

Techniques de vision par ordinateur appliquées à des images aériennes de zones inondables

Olivier Monga
Mathématicien

Yveline Poncet
Géographe

Les images sont des vecteurs importants d'information. Leur analyse permet aux acteurs de la décision en gestion de l'espace et en aménagement du territoire de localiser les zones d'intérêt et de suivre leur évolution au cours du temps. Les images de la Terre, en prises de vues verticales ou obliques, se caractérisent par la diversité des modalités d'enregistrement (aériennes, satellitaires, multispectrales, radar) et par la masse considérable de données qu'elles représentent. La technologie des capteurs se développant sans cesse, ces deux caractéristiques que sont la multimodalité et la taille des données vont encore s'amplifier. Le problème se pose alors de l'automatisation – ou du moins de la mise en routine – de certaines tâches de repérage et de préparation des images à la phase d'interprétation intelligente. En effet, si l'opérateur humain reste le plus efficace pour l'extraction d'informations qualitatives et sémantiques, il est généralement peu performant pour l'extraction rapide d'informations quantitatives (mesures de superficies, dénombrements d'objets) et pour le traitement géométrique systématique des données (mosaïquage, recalage). Aujourd'hui, des outils de *vision par ordinateur* permettent de confier ces tâches fastidieuses et délicates à l'ordinateur, en réalisant sur les images des opérations d'extraction d'informations pertinentes, selon un mode automatique ou semi-automatique.

Dans le cadre du projet international « Simes »¹ dédié aux sciences de l'information appliquées à l'environnement, il nous a semblé intéressant de tester les possibilités de certains de ces outils récents sur des images du delta intérieur du Niger.

Parmi les informations collectées sur le delta intérieur du Niger figurent différents types d'images, à savoir, d'une part, des photographies de terrain prises au sol, à l'horizontale ou en oblique (*i.e.* depuis un point haut) et, d'autre part, des prises de vues aériennes, qui peuvent elles-mêmes être obliques ou bien verticales. Ces images sont destinées à fournir une vue ensembliste des milieux naturels et construits par l'homme, sous forme de *paysages*. L'organisation du paysage peut en effet être considérée comme un bon indicateur de la dynamique du milieu. De façon opérationnelle, on peut dire que les images vont remplir deux fonctions : *illustrer* à des fins informatives et pédagogiques, puis constituer en elles-mêmes *des bases de données exhaustives*, à partir desquelles des informations peuvent être automatiquement extraites et traitées.

Les photographies aériennes numérisées et les données satellitales numériques sont généralement acquises et conservées pour servir cette deuxième fonction. C'est cet aspect que nous allons illustrer en prenant comme exemple l'extraction de thèmes paysagiques à partir d'images aériennes numérisées.

I Démarche, matériel et objectifs expérimentaux

L'opération réalisée sur le delta malien consistait à transférer une expertise technique relative à la vision par ordinateur vers des applications scientifiques en géographie, halieutique, hydrologie, pédologie, elles-mêmes agissant comme autant de relais en direction des utilisateurs de l'information que sont les décideurs de l'aménagement et les opérateurs du développement. Ces derniers,

¹ « Système d'information multimédia pour l'environnement subsaharien ». Il s'agit du projet Inco DC n° 961620 de la Commission européenne.

on le sait, doivent tenir compte de la diversité géographique des espaces inondables et de leurs multiples modes d'exploitation.

La préparation du transfert d'expertise depuis la « vision par ordinateur » vers des applications a été effectuée à travers les étapes suivantes :

- expression des besoins des utilisateurs d'images ;
- identification des classes d'algorithmes de « vision par ordinateur » susceptibles d'être utiles ;
- détermination de bibliothèques de logiciels libres, récentes et mises à jour correspondant à ces classes ;
- sélection d'algorithmes pertinents par rapport aux besoins des utilisateurs ;
- test de ces algorithmes sur les images du projet.

Concernant le premier point, il s'avère que la demande des utilisateurs (au premier rang desquels figure la recherche scientifique) est de disposer d'outils permettant de traiter de grandes surfaces géographiques (le delta malien s'étend sur plus 30 000 km²), c'est à dire un grand nombre d'images et de fichiers numériques, et/ou de traiter les mêmes espaces de façon récurrente si des enregistrements successifs dans le temps sont disponibles.

Les images traitées sont celles de la couverture aérienne d'une partie du bassin du fleuve Niger, enregistrée en 1973-1974 sous forme photochimique au 1/50 000 par l'Institut géographique national français (IGN). Ces images sont aujourd'hui disponibles sous forme numérisée, avec une résolution spatiale élémentaire correspondant à un mètre carré environ sur le terrain. C'est cette version numérique qui a été acquise par le projet Simes et qui est utilisée dans les expérimentations décrites ci-après.

La première expérimentation a porté sur le repérage de quatre thèmes d'occupation du sol caractéristiques des ressources naturelles présentes dans les zones inondables tropicales et de leurs exploitations. Certains aspects morphologiques de ces thèmes peuvent valablement être considérés comme indicateurs des dynamiques de ces ressources. Ces quatre thèmes sont :

- les aires cultivées en riz ;
- les aires inondées (avec ou sans végétation émergente) et les eaux libres (dépourvues de végétation émergente) ;
- les milieux temporairement émergés, à formations herbacées ;
- les milieux émergés en permanence, à formations végétales ligneuses (arborées, arbustives et buissonnantes).

Les deux premiers de ces thèmes sont directement liés à la présence de l'eau et peuvent donc être considérés comme des « indicateurs paysagiques » *a posteriori* de l'intensité de la crue annuelle. Nous montrons plus loin, à titre d'exemple, un résultat de traitement concernant les espaces cultivés en riz.

La seconde expérimentation a porté sur la réalisation de deux types de recalages géométriques :

- la juxtaposition d'images de zones différentes et connexes, toutes à prise de vue verticale, afin de restituer un espace géographique plus vaste que celui de chaque fichier pris séparément ;
- la superposition d'images concernant une même zone mais issues de points de vue différents, en l'occurrence une vue verticale et une vue oblique enregistrées à des dates différentes.

Ces deux expérimentations sont illustrées dans le présent article. Rappelons que l'un des objectifs généralement attendus de la vision par ordinateur est la construction de modèles numériques de terrain. Cet objectif est difficile à atteindre en zone inondable, par définition dépourvue de relief et dont les micro-reliefs ne sont pas restitués par la résolution spatiale des images stéréoscopiques couramment disponibles (photographies aériennes et satellite Spot²). Cet objectif n'a donc pas été inscrit dans le cadre du programme d'expérimentation.

■ Les algorithmes de vision par ordinateur

Les tâches correspondant aux expérimentations ci-dessus sont réalisées par deux catégories d'algorithmes (voir Horaud et Monga, 1995) :

- la *vision précoce* qui consiste à segmenter les images en zones définies par la distribution des niveaux de gris : détection de contours, extraction de points caractéristiques, partition en régions,

² Les images issues des radars (ERS par exemple) sont prometteuses mais encore peu exploitées sur les zones inondables tropicales ; les enregistrements satellitaires à très haute résolution spatiale sur ces régions ne sont pas non plus couramment disponibles.

segmentation des textures (voir par exemple Armande *et al.*, 1999) ;

– la *vision tridimensionnelle* qui consiste à extraire des informations en trois dimensions (x, y et altitude z) à partir d'images en deux dimensions ; les algorithmes de mosaïquage d'images les plus performants utilisent des méthodes directement issues de la vision tridimensionnelle.

Le projet Simes s'est tourné vers deux plateformes logicielles, *Megawave*³ et *Targetjunior*⁴, qui intègrent de tels algorithmes. Ces deux plateformes en accès libre (codes sources compris) ont été développées par des partenaires du projet Simes (cas de *Targetjunior*) et par des laboratoires partenaires (*Megawave*2).

Targetjunior résulte d'une initiative prise dans les années 1990 par les laboratoires de recherche en vision par ordinateur de l'université d'Oxford (Royaume Uni), de l'Institut national de recherche en informatique et automatique (INRIA-France), de l'université de Louvain (Belgique) et de General electric (USA). Il a été utilisé et développé dans le cadre de plusieurs projets européens (*Esprit*, *Longterm research 23515*, *Inproofs*). Il est maintenu à l'université d'Oxford et à l'université de Louvain et constitue un outil complet, à la fois de démonstration, de développement et d'enseignement.

*Megawave*2 a été développé depuis 1993 par l'équipe de recherche dirigé par J.M. Morel (Ceremade puis Ecole normale supérieure de Cachan, ENS) et constitue une bibliothèque des algorithmes les plus récents de segmentation d'images basés sur les équations aux dérivées partielles (Mumford et Shah, 1990 ; Alvarez *et al.*, 1992 ; Deriche et Faugeras, 1996). Ces algorithmes très performants sont complémentaires des approches que l'on trouve dans *Targetjunior*.

L'ensemble de ces deux logiciels constitue donc un état de l'art logiciel à jour de l'existant en vision par ordinateur, adapté à la réalisation d'un travail expérimental sur les images du delta malien.

³ <http://www.cmla.ens-cachan.fr/Cmla/Megawave/index.fr.html>

⁴ <ftp://ftp.esat.kuleuven.ac.be/pub/psi/visics/TargetJr/>

Résultats expérimentaux

Détection des zones de rizières

On considère que les rizières sont géographiquement définies, de façon nécessaire et suffisante, par la juxtaposition géométrique de segments de droites orthogonaux et quasi orthogonaux et parallèles, qui correspondent aux diguettes qui isolent des « casiers » et empêchent le passage des poissons rizophages. La détermination des secteurs de l'image contenant de nombreux segments de droites orthogonaux ou parallèles permet alors de détecter les zones de rizières.

L'extraction automatique des zones de rizières est réalisée avec *Targetjunior* en appliquant la séquence suivante d'opérations :

- calcul du gradient de l'image par le filtre de Canny (1996) ;
- extraction des maxima locaux de la norme du gradient dans la direction du gradient ;
- seuillage par hystérésis en fonction de la norme du gradient, pour éliminer les points de norme de gradient trop faible ;
- chaînage des points de contour pour obtenir des ensembles connectés de points de contour ;
- approximation polygonale des chaînes de contours.

La vue I-a (figure VI, hors texte) montre l'image d'origine et la vue I-b (figure VI, hors texte) montre le résultat final obtenu par chaînage et approximation polygonale. L'image représente une zone située dans la région de Rogonta (au centre-ouest du delta intérieur du Niger, à l'ouest du Diaka).

Une autre solution pour extraire automatiquement les zones de rizières est d'utiliser l'algorithme de croissance de régions par optimisation fonctionnelle de Mumford et Shah (1990). Le principe de cette méthode est de définir un partitionnement de l'image qui minimise un critère composite : celui-ci comprend l'addition d'un terme définissant l'homogénéité des régions (somme des écarts quadratiques à la moyenne) et de la somme des longueurs des frontières (multiplié par un paramètre λ).

Mosaïquage : obtenir une image d'ensemble à partir de plusieurs images homologues

On a ici pour point de départ neuf clichés aériens IGN de 1973 numérisés, constituant une bande Est-Ouest sur la région de Rogonta située à proximité de la bordure ouest du delta et du cours du Diaka, le principal défluent du Niger.

Tous les fichiers d'origine présentent les mêmes caractères géométriques et numériques (dimensions, déformations⁵, teintes de gris). On cherche à obtenir une seule image à partir du rapprochement puis du raccordement « optimal » de ces fichiers. Les algorithmes mis en œuvre s'appuient sur les modules de *Targetjunior* : détection de points caractéristiques par la méthode de Harris, mise en correspondance par des techniques robustes et calcul de la meilleure homographie, puis réalisation de l'image unique d'ensemble dite « mosaïque ».

La figure 1 montre cette mosaïque. On a souligné en blanc le cadre des images d'origine.

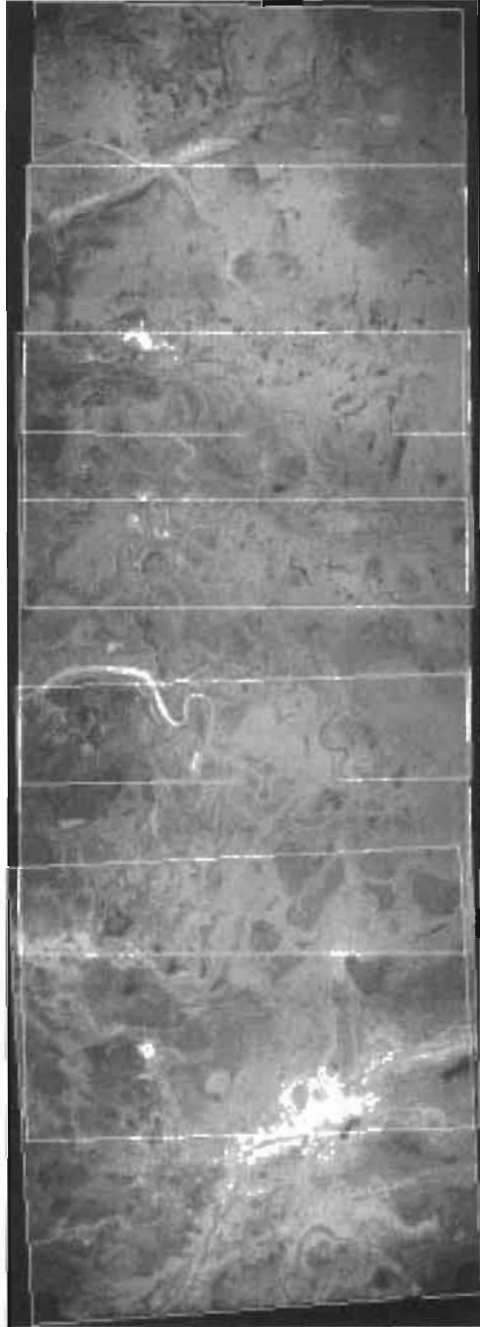
La plupart des traits hydrographiques (chenaux et mares) y sont repérables par leur forme (linéaire et sinueuse, ovoïde) davantage que par leur teinte. En effet, les eaux peu profondes et turbides présentent des teintes de gris voisines de celles des aires émergées sableuses d'origine alluvionnaire. L'ensemble restitué montre la grande variété des milieux dans la région précitée, sur une bande large d'une vingtaine de kilomètres et qui s'étend sur 45 kilomètres environ d'ouest en est.

Mosaïquage : recalage d'une image oblique dans une image homologue

Il s'agit là d'un tout autre type de mosaïquage puisque les deux fichiers qui vont être intégrés l'un à l'autre ont des origines et des caractéristiques tout à fait différentes : dates et angles de prise de vue, caractéristiques numériques, étalement des teintes de gris.

⁵ Chaque fichier a cependant des valeurs de déformation différentes puisque chaque cliché est enregistré indépendamment.

Figure 1
Obtention d'une
image d'ensemble
par mosaïquage
à partir
de plusieurs images
homologues
(région de Mopti,
Mali).



Pour illustrer ce second type de mosaïquage, on présente un cas de traitement réalisé à partir d'un fichier image correspondant à une vue verticale issue de la couverture IGN de 1973 (figure 2).



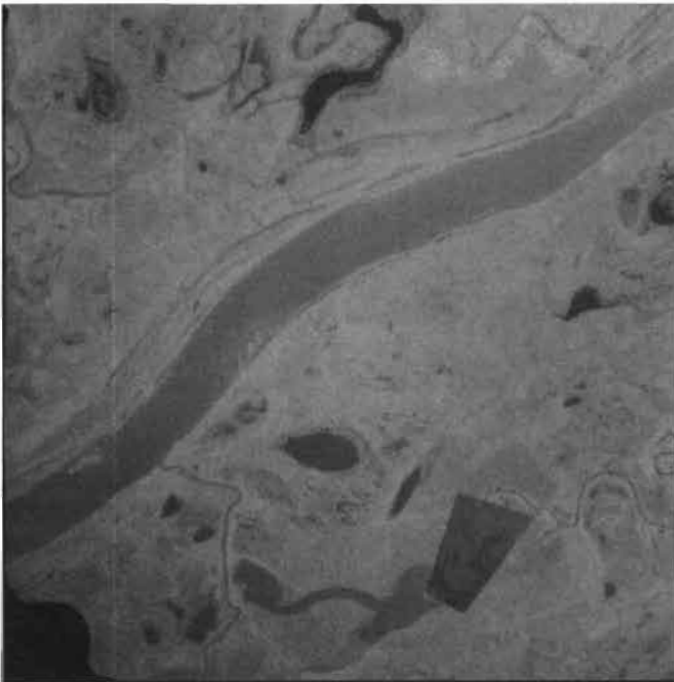
■ Figure 2
Vue verticale de la zone de Batamani (région de Mopti, Mali)
obtenue lors de la couverture IGN de 1973.

Vingt-quatre ans plus tard, un survol aérien de la même zone a été effectué à bord d'un aéronef banal, et l'on a pu réaliser à cette occasion une prise de vue oblique (figure 3). L'objet qui figure sur cette vue – une petite mare et son environnement – est ensuite replacé de façon exacte et précise par recalage dans le premier fichier bien antérieur (figure 2).

La figure 4 présente le résultat obtenu. Cette manipulation est réalisée par un algorithme récemment mis au point à l'université d'Oxford (Hartley et Zisserman, 2000).



■ Figure 3
Photographie aérienne oblique d'une petite mare
dans la zone de Batamani, prise en février 1997.



■ Figure 4
Recalage de la mare photographiée récemment en vue oblique
(de la figure 3) dans la vue verticale ancienne (de la figure 2).

I Discussion et perspectives

Les expérimentations réalisées ont permis de tester la faisabilité de traitements automatiques susceptibles d'être appliqués à un grand nombre de fichiers images et de fournir des produits fiables rapidement.

L'extraction automatique du thème *rizières* a donné des résultats fiables qui offrent des perspectives d'utilisation très intéressantes en exploitation diachronique, c'est-à-dire en effectuant des comparaisons du même milieu à des dates différentes. Il faut en effet rappeler que la dynamique de l'eau conditionne dans une très large mesure la dynamique des activités de production agricoles et le degré de réussite des campagnes annuelles.

L'extraction des deux thèmes qui correspondent aux milieux émergés (non traités ici) avec la même séquence de procédures n'a pas donné des résultats entièrement satisfaisants. L'hypothèse qui a donné lieu au choix de la séquence de traitement ne semble pas valide dans ce cas. La texture des unités spatiales, qui correspond au pointillé de la végétation ligneuse, n'est ni réellement homogène ni réellement régulière sur des superficies de l'ordre de plusieurs hectares. Des algorithmes de reconnaissance de textures (points et taches) seraient probablement plus performants que les algorithmes testés ici, qui sont basés sur l'identification des frontières.

Les deux expérimentations de mosaïquage et recalage se sont révélées particulièrement fructueuses. La première opération (raccordement d'images verticales de même origine) a testé une procédure performante qui permet d'obtenir rapidement des fichiers images numériques sur des espaces géographiquement significatifs. Ces espaces de plusieurs centaines de km² (soit l'équivalent de deux ou trois communes rurales de taille moyenne juxtaposées) correspondent à l'échelle des opérations d'aménagement du territoire. De plus, la finesse de résolution spatiale des documents d'origine a été conservée.

La seconde opération de mosaïquage ouvre de grandes possibilités pour la mise à jour des informations spatiales. En effet, une couverture aérienne exhaustive en vue verticale, telle que celle réalisée par l'IGN au début des années 1970, est très onéreuse et ne

peut donc pas être fréquemment reconduite. Cependant, il est tout à fait possible d'organiser des survols photographiques fréquents sur des zones limitées, surtout si l'on se contente d'un aéronef ou d'un aérostat léger (ULM, ballon) et que l'on n'exige pas de dispositif de contrôle précis (angle, altitude) de la prise de vue. Dans un tel contexte, le procédé de recalage décrit ci-dessus permet de produire une information spatiale qui bénéficie d'une part de la qualité géométrique propre à la couverture photographique verticale originelle, d'autre part d'une fréquence d'actualisation élevée autorisée par le faible niveau de moyens nécessaires pour réaliser les nouvelles prises de vue. Une telle stratégie sera particulièrement adaptée pour la mise en place de suivis temporels sur des zones limitées présentant un intérêt particulier, telles que des rizières aménagées ou des réserves naturelles, et pour exploiter, dans un avenir pas trop lointain, les données fournies par les enregistreurs satellitaires à haute résolution spatiale. Les scientifiques, les opérateurs du développement et les décideurs pourront alors disposer d'une plus grande quantité d'informations récurrentes issues des images, en particulier sur les zones inondables, souvent difficiles d'accès.

Bibliographie

Alvarez L.,
Lions P. L., Morel J. M., 1992 –
*Image selective smoothing
and edge detection using
deformable models.*
IEEE Transactions, PAMI,
November 1992.

Armande N., Montesinos P.,
Monga O., Vaysseix G., 1999 –
Thin nets extraction using
a multi-scale approach.
CVGIP, *Image understanding*,
73 (2) : 248-257.

Canny J. F., 1996 –
*A computational approach to edge
detection.* IEEE Transactions, PAMI,
November 1996.

Deriche R., Faugeras O., 1996 –
Les EDP en traitement des images
et vision par ordinateur.
Traitement du Signal, 13 (6).

Hartley R., Zisserman A., 2000 –
*Multiple view geometry in computer
vision.* Cambridge University Press.

Horaud R., Monga O., 1995 –
*Vision par ordinateur, outils
fondamentaux.*
Paris, Hermes,
série Informatique, 330 p.

Mumford C., Shah R., 1990 –
Boundary detection
by minimizing functionals.
T-PAMI, 12 : 1009-1017.