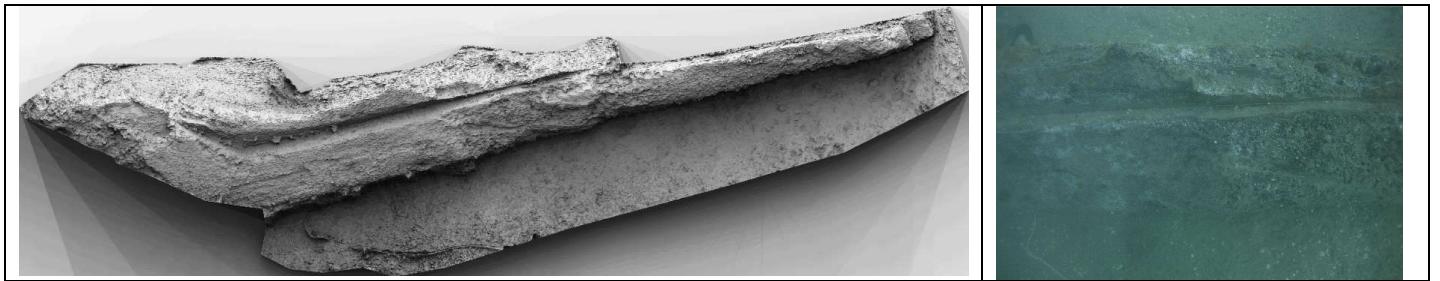


Figure 16: Modélisation du brion de l'épave « Jeanne-Elisabeth » au large de Palavas les flots, modèle 3D ombré et une des photos (mission DRASSM, photos Philippe Groscaux).

La figure 16 représente le modèle 3D du brion (pièce située entre l'étrave et la quille) d'une épave modélisée à partir de 50 photos. La principale difficulté de la modélisation 3D sous-marine n'est pas la photogrammétrie mais la photographie ! En effet si le système optique global « objectif + interface air-verre-eau » se modélise très bien par autocalibrage, le problème de l'exploitation vient des conditions de visibilité qui font que les images sont souvent peu exploitable (l'image de droite est une des meilleures images recueillies). Le modèle 3D du brion présenté fait 3 mètre de long ; si le résultat n'est pas très spectaculaire, il présente un intérêt scientifique potentiel en donnant une vision d'ensemble de la pièce que n'ont jamais eu les plongeur au cours des 15 jours de la mission pendant lesquels la visibilité n'a pas dépassé le mètre.

CONCLUSION

Cette communication a rappelé comment, compte des évolutions structurantes qu'elle a connues depuis les années 2000 avec le passage au numérique, la photogrammétrie est devenu aujourd'hui un moyen de modélisation 3D très compétitif pour beaucoup d'applications. Pour la modélisation des milieux naturels, à l'exception notable de la végétation et de la neige fraîche, elle donne des résultats comparables à ceux des scanner laser pour un équipement nettement plus léger et moins onéreux. Elle est aujourd'hui beaucoup moins répandue que ne le permettrait ses performances techniques, notamment parce qu'il manque encore des outils, si possible libres et gratuits, qui intègre les méthodes automatiques et précises dans une interface ergonomique. Nous pensons que ces outils simples et performants, émergeront d'ici quelques années d'une des solutions en cours de développement dans la communauté.

Parmi les autres perspectives qui permettront un plus large déploiement de la photogrammétrie, nous envisageons essentiellement le développement des services WEB, le développement de caméras métrologiques et le développement de solutions qui permettent une coopération étroite entre programmes automatiques et opérateur humain. Le déploiement de services WEB de photogrammétrie, s'appuyant sur des solutions libres, pourrait être une solution intéressante pour les utilisateurs en combinant la facilité d'utilisation, la mise en commun des ressources de calcul, et la transparence puisque les codes utilisés sur le serveur sont disponibles en mode source ; la question ouverte sera celle du modèle économique. Le développement de caméras légères permettant de faire de la métrologie fine par photogrammétrie (en assurant la rigidité du bloc capteur-optique) a presque disparu lorsque les lasers sont apparus ; à cette époque l'automatisme de la photogrammétrie n'était pas assez développé pour qu'il y ait une demande ; nous pensons que l'état actuel de la technique, décrit dans cet article, génère un nouveau potentiel pour de telles caméras, notamment pour les applications de suivis de déformations. La photogrammétrie traditionnelle est essentiellement manuelle, les développements récents sont allé vers le tout automatique ; sur les chantiers complexes, le tout automatique ne pourra pas résoudre tous les cas, ne serait parce que sur une longue acquisition on fera toujours des erreurs, et il y a sûrement un besoin pour des solutions logicielles intégrant interactivité, ergonomie et fort automatisme ; des solutions commerciales sont en train d'apparaître dans ce sens, il serait préférable qu'elles n'aient pas un monopole total.

BIBLIOGRAPHIE

- CLERY I., PIERROT DESEILLIGNY 2010, M., Interface ergonomique de calculs de modèles 3D par Photogrammétrie , In Colloque Photogrammétrie au Service des Archéologues et des Architectes, SFPT-CIPA, Villeneuve lez Avignon, Septembre 2010.
- FURUKAWA Y., PONCE J., 2009. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, IEEE Transaction on pattern Analysis and Machine Intelligence, August 2010 (vol. 32 no. 8), pp 1362-1376.
- GODET A., PIERROT DESEILLIGNY M., DE LUCA L. 2010, Une approche pour la documentation graphique 3D d'édifices patrimoniaux à partir de (simples) photographies », In Colloque Photogrammétrie au Service des Archéologues et des Architectes, SFPT-CIPA, Villeneuve lez Avignon, Septembre 2010.
- HAALA, N. 2009, « Comeback of Digital Image Matching », Photogrammetric Week 2009, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 289-301.
- KASSER M., EGELS Y. 2001, Photogrammétrie numérique, Paris, Hermès Sciences Publication.
- LOWE, D.G., 2004, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints International journal of computer vision, Volume 60, Number 2, pp 91-110.
- LABATUT, P., PONS, J.-P., KERIVEN, R. 2007. Efficient multi-view reconstruction of large-scale scenes using interest points, Delaunay triangulation and graph cuts. In IEEE International Conference on Computer Vision, Rio de Janeiro, Brazil, Oct 2007.
- MICMAC, APERO 2010, <http://www.micmac.ign.fr/>
- OSP 2010, <http://opensourcephotogrammetry.blogspot.com/>
- SNAVELY N., SEITZ S.M., SZELISKI R. 2008, Modeling the World from Internet Photo Collections, International journal of computer vision, Volume 80, Number 2, pp. 189-210.
- VALLET J.M., DE LUCA L., Marie Feillou, Odile Guillot, Marc Pierrot-Deseilligny, Olivier Baudry, Nassim Trabelsi An interactive 3-dimensional database applied to the conservation of a painted chapel Proceedings of 7th International Conference on Science and Technology In Archaeology and Conservation. Workshop on Documentation and Conservation of Stone deterioration in Heritage Places. Petra (Jordan), December 7 to 12, 2010.