

photogrammétrie et micro-ordinateur

outils de formation
(et de production ?)

Yves EGELS
ENSG

Le cahier des charges

Depuis que j'enseigne la photogrammétrie, je rêvais d'un restituteur que je puisse transporter et faire fonctionner sans contrainte, en un mot d'un restituteur portable. J'avais bien tenté (sans grand succès!) de construire un petit appareil analogique fonctionnant dans un seul plan (il ne permettait que des coupes dans un plan parallèle à la base). Mais il ne pouvait s'agir que d'un jouet pour photogrammètre bricoleur, sans aucune utilité réelle.

La récente montée en puissance des micro-ordinateurs a permis de reprendre l'idée avec plus de chances de réussite. Le cahier des charges est simple; les fonctions seront celles d'un appareil de restitution analytique traditionnel : orientations interne et externe de photographies aériennes ou terrestres (pourquoi pas aussi les images spatiales, en développement constant), saisie et codification d'objets, saisie de mesures d'aérotriangulation ou de MNT.

Nombreux sont les éditeurs de logiciel à s'être penchés sur cette question, que ce soit dans le domaine commercial, ou dans les organismes de formation. Mais aucune réalisation ne convenait réellement au but fixé : les logiciels commerciaux nécessitent généralement des configurations informatiques bien définies (machines multiprocesseurs, cartes graphiques et écrans spécifiques), ce qui exclut pratiquement la transportabilité du système. De plus leur coût de licence est élevé, et le coût d'installation d'une salle de travaux pratiques de photogrammétrie devient prohibitif. Enfin, ces systèmes sont relativement fermés, et il est difficile d'y incorporer de nouveaux algorithmes en un temps compatible avec les impératifs d'une formation; ils comportent des modules fonctionnant en « boîtes noires », assez incompatibles avec la pédagogie.

Dans le domaine universitaire, la situation est à peu près inverse, et la consultation d'Internet montre plusieurs tentatives de répondre à ce besoin. Mais je n'ai pas trouvé de système permettant une visualisation stéréoscopique confortable, comparable à un bon vieux (vingt-cinq ans déjà!) restituteur analytique. Une seule solution : se mettre à l'ouvrage (d'autant plus que c'est quand même la meilleure façon d'apprendre). Ainsi est née l'idée du Poivilliers E, ainsi nommé en souvenir des séances de torture oculaire des travaux pratiques de photogrammétrie.

Réalisation d'un restituteur numérique sur PC

Les caractéristiques d'un restituteur sur PC : temps réel, vitesse d'affichage et de réaction, gros volume de données, commande interactive, relative indépendance de la machine, sont proches de celles que l'on demande à un jeu vidéo, et c'est du côté de ces techniques de programmation qu'il faut

regarder, d'autant plus que l'on commence à trouver des jeux vidéo stéréoscopiques (même s'ils sont aujourd'hui encore très fatigants...).

Du côté des périphériques, deux problèmes indépendants se posent :

a) L'entrée de coordonnées en trois dimensions

(Les deux manivelles et la pédale des Z chères aux restituteurs). Si l'on exclut le recours à des périphériques spécialisés, les solutions sont peu nombreuses : la souris fournit deux coordonnées, restent les flèches du clavier, ou les boutons de la souris pour monter et descendre le ballonnet. Ces deux méthodes fournissent malheureusement un déplacement pas à pas, assez peu pratique pour suivre une route de montagne.

Des moyens testés, le plus confortable semble être l'addition d'une seconde souris – ce n'est pas prévu par les fabricants des pilotes, c'est au logiciel de s'en charger – qui présente l'avantage supplémentaire de permettre le fonctionnement en stéréocomparateur lors de l'orientation, qui nécessite quatre coordonnées.

b) La visualisation stéréoscopique

Là aussi, le confort doit primer. Il existe deux méthodes principales : deux fenêtres séparées sur l'écran, une pour l'image gauche, une pour l'image droite. Le fusionnement stéréo nécessite un dispositif optique (à moins de compter sur le strabisme de l'observateur...) placé devant l'écran. On pourrait bien sûr se passer de vision stéréoscopique et compter sur la mémoire visuelle pour identifier les points homologues sur les images (coin Nord de la deuxième maison du lotissement), ou utiliser massivement la corrélation automatique – mais on retombe alors dans un système boîte noire.

L'autre solution est la superposition des deux images dans une seule fenêtre, un système de codage permettant à chaque œil de recevoir l'image qui lui est destinée. Les moyens les plus courants sont l'anaglyphe (codage rouge-vert des deux images, observées à travers deux filtres de couleur complémentaire) ou l'alternance de trame, où les deux images sont affichées alternativement (ce qui amène à doubler la fréquence de rafraîchissement de l'écran) l'opérateur portant alors une paire de lunettes dont chaque verre est alternativement opaque ou transparent.

Ces deux solutions ont leurs avantages et leurs inconvénients : les anaglyphes sont très bon marché – quelques francs – et fonctionnent bien sûr les ordinateurs portables, dont l'écran à cristaux liquides n'est pas compatible avec les lunettes obturatrices, ou en vidéo-projection; par contre il paraît difficile de conserver plusieurs heures de suite des lunettes rouge et vert sur les yeux. On trouve maintenant avec certains jeux des lunettes obturatrices actives à un prix très raisonnable (quelques centaines de francs). Par contre, les lunettes passives, plus confortables mais qui nécessitent un

filtre actif devant l'écran, sont nettement plus onéreuses (de l'ordre de la dizaine de milliers de francs). Heureusement, toutes ces techniques de superposition d'images sont compatibles, et l'on pourra choisir en fonction de l'utilisation prévue (et de sa bourse).

c) Images fixes ou mobiles

Les photogrammètres sont habitués à observer un ballonnet fixe, derrière lequel se déplacent deux images mobiles. Les informaticiens préfèrent déplacer un ballonnet (quelques pixels) devant des images fixes (quelques centaines de millions de pixels). Qui a raison? Encore une fois, le critère à retenir est le confort.

L'image fixe a deux inconvénients majeurs : si l'on ne fait pas de rééchantillonnage épipolaire, la parallaxe transversale ne peut être annulée en tout point. Comme le calcul des épipolaires nécessite au moins une orientation relative correcte, on ne pourra pas prendre cette solution dans la phase de calage des couples. De plus, la fenêtre d'affichage est souvent beaucoup plus petite que l'image (environ un million de pixels sur l'écran contre 250 millions pour une photo aérienne). Il va

donc falloir régulièrement décaler la fenêtre écran dans l'image, ce qui gêne considérablement la restitution (l'image disparaît, puis réapparaît à une autre place).

L'image mobile élimine ces deux inconvénients, au prix de contraintes informatiques plus sévères. Pour afficher 200 000 pixels (une fenêtre 500 x 400) 120 fois par seconde (fréquence imposée par la visualisation en alternance de trame), on ne dispose que de 40 ns par pixel. Le temps de lecture ou d'écriture mémoire sur les PC est actuellement de 10 ns (60 ns il n'y a pas si longtemps), et il y a beaucoup d'autres choses à faire... L'informaticien devra optimiser son code!

d) Zoom ou déplacement subpixelaire?

Avec les appareils traditionnels, la mesure de position des points image (la fonction comparateur) et la résolution de l'image (qui reste analogique) ne sont pas liées. Dans un système numérique, il n'en va pas de même : la taille du pixel est à la fois l'unité de mesure des déplacements de l'image et l'unité de résolution.

Or, sur une image argentique, il est bien connu que l'on peut mesurer des points bien définis (des prébalises par exemple)



Fig. 1 - Image initiale

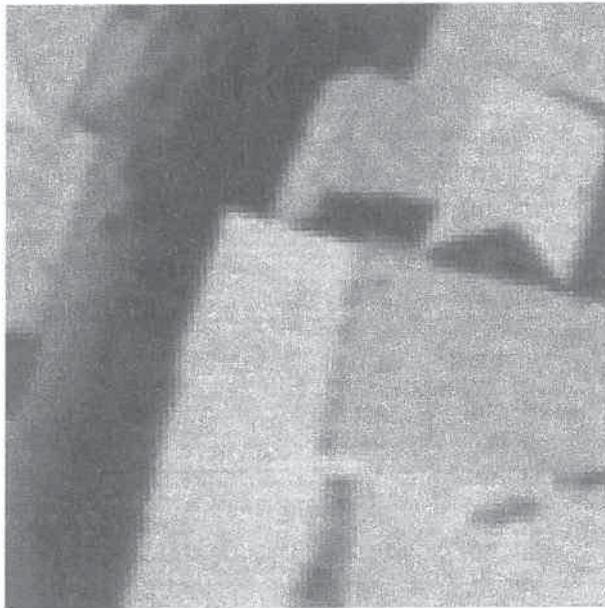


Fig. 2 - Zoom 4 au plus proche voisin

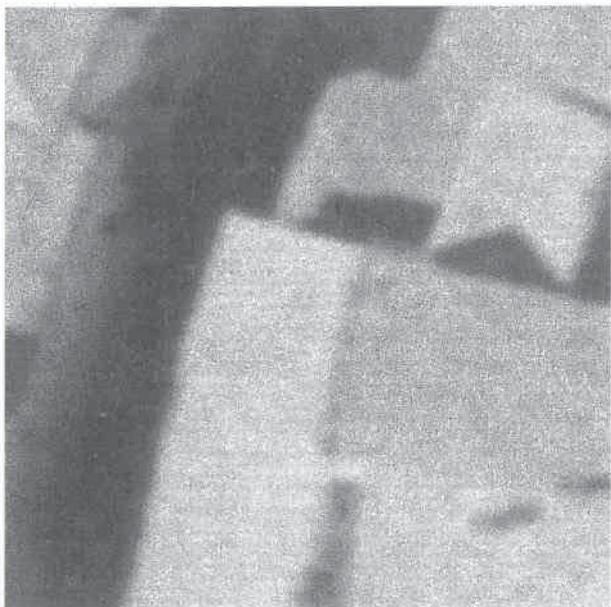


Fig. 3 - Zoom 4 bilinéaire

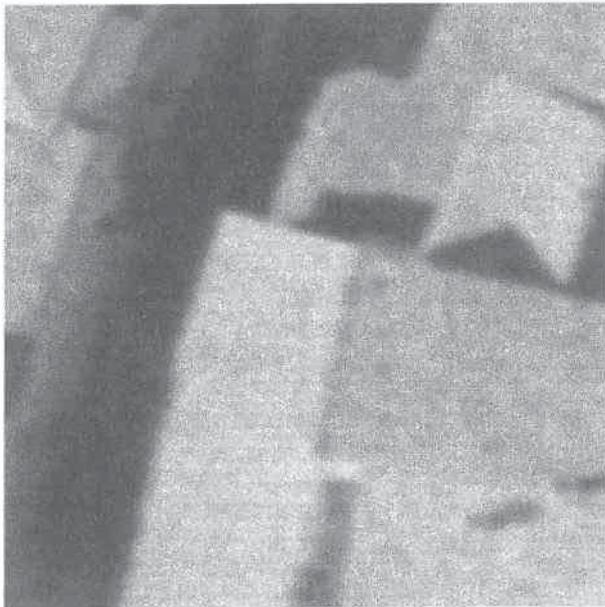


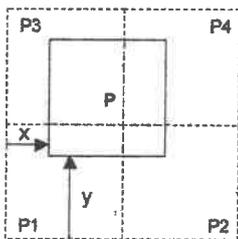
Fig. 4 - Zoom 4 bicubique

avec une précision de quelques microns, alors que la résolution même de l'image est bien moindre (de l'ordre de dix fois). On peut bien sûr numériser les images argentiques avec un pixel de quelques microns, mais avec un pixel de 2 microns, une photo aérienne ferait 10 giga-octets en noir et blanc, et une fenêtre 1000 x 1000 couvrirait un champ de 2 mm par 2 mm. Ce n'est pas bien raisonnable !

Une autre solution est le zoom numérique : on conserve un pas de scannage raisonnable, mais on interpole à l'affichage, de façon à permettre un déplacement plus précis. Malheureusement, en interpolant, on n'invente pas l'information absente, et l'opération, en même temps qu'elle réduit proportionnellement le champ, rend l'image très floue et difficilement inter-prétable. Les quatre images ci dessous correspondent à une fenêtre carrée de 400 pixels de côté. La figure 1 est l'image originale (image argentique aérienne à l'échelle de 117000, numérisée avec un pixel de 20µ, soit environ 15 cm au sol). Les figures 2 à 4 montrent la même zone zoomée d'un facteur 4 (pixel résultant de 5µ), avec une interpolation au plus proche voisin (figure 2), bilinéaire (figure 3) et bicubique (figure 4).

Pour contourner cette difficulté, il existe une autre méthode qui consiste à déplacer les images d'une fraction de pixel. Cela avait déjà été mis en application dans le restituteur Matra Traster T10. Mais la puissance de calcul insuffisante des ordinateurs de l'époque n'avait pas permis une réalisation suffisamment fluide sur toute l'image, et seule la partie centrale de l'image se déplaçait de cette façon. Cette méthode peut paraître surprenante, dans la mesure où l'on considère intuitivement le pixel comme la plus petite entité disponible dans l'image. En fait, le principe en est très simple : le déplacement subpixelaire revient à calculer par interpolation la quantité de lumière qu'aurait reçu le capteur si on l'avait déplacé d'une fraction de pixel. L'image n'étant pas zoomée, l'interpolation bilinéaire est bien suffisante (le plus proche voisin, qui ne déplace pas l'image, est totalement inadapté à ce but). La radiométrie du pixel P, décalé en x et y, deviendra :

$$P = (1-x)(1-y)P_1 + x(1-y)P_2 + (1-x)yP_3 + xyP_4$$



Sous cette forme les PC actuels ne sont toujours pas capables de réaliser l'interpolation en temps réel sur la totalité de l'affichage (rappelons que l'on ne dispose que de quelques cycles mémoire par pixel pour toutes les opérations). Heureusement, pour satisfaire les gourmandises des applications multimédia (surtout les jeux vidéo...), les microprocesseurs Pentium ont été dotés rapidement d'un jeu d'instructions (instructions MMX) permettant de paralléliser (exécuter simultanément une même opération sur plusieurs données) certaines opérations sur les octets. Il n'y figure malheureusement pas de multiplication complète, mais seulement des additions et des décalages (multiplication/division par une puissance de deux).

En prenant un pas de déplacement inverse d'une puissance de deux (1/2, 1/4, ...), et en remaniant la formule pour interpoler d'abord en y, puis en x (x et y sont alors des entiers inférieures à 2^n : le calcul peut être fait sur 8 octets en parallèle, en conservant tous les résultats intermédiaires dans les 8 registres

du processeur MMX (donc sans accès mémoire), et avec les seules instructions disponibles dans ce processeur.

$$P' = \frac{(2^n - y)P_1 + yP_3}{2^n}$$

$$P'' = \frac{(2^n - y)P_2 + yP_4}{2^n}$$

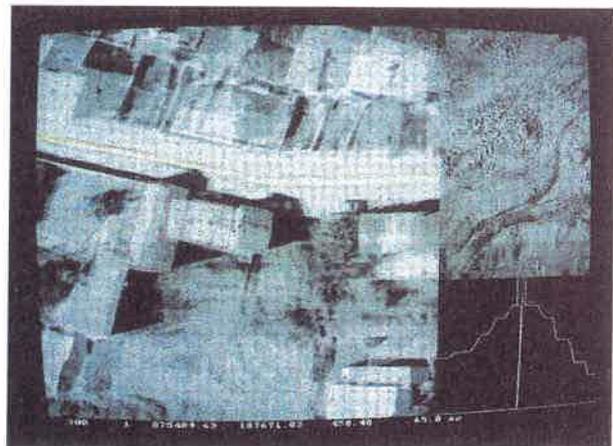
$$P = \frac{(2^n - x)P' + xP''}{2^n}$$

Le temps de calcul est alors de l'ordre d'un cycle mémoire par pixel, ce qui en permet l'utilisation en permanence sans ralentissement de l'affichage. On concilie ainsi la précision du déplacement (actuellement 1/4 de pixel, mais le huitième sera sans doute nécessaire), la conservation d'un champ de vision confortable, et l'absence de flou visible. Le compilateur utilisé (Borland Pascal), antérieur aux Pentium, ne gère bien entendu pas ces instructions, et il a fallu les programmer directement en binaire. Mais le résultat obtenu méritait cet effort.

Qu'apporte le numérique ?

Il aurait été dommage de se restreindre aux fonctionnalités déjà disponibles sur les restituteurs analytiques, même si leur réalisation numérique permet de se passer de tout matériel spécifique, onéreux et lourd. Tout d'abord, le numérique rend très simple l'injection stéréoscopique de la saisie dans le modèle, déjà disponible sur les analytiques, au prix de l'addition de périphériques spécialisés très coûteux. Mais on peut aussi envisager des aides à la restitution tirant parti de la présence de l'image sous forme numérique.

Dans ce domaine, outre les possibilités de traitement radiométrique en temps réel des images, la première idée est d'im-



Visualisation stéréo	Vue générale
	Graphique de corrélation
Affichage des coordonnées	

planter un corrélateur numérique. L'aspect temps réel qu'on a voulu conserver au système empêche d'utiliser les algorithmes les plus courants, qui créent automatiquement un modèle numérique de terrain à partir d'images ré-échantillonnées suivant les épilobaires. Le corrélateur doit pouvoir fonctionner sur des images en géométrie brute et suivre les mouvements de l'opérateur en temps réel. Il fournit en permanence pour une position planimétrique donnée, l'altitude la plus vraisemblable du sol; il s'agit donc d'un corrélateur « en ascenseur », qui recherche le maximum de corrélation sur une verticale donnée. Pour donner une altitude précise, il faut bien entendu lui fournir des images issues du déplacement subpixelaire.

On peut songer à d'autres aides à la restitution, mais les plus prometteuses en terme de productivité sont celles qui relèvent de l'interprétation automatique des images (suivre les routes, extraire les maisons, la végétation...) et qui nécessitent encore des puissances de calcul que nos modestes PC ne peuvent fournir dans des temps raisonnables. Seule l'orientation automatique des modèles par recherche de points d'intérêt devrait être à la portée de ces machines. S'il y a des volontaires...

Et les applications?

Le système n'a pas été développé initialement dans un but de production. Il est aujourd'hui systématiquement utilisé pour l'enseignement de la photogrammétrie, aussi bien à l'ENSG, qu'à l'ESGT ou l'ESPT, de même que dans de nombreuses formations continues. Mais, au fur et à mesure de l'évolution informatique, il est apparu de plus en plus évident qu'il pouvait satisfaire des besoins variés, et même sans doute ouvrir des nouveaux horizons à la photogrammétrie.

a) En cartographie

Les applications actuelles de la photogrammétrie dans ce domaine sont surtout la création et la mise à jour de bases de données géographiques. Aussi est-il apparu intéressant de tester la liaison du Poivilliers E avec un logiciel SIG. Une version client-serveur, liant le restituteur à Geoconcept est en cours de validation par la société 3Dimages, filiale de Geoconcept. Elle devrait être bientôt commercialisée, et permet la création ou la mise à jour directe des données du SIG par photogrammétrie.

Des évaluations doivent également être menées dans un proche avenir pour l'entretien des bases de données et des cartes de l'IGN par les unités régionales. La faiblesse de l'investissement et la simplicité d'emploi sont ici des arguments très forts.



Prototypage de la connexion Poivilliers E - Geoconcept

b) Les autres domaines

La disponibilité d'un restituteur photogrammétrique très bon marché (le Poivilliers E est actuellement mis gratuitement à la disposition des organismes d'enseignement et de recherche) et simple d'emploi permet à la photogrammétrie

de pénétrer des domaines d'application où elle était restée marginale, sinon totalement absente, en raison de la spécialisation et des investissements qu'elle supposait.

Mais il y a une autre raison, plus profonde, à son faible usage par certaines professions : je prendrai l'exemple d'un géotechnicien, qui n'a souvent besoin pour étudier un risque naturel que des coordonnées de quelques points bien choisis (par lui) sur une pente; commander une prise de vue, écrire un cahier des charges de restitution et confier le travail à un entrepreneur de photogrammétrie est pour lui une tâche d'autant plus difficile que seule son expertise au vu des photos lui permettra de sélectionner les quelques données pertinentes. Il est donc bien plus intéressant pour lui de réaliser la totalité des opérations, de la prise de vues à la restitution. Cet inconvénient de la spécialisation des photogramètres a été particulièrement remarquable dans la photogrammétrie architecturale et archéologique (n'oublions pas que la photogrammétrie a été, à ses débuts, développée essentiellement pour des applications terrestres, militaires ou architecturales).

Aujourd'hui, ce handicap peut être surmonté, d'autant plus que la technologie des images numériques permet aussi de résoudre de façon efficace la question de la prise de vue photogrammétrique. On trouve maintenant sur le marché des appareils photographiques numériques d'excellente qualité, qui peuvent servir au photogramètre. En fait, les matériels bien adaptés à nos besoins ne sont pas très nombreux, car nos exigences ne coïncident pas avec celles du marché grand public. Nous voulons une géométrie d'image la plus mieux connue possible (pas de zoom par exemple), et un grand champ (au moins équivalent 28 mm en 24 x 36), alliés à la meilleure résolution possible. J'ai personnellement testé sur un polygone d'étalonnage un modèle du commerce (Minolta Dimage EX Wide 1500) qui combine toutes ces caractéristiques et qui est très bien adapté à la terrestre (même si sa distorsion atteint environ 35 pixels dans les angles de l'image). Pour la photo aérienne, rien n'est vraiment industriellement opérationnel (même si on voit se développer de la photo en drones, en ULM ou en cerf-volant).



Polygone d'étalonnage photographié au Minolta Dimage

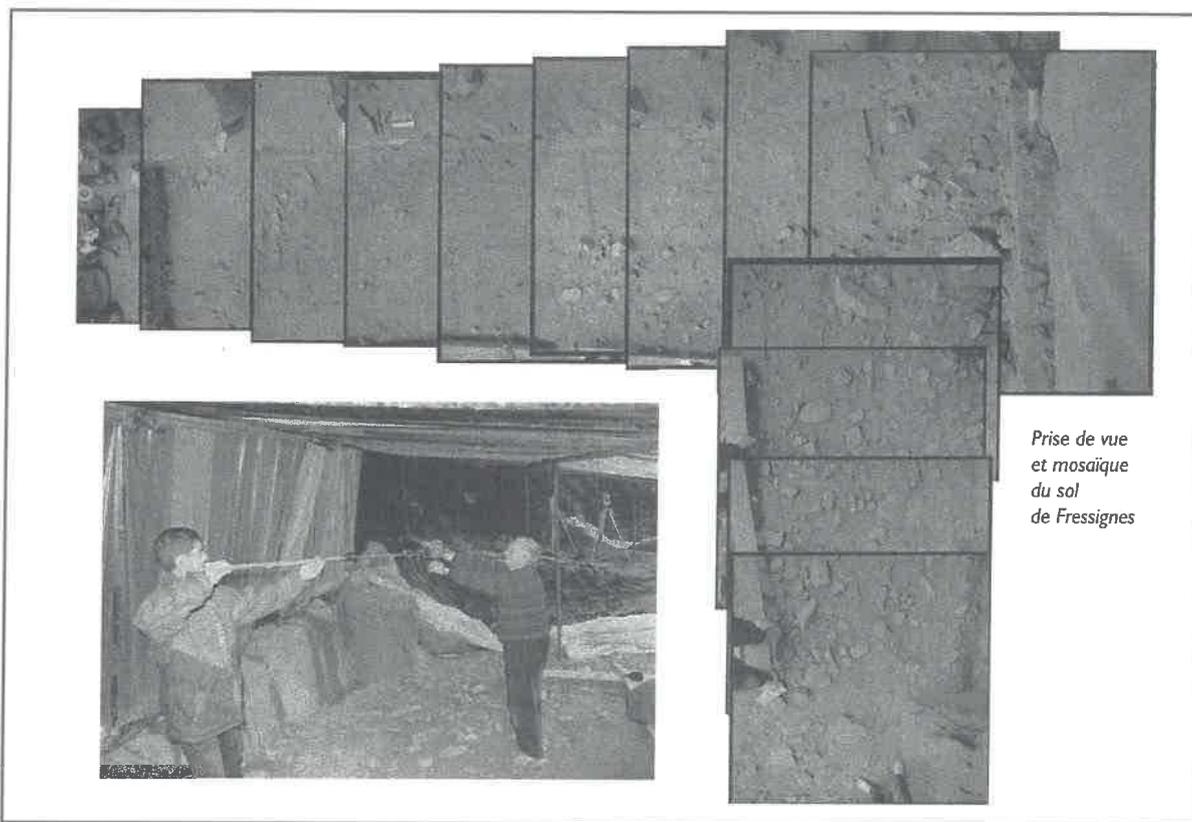
Je ne citerai pas tous les travaux déjà réalisés avec cette technique (qui a servi de support aux stages de fin d'études de plusieurs élèves ingénieurs de l'ESGT), mais, puisque XYZ relate très souvent dans ses colonnes des applications archéologiques (et que je suis moi-même affligé d'un penchant du même style...), je mentionnerai quelques exemples en cours de réalisation dans le domaine de la préhistoire.

En premier, le relevé du sol d'habitat solutréen de Fressignes, dans l'Indre, fouillé par l'équipe du Professeur Denis Vialou, de

l'Institut de Paléontologie humaine du musée d'Histoire Naturelle. Les photos ont été prises avec un Hasselblad équipé d'un objectif de 40 mm, tenu à bout de bras, en une après-midi d'un Dimanche pluvieux, sans interrompre les fouilles plus de deux heures, la stéréopréparation était simultanée, par relevé tachéométrique de quelques cibles posées au sol. Puis aéro-triangulation, restitution par les préhistoriens eux-mêmes, tout cela devant déboucher sur une intégration des objets relevés dans une base de données du sol archéologique.

Enfin, dans le courant de cette année 2000 devrait débiter le relevé volumétrique complet d'une grotte ornée située à mi-distance du Mans et de Laval, à la demande de Romain Pigeaud, jeune préhistorien qui en a fait son sujet de thèse sous la direction de Denis Vialou. En avant-première, j'y ai fait quelques prises de vue stéréoscopiques, assemblées en anaglyphes avec Photoshop. Le relevé proprement dit devrait démarrer dans les jours qui viennent, servant là aussi de travail de fin d'études à deux jeunes ingénieurs de l'ESGT.

Egels@ensg.ign.fr



Prise de vue et mosaïque du sol de Fressignes

RECETTE DE L'ANAGLYPHE À LA MODE PHOTOSHOP

Temps de préparation : 15 minutes

- Prenez une image gauche, scannez la proprement (en couleur de préférence).
- Ouvrez-la sous Photoshop.
- Copiez la délicatement dans un calque neuf, puis mettez de côté le bleu et le vert (menu Image/Réglage/Courbe).
- Procédez de même pour l'image droite, en la copiant dans un second calque, que vous aurez rendu semi-transparent, et retirez cette fois le rouge.
- Annulez la parallaxe à l'aide de l'outil déplacement.
- En cas de gros écart d'échelle ou de rotation entre les images corrigez l'assaisonnement grâce à la transformation manuelle.
- Répétez ces deux opérations jusqu'à ce que la mixture vous semble à point.
- Aplatissez violemment l'image, vérifiez la radiométrie, et enfournez dans l'imprimante.



Jument et mammoth affrontés (Grotte Mayenne-Sciences)