

JULIEN BECK, ATHOS AGAPIOU, PATRIZIA BIRCHLER EMERY, DRAGOS CONSTANTIN,
VASILIKI LYSANDROU, BERTRAND MERMINOD, KYRIAKOS THEMISTOCLEOUS

TÉLÉDÉTECTION DE SCORIES PAR IMAGERIE HYPERSPECTRALE
À KATALIONDAS *KOURVELLOS* (CHYPRE): PREMIERS ESSAIS

TÉLÉDÉTECTION DE SCORIES PAR IMAGERIE HYPERSPECTRALE À KATALIONDAS *KOURVELLOS* (CHYPRE): PREMIERS ESSAIS

Julien Beck, Athos Agapiou, Patrizia Birchler Emery, Dragos Constantin, Vasiliki Lysandrou, Bertrand Merminod, Kyriakos Themistocleous

En préparation à un projet de recherche visant à repérer des scories depuis les airs à Chypre, une courte campagne d'essais a eu lieu à l'été 2015 dans la région d'Ayia Varvara – Mathiatis – Lythrodontas, au centre de l'île¹. Les résultats provisoires en sont présentés ici.

Une problématique particulière

Le site de Kataliondas *Kourvellos*, à la base d'un piton rocheux visible loin à la ronde, se trouve dans les contreforts du Troodos, à une vingtaine de kilomètres au sud de Nicosie.

L'Université de Genève y a mené deux campagnes de fouille en 2010 et en 2011², suivies de trois campagnes d'étude du mobilier archéologique au Musée de Chypre en 2012, 2014 et 2015, en vue de la publication finale des résultats.

Ces travaux ont permis d'établir que le site avait été occupé à deux reprises: une première fois au 8^e millénaire avant l'ère chrétienne (Néolithique précéramique), et une seconde fois au 4^e siècle avant l'ère chrétienne (période chypro-classique).

Lors de cette dernière occupation, le site fonctionne comme sanctuaire rural. Quelle est la raison d'être d'un sanctuaire à cet endroit? Kataliondas *Kourvellos* se trouve à mi-chemin entre les villes antiques de Tamassos et d'Idalion – s'agit-il de marquer la frontière entre ces deux

cités-royaumes? Par ailleurs, le site est au cœur d'une région riche en activités minières et métallurgiques, active depuis l'Âge du Bronze jusqu'au XX^e siècle – se pourrait-il que le sanctuaire soit lié à l'extraction, la réduction et/ou le transport du cuivre ou d'autres métaux? Un des moyens de le confirmer serait de trouver des scories en nombre suffisant, correspondant à des activités de réduction, aux abords du site (leur présence sur place, quoiqu'en quantité limitée, a déjà été relevée par Buchholz et Ender³). Notre compréhension de Kataliondas *Kourvellos* à la période chypro-classique, voire du lien entre religion, économie et société à cette époque, s'en trouverait sensiblement améliorée.

Le choix de la technique et les spécificités de son utilisation

La prospection au sol serait le moyen traditionnel de chercher des scories aux environs de Kataliondas *Kourvellos*. En effet, la prospection aérienne classique, même à basse altitude, ne permet généralement pas de repérer ces objets de petite taille (quelques centimètres en moyenne) et de couleur sombre. Cependant, la télédétection par imagerie hyperspectrale pourrait constituer une solution alternative. C'est une technique développée dans les années 1980⁴, qui sert à caractériser certaines propriétés physiques et chimiques des éléments qui se trouvent à la surface de la terre au moyen de capteurs satellitaires ou aéroportés. Cette classe de capteurs enregistre le spectre électromagnétique entre 400 et 1000 nm, allant parfois jusqu'à 2500 nm, couvrant ainsi la lumière visible mais aussi l'infra-rouge. Les spectres acquis de cette manière permettent d'établir pour chaque pixel de l'image une «signature spectrale» qui peut être corrélée à l'élément qui occupe le pixel en question. Dans notre cas concret, le spectre pourrait être utilisé pour identifier et caractériser des scories dans des images spectrales couvrant de grandes surfaces. Un tel procédé serait-il effi-

Antike Kunst 59, 2016, p. 163–167

¹ Il s'agit d'un projet regroupant l'Université de Genève, l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et le Cyprus University of Technology. La campagne 2015 a reçu le généreux soutien de la Fondation Boninchi (Genève). Nous tenons à lui faire part de notre profonde gratitude, ainsi qu'au Département des Antiquités de Chypre, au Ministère de la Défense de Chypre, et à Thea Christoforou (archéologue, Mathiatis).

² J. Beck, Kataliondas *Kourvellos* 2010 (à paraître dans: Report of the Department of Antiquities, Cyprus 2011–2012); J. Beck, Kataliondas *Kourvellos* 2011, AntK 55, 2012, 161–163; J. Beck, L'occupation néolithique de Kataliondas *Kourvellos*: état de la question. Cahier du Centre d'études Chypriotes 41, 2012, 79–84; J. Beck – P. Birchler Emery, Kataliondas *Kourvellos* (Chypre) à la période classique, in: Association suisse d'archéologie classique (éd.), Rendez-vous à l'Agora. Actualité des projets de fouilles suisses en Méditerranée (2012) 17–21 (www.saka-asac.ch: pdf sous publications – archives).

³ H.-G. Buchholz – W. Ender, Kataliontas-Kourvellos, eine präkeramische Siedlung im Zentrum Zyperns, Prähistorische Zeitschrift 67, 2, 1992, 163–182, en particulier 169.

⁴ A. Goetz *et al.*, Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing, Science 228 (4704), 1985, 1147–1153.

cace, dans le cas des scories? Comme leur composition est variable, et que leur format réduit impose des mesures à (très) faible altitude, il est permis d'en douter. D'où la nécessité des essais dont il est question ici.

Jusqu'à présent, la télédétection par imagerie hyperspectrale a principalement été utilisée en archéologie pour repérer des structures enterrées⁵, en mesurant la nature et l'état de la couverture végétale en surface, l'humidité des sols, etc. Le projet de recherche présenté ici propose une autre utilisation de la technique, basée sur la reconnaissance de vestiges (de scories, en l'occurrence) présents directement en surface.

Le projet de recherche

Il s'agira, si les essais mentionnés ci-dessus sont concluants, de survoler deux zones d'étude dans la région d'Ayia Varvara – Mathiatis – Lythrodontas, riche en activités minières et métallurgiques, à laquelle appartient le site de Kataliondas *Kourvellos*.

Chaque zone correspond à un carré de 4 km de côté. La première, entre les villages d'Ayia Varvara et Mathiatis, servira de zone de référence: c'est là que se trouve la plus grande concentration de vestiges d'activités minières et métallurgiques visibles en surface (mines à ciel ouvert, scories, etc.). Les «signatures spectrales» de différents types de scories (ou d'autres éléments associés à la métallurgie ancienne) pourront y être établies grâce à la présence sur le terrain d'un groupe d'archéologues, de géologues et d'environnementalistes qui identifiera les différents matériaux (vestiges, scories, minerais, substances chimiques résultant des activités métallurgiques). Une base de données de «signatures spectrales» sera ainsi créée pour les scories, qui servira ensuite à leur identification dans les images hyperspectrales.

La seconde, autour de Kataliondas *Kourvellos*, servira de zone de mise en application: c'est là que pourraient se trouver d'éventuelles scories liées au sanctuaire chypro-

classique. Les mesures effectuées sur place seront comparées avec celles de la première zone, à la recherche de possibles correspondances qui seront ensuite vérifiées sur le terrain.

La campagne 2015

Pour évaluer la faisabilité du projet, des premiers essais ont eu lieu sur le terrain entre le 31 août et le 4 septembre, période idéale à Chypre pour la télédétection d'objets au sol, grâce à la faible couverture végétale caractéristique de la fin de l'été.

Il s'agissait dans un premier temps de déterminer quel était le meilleur support à employer pour les capteurs hyperspectraux: planeur ultraléger motorisé (ULM), drone ou perche télescopique. Or il est rapidement paru évident que l'ULM ne pouvait pas convenir: les ascensions thermiques locales et leurs effets déstabilisateurs rendent en effet les vols de ce type impossibles entre le début de la matinée et la fin de l'après-midi en été, alors qu'il est justement important pour les mesures hyperspectrales d'avoir lieu dans des conditions d'ensoleillement les plus constantes possibles, c'est-à-dire vers midi. En milieu de journée, l'utilisation du drone et de la perche télescopique semblait donc plus indiquée. Les mesures ont été réalisées au moyen d'un nouveau type de caméra hyperspectrale⁶, première au monde à pouvoir être montée sur un drone léger.

À partir de là, deux sites d'essais ont été choisis:

- le site 1 correspond à Kataliondas *Kourvellos*, où la présence de scories n'a pas été observée sur le terrain ces dernières années. Seul le drone y a été utilisé, en deux endroits: à la base du piton rocheux, d'une part, là où se trouve le sanctuaire de la période chypro-classique, et sur un replat légèrement en contrebas, d'autre part, proche du lieu où Buchholz et Ender signalent la présence de scories⁷. Dans les deux cas, des pierres

⁵ Voir par exemple S. Aqdas, The potential of hyperspectral and multi-spectral imagery to enhance archaeological cropmark detection: a comparative study, *Journal of Archaeological Science* 39 (7), 2012, 1915–1924.

⁶ D. Constantin *et al.*, Télédétection pour l'agriculture de précision par caméra hyperspectrale miniature, *Géomatique Suisse* 9, 2015, 338–342.

⁷ Buchholz *op. cit.* (note 3).



Fig. 1 Site 2, une des grilles de la zone expérimentale

(roches magmatiques, comme le diabase, ou sédimentaires, comme le calcaire), des éclats de silex (retouchés ou pas) et des fragments de terre cuite (tessons de céramique), présents en surface, ont été temporairement regroupés en tas distincts pour faciliter leur repérage depuis les airs (par opposition aux scories), avant d'être éparpillés à nouveau;

- le site 2 correspond à un champ dans les environs du village de Mathiatis, où les scories abondent. Tant le drone que la perche télescopique y ont été utilisés. Là encore, des pierres, des scories et des fragments de terre cuite, présents en surface, ont été temporairement regroupés, avant d'être éparpillés à nouveau.

Résultats provisoires

Sur le site 2, une expérience a été mise en place afin de vérifier si les images acquises par la caméra hyperspectrale contiennent l'information nécessaire pour distinguer entre scories, fragments de terre cuite et pierres (roches magmatiques, en l'occurrence). Deux grilles de

1 m × 1 m, divisées en 16 carrés de 0,25 m × 0,25 m chacune et espacées de 6 m, ont été matérialisées au sol par des ficelles (fig. 1). Certains carrés ont été remplis de scories, d'autres de fragments de terre cuite ou de pierres (diabase, voir *tableau 1*). La grille de gauche a ensuite été utilisée comme exemple d'éléments que l'on cherche à retrouver dans les images, et la grille de droite pour valider la cohérence de la détection.

Au final, les images prises à la perche télescopique, une fois traitées (fig. 2), montrent que l'identification des scories et des pierres (diabase) fonctionne très bien: les groupes de scories et de pierres de la grille de droite sont identifiés de manière flagrante et cohérente, comme l'indique aussi le *tableau 1*.

La procédure utilisée pour générer les images de la fig. 2 est la suivante :

- Spectre moyen: calcul du spectre moyen de scories ou de pierres en les sélectionnant sur la grille de gauche.
- Distance: calcul de la distance spectrale euclidienne entre le spectre moyen mentionné ci-dessus et chaque pixel de l'image hyperspectrale.

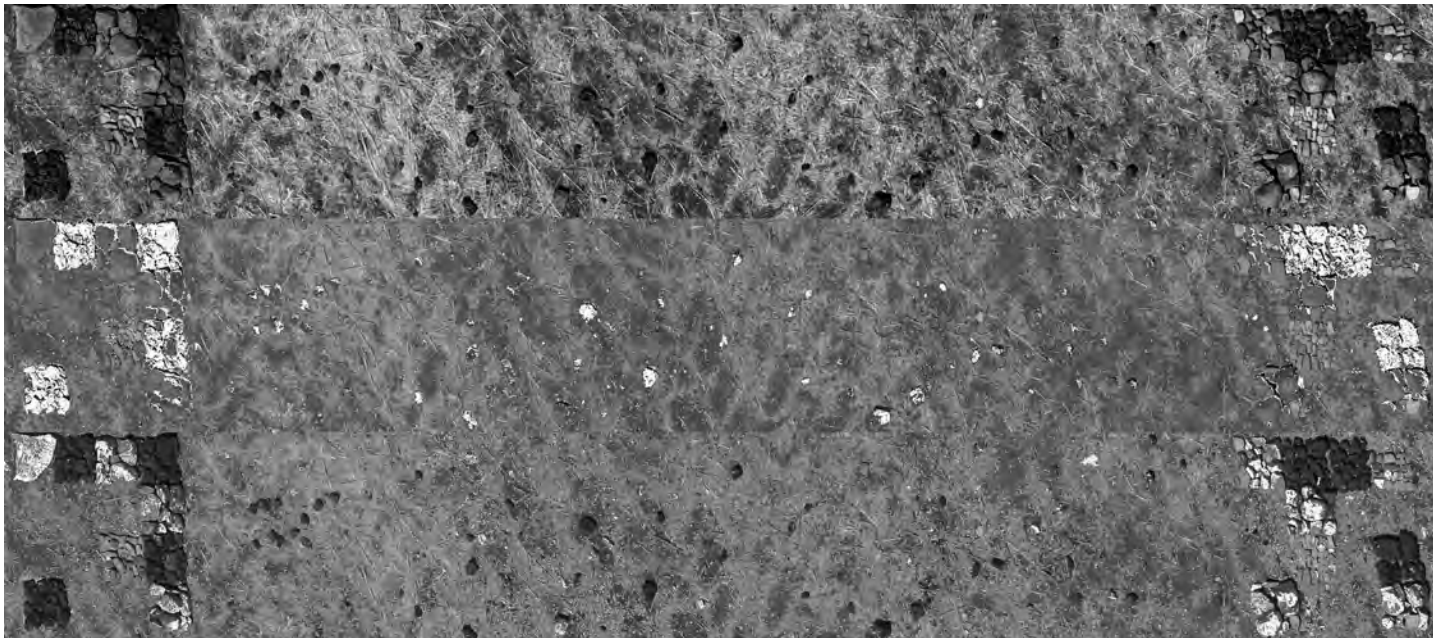


Fig. 2 Site 2. Les deux grilles se trouvent aux extrémités gauche et droite de chaque image. L'image en haut montre simplement la zone; au centre: résultat de la détection des scories (couleur vive); en bas: résultat de la détection des pierres (diabase; autre couleur vive)

Pierre (diabase)	Scories	Pierres (diabase)	Scories
			Pierres (diabase)
		Fragments de terre cuite	Scories
Scories			Pierres (diabase)

Pierres (diabase)	Scories	Scories	Fragments de terre cuite
	Pierres (diabase)		
	Fragments de terre cuite		Scories
Pierres (diabase)			Pierres (diabase)

Tableau 1: Disposition des groupes d'éléments par carrés de 0,25 x 0,25 m dans les grilles de 1 x 1 m qui ont été photographiées spectralement

– Image fausse couleur : pour visualiser l'image hyperspectrale, il faut en générer une image fausse couleur. Pour chaque pixel, si sa distance est petite (en dessous d'un certain seuil), une couleur facilement identifiable lui est donnée. Dans le cas contraire, il reçoit une couleur calculée par combinaison linéaire des canaux hyperspectraux.

Malgré ces résultats provisoires prometteurs, il faudra attendre l'analyse définitive des mesures, courant 2016, afin de déterminer s'il est possible ou non d'utiliser l'imagerie hyperspectrale pour la télédétection de scories sur le site de Kataliondas *Kourvellos*. Le cas échéant, il conviendra d'examiner les implications, tant scientifiques que pratiques, d'une telle utilisation.

Julien Beck
Patrizia Birchler Emery
Département des sciences de l'Antiquité
Université de Genève, Faculté des lettres
5, rue de Candolle
CH-1211 Genève 4

julien.beck@unige.ch
patrizia.birchler@unige.ch

Athos Agapiou
Vasiliki Lysandrou
Kyriakos Themistocleous
Cyprus University of Technology
Faculty of Engineering and Technology
Department of Civil Engineering and Geomatics
Achilleos 1, 1st and 2nd Floor
2-8 Saripolou
CY-3036 Lemesos

athos.agapiou@cut.ac.cy
vasiliki.lysandrou@cut.ac.cy
k.themistocleous@cut.ac.cy

Dragos Constantin
Bertrand Merminod
EPFL ENAC IIE TOPO
GC D2 401 (Bâtiment GC)
Station 18
CH-1015 Lausanne

dragos.constantin@epfl.ch
bertrand.merminod@epfl.ch

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 Une des grilles de la zone expérimentale, sur le site 2.
Fig. 2 Images fausse couleur de la zone expérimentale sur le site 2. Les deux grilles se trouvent aux extrémités gauche et droite de chaque image. La première image, en haut, montre tout simplement la zone. La deuxième, au centre, est le résultat de la détection des scories, où toutes les scories identifiées sont remplacées par une couleur vive. La troisième, en bas, est le résultat de la détection des pierres (diabase), où toutes les pierres identifiées sont remplacées par une autre couleur vive.

Photographies Mission archéologique de Kataliondas *Kourvellos* (Chypre)