



## **Archéologie et géomatique : télédétection de données archéologiques à l'aide d'un paramoteur radiocommandé.**

***Bruno Bertin, Archéologue, doctorant, UMR 5138, Université de Lyon II, Lyon, France***

Les besoins en imageries aériennes sont en constante évolution, tant dans les volumes d'images analysées que dans la multiplicité des domaines d'applications qui y recourent. Cette documentation est devenue un instrument de travail fréquemment utilisé et performant dans de nombreuses problématiques des sciences de la terre et de l'homme. Plus spécifiquement, dans le cadre de travaux archéologiques, les images aériennes permettent avec efficacité d'aborder et d'envisager le site dans une perspective spatiale et dynamique. La représentation visuelle la plus fine possible des sites, des objets et des milieux étudiés ayant toujours été une des préoccupations des chercheurs. Le développement de ressources que l'on pourrait qualifier de grand public comme « Google Earth » ou bien encore la dernière version du « Géoportail » de l'Institut Géographique National à mis à disposition du plus grand nombre les outils nécessaires à la visualisation d'images verticales. Ces images satellites et aériennes actuellement disponibles permettent une large gamme d'utilisation de ces supports mais à des coûts extrêmement variables. A cette contrainte initiale s'ajoute celles de l'emprise au sol, de la résolution, de la fréquence de passage et de la pérennité des données. Parallèlement à cette offre initiale, de nouvelles plates-formes aériennes d'acquisition de clichés photographiques haute résolution basse altitude se sont développées, comme par exemple avec la technologie du drone.

La présente communication s'intéressera aux premiers résultats obtenus grâce à un paramoteur radiocommandé, petit support aérien lent, le drone PIXY. Notre recherche, qui porte sur l'évolution des structures architecturales de défense dans l'ancienne province du Bourbonnais entre le XI<sup>e</sup> et le XVI<sup>e</sup> siècle, avec pour cadre géographique les limites de l'actuel département de l'Allier, mêle à la fois des contraintes purement formelles de localisation des sites et de normalisation de la documentation tout en incorporant des contraintes dynamiques et spatiales de d'évolution du bâti castral sur ce vaste territoire de 7 340 km<sup>2</sup>.

### **Utilisation du paramoteur radiocommandé**

Ce petit paramoteur radiocommandé, développé par le centre de Montpellier de l'Institut de Recherche et de Développement dans les années 1998-2001, est actuellement commercialisé par une société implantée dans le sud de la France. Trois grandes caractéristiques avaient à cette époque orientées le projet.

Tout d'abord, le drone devait être disponible, c'est-à-dire qu'il fallait s'affranchir autant que possible du recours incontournable à un pilote chevronné et breveté, néanmoins indispensable en aéromodélisme classique. Pour cela, le pilotage du paramoteur est relativement simple, presque rudimentaire. Ensuite, la sécurité devait être une préoccupation majeure. En effet, l'aéronef devait permettre certaines erreurs de pilotage sans mettre en péril le matériel embarqué. Sa relative lenteur dans les différentes phases de son évolution, son inertie en vol devant lui permettre un vol « sécurisant », renforcé par le système pendulaire du dispositif et par la voile de type parapente. La mobilité est un atout majeur de cette plate-forme aéroportée car sa petite taille, sa faculté à pouvoir être démonté rapidement et surtout motorisé avec un carburant commun, en font un outil à l'aise sur de très nombreux terrains. Ainsi, le drone Pixy, par ces caractéristiques spécifiques comme le pilotage simple, sans brevet, à la portée du grand public, dont la mise en œuvre est rapide, robuste et d'un encombrement réduit, permet d'embarquer en sécurité 4 à 5 kg de matériel photographique ou divers autres capteurs.

L'aéromodèle est équipé d'un moteur thermique de 26 cm<sup>3</sup> – 4.0 CV de la marque Zenoa couplé à une hélice bipale en bois ou en résine. Il possède une voile tubulaire à caisson, de type parapente, reliée au châssis par des suspens. Comme il décolle comme un avion, quelques mètres de roulage suffisent pour qu'il puisse s'envoler. La réduction des gaz limite la montée en altitude et une

commande proportionnelle droite ou gauche permet de contrôler la direction. La descente a lieu par réduction des gaz ou coupure du moteur, l'appareil planant alors comme un parachute dirigeable et se pose à une vitesse toujours réduite, inférieure à 0,8m/s. Vecteur léger – il ne pèse que 6kg à vide-, il bénéficie toutefois d'une autonomie appréciable de 70 minutes de vol avec seulement 1L de carburant. Son rayon d'action initial d'une distance de 800 m peut être porté à 1,6 km lorsque l'on dispose d'un seul point de pilotage et que l'on garde une visualisation directe sur l'appareil. La charge utile d'environ 4 à 5 kg, composée de différents capteurs, est placée à l'avant de la nacelle. Sa faible vitesse de vol, de l'ordre de 15 à 35 km/h, permet d'acquérir des clichés de haute résolution et de grande qualité. Le capteur utilisé est un appareil photo numérique semi-professionnel CANON avec une focale de 35 mm. Afin d'optimiser les temps de survol, le drone est équipé d'un dispositif GPS qui permet de contrôler de façon approximative son altitude de vol, sa vitesse et surtout sa trajectoire. En plus de la prise de clichés, le capteur numérique assure aussi le retour visuel des zones survolées par le biais d'un écran de contrôle au sol. Ce système permet ainsi de visualiser, en temps réel, que l'emprise des acquisitions au sol correspond bien à l'objet d'étude.

### **Les données acquises par le drone**

La majeure partie des données acquises par le paramoteur consiste en une série de clichés d'orthophotographies, dont les qualités se rapprochent d'autres plates-formes de gamme de restitution proche, c'est-à-dire celles de la Très Haute Résolution (THR). Le drone évoluant à une altitude plus basse que les autres vecteurs (avions, satellites ...), comprise entre 50 et 300 m, il produit ainsi des images à très haute résolution, variables cependant selon les capteurs optiques embarqués. Cependant, l'atout majeur du dispositif demeure sa capacité à pouvoir offrir une vraie résolution centimétrique. Cette dernière permettant tous les emboitements d'échelles possibles. Le drone est destiné en priorité aux prises de vues aériennes à très basse altitude, à la télédétection rapprochée ce qui lui permet de collecter de données aux échelles parcellaires et intra parcellaires. Pour notre problématique, cela nous offre la possibilité de combiner une lecture fine du plan des structures identifiées et repérées avec une analyse du paysage environnant généralement très révélateur des contraintes initiales du site.

Pour les plateformes à résolution plus faibles comme le satellite mais aussi l'avion, l'individualisation des certaines données devient impossible, ce qui limite la portée d'une telle documentation, malgré un travail sur un secteur géographique aussi vaste qu'un département par exemple. Cette notion d'échelle spatiale à couvrir est déterminante dans le choix d'une image. Avec une largeur de fauchée ou de passe de plusieurs kilomètres, l'avion IGN peut couvrir en un seul passage l'ensemble d'un site ainsi que sa périphérie. Avec les vecteurs spatiaux, on peut espérer couvrir l'ensemble d'un ou plusieurs découpages anciens comme par exemple les fiefs, les seigneuries ou bien encore les châtelainies. En revanche, avec le drone, la technologie limite à 200 m en moyenne, l'emprise latérale du linéaire au sol pour une séquence de clichés photographiques. Bien sûr, l'altitude, les capteurs embarqués sont autant de facteurs déterminants dans cette couverture limitée. Mais ces contraintes inhérentes aux spécificités du pilotage de l'aéromodèle contribuent aussi à la précision et l'efficacité de la télédétection des informations sur un site archéologique.

La fréquence des images pouvant être acquises au cours d'une année est un facteur déterminant dans les objectifs de notre travail de recherche. Confrontés à un patrimoine très fragile, dont la pérennité semble difficilement assurée, une partie des structures identifiées sur lesquelles nous travaillons consiste en une série de mottes castrales dont les plates-formes fossoyées ou non résistent très mal à l'érosion mécanique ainsi qu'à la pression agricole. Inexorablement, cette architecture de terre est détruite. Il convient alors d'enregistrer méthodiquement les vestiges encore en place tout en continuant le travail de prospection afin d'alimenter un corpus riche d'environ 7000 structures pour le seul département de l'Allier. Cette concentration, unique en Europe, permet l'élaboration d'une méthodologie spécifique quant à la collecte de données archéologiques et dont le paramoteur permet d'assurer avec succès celle des clichés photographiques, fréquemment, au fil des saisons et de conditions météorologiques propices.

De la même façon, cette méthodologie peut être appliquée avec efficacité à l'étude des sites castraux de pierre. Là encore, nous disposons d'un patrimoine très dense (2<sup>ème</sup> département français après la Dordogne) sur lequel nous disposons de très peu d'études archéologiques. De nombreux édifices, passablement ruinés, se dégradent au fil des saisons sans que l'on puisse récupérer, à moindre coût,

les informations minimales à la production d'un plan normalisé. Les campagnes de relevés traditionnels *in situ* se révèlent alors très laborieuses et surtout consommatrice de temps-homme. Le besoin de caractérisation s'exprimant alors dans le cadre de cette étude à la fois en termes de thématiques (signification de l'objet ou du fait archéologique observé), de géométrie (dans les 3 dimensions, X, Y et Z) et de temporalité (par la fréquence des mises à jour). C'est plus spécifiquement sur ce dernier point que l'acquisition d'orthophotographies à l'aide du paramoteur se révèle judicieuse. En effet, la réactivité du drone permet d'accroître de façon substantielle la fréquence des images pouvant être acquises au cours d'une année, d'une mission, ou bien encore d'un chantier. C'est bien là un facteur important qu'il convient de considérer à juste titre. Le retour plus ou moins fréquent sur l'ensemble des sites inventoriés est très exigeant en temps. En fournissant une observation rapide à un prix modeste sur de larges zones, la télédétection constitue un moyen privilégié d'acquisition de données pour venir compléter les mesures de terrain

Les images aériennes vendues par l'IGN, dont l'échelle de couverture représente l'ensemble du territoire français, ne propose que des passages quinquennaux dans la plupart des cas ou bien sur commande mais à des prix prohibitifs. A cette première contrainte s'ajoute celle que l'on pourrait qualifier « d'incidents d'enregistrements » comme les masques nuageux présents sur certaines parties de clichés. Ce risque, qui n'est pas négligeable, peut être aisément contourné car le drone vole généralement en dessous de la couche nuageuse. Ainsi, le facteur limitant dans le choix d'acquisition d'une image aérienne demeure principalement son coût. Afin de pouvoir comparer de façon équivalente les différentes techniques, il conviendrait de rapporter le prix d'une image au km<sup>2</sup>. Toutefois, ce rapport serait peu représentatif de l'ensemble des données ou des informations que peut apporter une seule image au regard des contraintes techniques inhérentes à son acquisition. En effet, plusieurs paramètres diffèrent en fonction de la problématique et de la taille de l'objet à étudier : la résolution attendue, la fréquence de passage sur zone, l'emprise au sol et le choix du type des capteurs, qui sont autant de variables à intégrer dans cette opération. Le choix d'un référentiel de comparaison s'est donc porté sur le coût minimal pour l'acquisition d'une image. Comme le prix d'une image est proportionnel à la résolution du support, il apparaît alors clairement que le drone est sensiblement plus onéreux par rapport aux autres vecteurs à superficie égale, dans un rapport de 1 pour 10<sup>1</sup>. En revanche, cette technologie se révèle particulièrement compétitive pour des aires d'études restreintes, ayant de faibles périmètres, et dans l'optique de spatialiser les données archéologiques à l'échelle centimétrique ou décimétrique.

### **La méthodologie de terrain**

Le site sur lequel nous avons choisi d'opérer afin de valider le protocole terrain d'acquisition est globalement représentatif des conditions dans lesquelles nous intervenons pour mener à bien ce travail de relevés photographiques. Cette zone test, d'environ 9 hectares, correspond au site de Montcoquier, situé à l'ouest sur le territoire de la commune de Monétay-sur-Allier (Allier). Le château s'élève sur une butte calcaire dont on peut supposer autrefois qu'il était entouré par les étangs et les eaux du ruisseau de La Salle. Dominé au sud par une colline qui descend jusqu'à un fossé sec, la structure castrale repose sur une plateforme artificielle visible jusqu'au pied du donjon quadrangulaire. La première enceinte, qui formait ainsi la basse-cour, au nord, est occupée par des communs fortement ruinés. La deuxième enceinte forme un quadrilatère régulier, fermé au sud par un épais donjon. L'aménagement d'un logis à trois niveaux sur cave au 15<sup>e</sup> siècle parachève l'occupation occidentale du site. L'angle nord-est étant quand à lui réaménagé en châtelet d'entrée avec herse. Le reste de l'espace du côté oriental était réservé en une terrasse haute sur laquelle ouvrait le logis. Présenté bien souvent comme certainement l'un des plus anciens édifices castraux de l'Allier, il reste toutefois très mal connu par manque de documentation le concernant directement. Son éloignement des principaux axes de communication n'a pas pu lui permettre de pérenniser de noyau de peuplement spécifique. De plus, dès le 13<sup>e</sup> siècle, il perd beaucoup de son intérêt stratégique car on assiste à une stabilisation territoriale sur le secteur. Le recours à l'orthophotographie se prêtait donc tout à fait à l'enrichissement d'une documentation historique et archéologique somme tout assez pauvre.

La mission photographique s'est déroulée au mois de mai 2006, avec le concours technique d'Olivier Barge, ingénieur d'étude au service cartographique de la MOM (Maison de l'Orient et de la Méditerranée) et de Séverine Sanz, sa collaboratrice. Les conditions météorologiques ne se prêtaient pas, à priori, à la pleine réussite de la mission. En effet, la couverture végétale était en pleine

croissance et pouvait laisser craindre que des masques de végétation perturbent la lisibilité des structures survolées. Il n'en fut rien et l'heure relativement tardive de la mission, en fin de journée, par le jeu des ombres portées, souligne avec une relative efficacité le modelé du terrain. La prise de vue est organisée par passages successifs sur la zone d'étude afin d'obtenir les clichés nécessaires pour le recouvrement du site. L'altitude de prise de vue est de l'ordre de 100 à 200m au dessus du sol, à une vitesse réduite ce qui permet d'obtenir des images nettes et précises. Dans notre cas, avec un capteur numérique de 10 millions de pixels nous avons pu obtenir une résolution au sol inférieure à 10 cm.

Notre objectif étant la restitution des données architecturales et archéologiques, mais aussi celles du relief, nous sommes employés à concevoir une mosaïque orthorectifiée du site permettant une visualisation directe de l'ensemble de ces différentes couches d'informations. Comme pour toutes prises de vues aériennes à partir d'un vecteur aérien, l'optique des capteurs induit des déformations géométriques dont l'origine est double. En premier lieu, l'optique génère une déformation due à la forme lenticulaire des objectifs. La seconde déformation est quant à elle induite par le sol lui-même. En effet, la rotondité naturelle de la terre entraîne une déformation d'autant plus grande que le capteur se trouve éloigné du sol. Afin de minimiser ces distorsions et de pouvoir rectifier et géoréférencer les images acquises par le paramoteur, des points de repères sont nécessaires sur le site. Idéalement, des mires ou balises facilement identifiables sur les clichés sont disposées sur l'ensemble de la zone de couverture photographique. Dans le cadre de ce test, nous avons préféré opter pour la possibilité offerte par un certain nombre de points de calage liés à l'architecture et parfaitement connus en (X, Y, Z). Ces points se présentant plus comme des points d'amer. Après acquisition des coordonnées de ces points par DGPS (Differential Global System Positioning), nous sommes en mesure de faire le lien entre le sol et l'image. Toutes les images de la séquence sont alors rectifiées et sont assemblées pour ne former qu'une seule et même image : une mosaïque de photographies orthorectifiées. Des zooms permettent d'apprécier la qualité des détails et des différentes possibilités ainsi offertes par cette technique.

## **Conclusions et perspectives**

Ce travail s'inscrit dans une démarche qui vise à poser les enjeux méthodologiques d'un travail à plus grande échelle qui a pour objectif principal la mise en place d'un référentiel typo-chronologique sur l'ensemble du département de l'Allier. Les très nombreuses structures architecturales de défense visibles sur ce vaste espace géographique nous obligent à repenser les procédures permettant d'aborder la délicate phase de datation. Dans cette perspective, le plan intervient comme un préalable nécessaire à ce travail, comme l'élément incontournable sur lequel seront fondées les différentes hypothèses chronologiques. De ces premières campagnes d'acquisition de photographies aériennes par drone, nous avons pu tirer les enseignements sur l'intérêt substantiel pour la compréhension et l'analyse des données archéologiques et architecturales, sur l'estimation chiffrée des niveaux de précision à attendre et sur les voies d'amélioration possibles en ce qui concerne l'acquisition et le traitement afin d'améliorer cette précision. Rappelons que la prise de photographies aériennes par drone est aisée et surtout très rapide, même sur des secteurs relativement peu accessibles. Le seul facteur limitant étant une vitesse de vent supérieure à 25km/h au sol. La faculté de pouvoir revenir sur le site à intervalles réguliers ouvre la voie à un suivi temporel et à la création d'archives objectives et très précises sur les caractères spatiaux de la zone.

En attendant de nouveaux développements méthodologiques pour extraire l'ensemble des informations et améliorer leur restitution, on ne peut que rester confiant mais réaliste en même temps sur les possibilités d'utilisation multiples et variées qu'offrent les images prises par le paramoteur Pixy. Il faut néanmoins garder à l'esprit que la prise de photographies aériennes à basse altitude ne peut concerner qu'un territoire restreint. En offrant la possibilité d'une observation détaillée, l'utilité de telles images se situe au plan du relais qu'elles peuvent offrir entre la collecte d'informations locales *in situ* et la possibilité d'élaborer une documentation riche et variée qui puisse jouer un rôle majeur dans l'analyse de données archéologiques plus ou moins complexes.

## Bibliographie

Raclot D., Puech C., Mathys N., Roux B., Jacome A., Asseline J., Bailly JS (2005) : - *Photographies aériennes prises par drone et modèles numériques de terrain : apports pour l'observation de Draix – Géomorphologie : relief, processus, environnement n°1 : 7 – 20 - 2005.*

Toutin T. (2004) – *Photogrammétrie satellitale des capteurs de haute résolution : états de l'art – Bulletin de la Société française de Photogrammétrie et de télédétection 175 (3) : 57-68 - 2004.*

Asseline J., De Noni G., Chaume R. (2000) – *Note sur la conception et l'utilisation d'un drone lent pour la télédétection rapprochée – Photo interprétation, images aériennes et spatiales, 37, Editions ESKA, paris, 3-9 ; 42-47.*

Muraz J., Durrieu S., Labbé S., Andréassian V., Tangara M. (1999) – *Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG ?- ingénieries EAT, 20, 39-58.*

Kraus K., Waldhausl P. (1998) -*Manuel de photogrammétrie : principes et procédés fondamentaux. Translated by P. Grussenmeyer et O. Reis, paris, Editions Hermès, 407 p.*

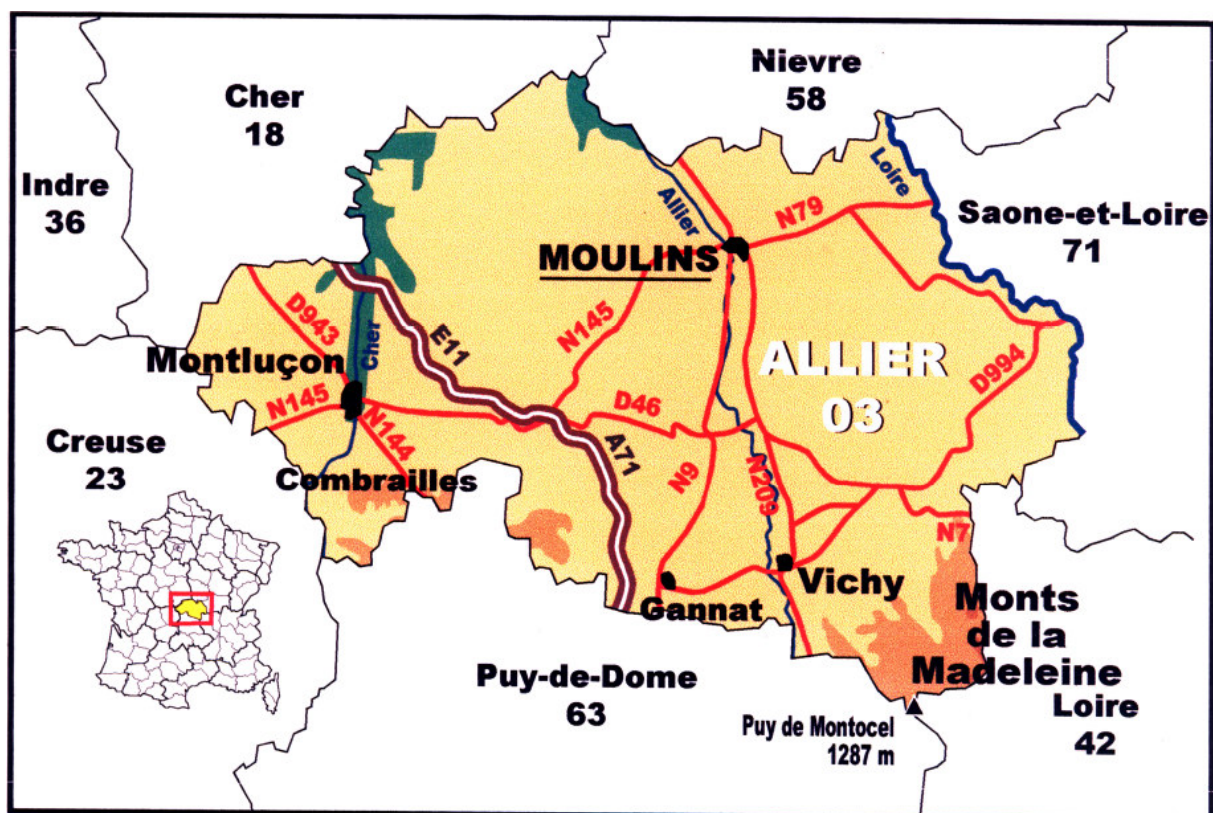




Fig. 1 : Le Pixy





Fig. 2 b: vue du site



Fig. 2 c: zoom sur le château



Fig.3 : Plan restitué d'après la mosaïque

