



HAL
open science

Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne

Carine Calastrenc, François Baleux, Nicolas Poirier, Christine Rendu

► To cite this version:

Carine Calastrenc, François Baleux, Nicolas Poirier, Christine Rendu. Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne. *Archeosciences, revue d'Archéométrie*, 2020, 44 (1), pp.81-96. 10.4000/archeosciences.7426 . hal-03245823

HAL Id: hal-03245823

<https://hal.science/hal-03245823v1>

Submitted on 7 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ArcheoSciences
Revue d'archéométrie
44-1 | 2020
Varia

Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne

Thermography by drone. New procedure for archaeological detection in high mountains

Carine Calastrenc, François Baleux, Nicolas Poirier et Christine Rendu



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/archeosciences/7426>
DOI : 10.4000/archeosciences.7426
ISSN : 2104-3728

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 16 décembre 2020
Pagination : 81-96
ISBN : 978-2-7535-8219-4
ISSN : 1960-1360

Référence électronique

Carine Calastrenc, François Baleux, Nicolas Poirier et Christine Rendu, « Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne », *ArcheoSciences* [En ligne], 44-1 | 2020, mis en ligne le 02 janvier 2023, consulté le 02 janvier 2023. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/7426> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeosciences.7426>

Tous droits réservés

Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne

*Thermography by drone.
New procedure for archaeological detection in high mountains*

Carine CALASTRENC^a, François BALEUX^a,
Nicolas POIRIER^a et Christine RENDU^a

Résumé : Depuis trente ans, les milieux d'altitude européens constituent un cadre novateur de recherche sur les dynamiques des systèmes pastoraux des espaces de montagne dans la longue durée. Les différentes équipes de recherche impliquées dans ces travaux se trouvent confrontées au problème de l'acquisition de l'information primaire lors de la phase de prospection. Accéder à une information archéologique qui soit la plus complète possible dans un temps relativement court est l'enjeu de la phase de prospection en milieu d'altitude. Le programme de recherche TAHMM (Télé-détection Archéologique en Haute et Moyenne Montagne) a pour objectif de réviser les méthodes de détection des structures archéologiques de ces milieux en déployant différentes méthodes non invasives, du satellite à l'analyse chimique des sols, pour mettre en place une approche intégrée multi-source, multi-échelle et multi-temporelle. Établir de nouvelles procédures de prospection demande également de pousser plus avant l'analyse de l'information et souvent de sortir des schémas trop stricts des formats propriétaires. Le présent article exposera les premiers résultats du travail de refonte de la chaîne de traitement et d'analyse des images thermiques acquises par drone sur des sites pastoraux d'altitude en s'appuyant sur des tests réalisés en 2018.

Abstract: For 30 years, European mountain environments have provided an innovative framework for research on the dynamics of pastoral systems in mountain areas over the long term. The various research teams involved in this work are confronted with the problem of acquiring primary information during the surveying phase. Accessing archaeological information that is as complete as possible in a relatively short period of time is the challenge of the mid-altitude prospecting phase. The TAHMM (Archaeological Remote Sensing in High and Medium Mountains) research program aims to revise the methods for detecting the archaeological structures of these environments by deploying different non-invasive methods, from satellites to chemical soil analysis, to implement an integrated multi-source, multi-scale and multi-temporal approach. Establishing new prospecting procedures also requires further data analysis and often leaving too strict schemes of proprietary formats. This article will present the first results of the work to redesign the processing and analysis chain for thermal images acquired by drone at high altitude pastoral sites, based on tests carried out in 2018.

Mots-clés : archéologie de la haute montagne, drone, prospection archéologique, télé-détection, thermographie.

Keywords: high mountain archaeology, drone, archaeological prospecting, remote sensing, thermography.

^a Laboratoires TRACES (UMR 5608)/FRAMESPA (UMR 5136) Université Toulouse Jean Jaurès Maison de la recherche, 5 Allée Antonio Machado, 31000 Toulouse (carine.calastrenc@univ-tlse2.fr) (francois.baleux@univ-tlse2.fr) (nicolas.poirier1@univ-tlse2.fr) (christine.rendu@univ-tlse2.fr)

1. INTRODUCTION

Les milieux d'altitude européens (Pyrénées, Alpes, Cantabrie, montagnes insulaires...) constituent un cadre novateur de recherche sur les dynamiques des systèmes pastoraux des espaces de montagne dans la longue durée (Bal *et al.*, 2010; Barker *et al.*, 1991; Garcia Casas, 2018; Gassiot Ballbè *et al.*, 2016b; Gassiot Ballbè *et al.*, 2013; Guédon, 2013; Guédon, 2006; Guillot, 2017; Le Couédic *et al.*, 2014; Le Couédic, 2010, Mientjes, 2004; Mientjes, 2010; Mocci *et al.*, 2005; Orenge, 2010; Palet *et al.*, 2007; Palet *et al.*, 2013; Saint-Sever *et al.*, 2016; Reitmaier *et al.*, 2013; Reitmaier, 2012; Rendu *et al.*, 2016; Rendu *et al.*, 2015; Rendu *et al.*, 2012; Rendu, 2003; Rendu, 2002; Rendu, 2000; Rendu *et al.*, 1995; Walsh *et al.*, 2019; Walsh *et al.*, 2010; Walsh *et al.*, 2009; Walsh, 2005). Force est de constater que les différentes équipes de recherche impliquées dans ces travaux se trouvent confrontées au problème de l'acquisition de l'information primaire lors de la phase de prospection.

Préalable indispensable à toute recherche en archéologie, la prospection en haute montagne a des spécificités. Contrairement au travail de prospection en plaine (Ferdière & Fourteau, 1979; Ferdière & Zadora-Rio, 1986; Pasquinucci & Trément, 2000; Trément, 2011; Poirier, 2010; Poirier & Hautefeuille, 2018; Poirier *et al.*, 2017; Poirier *et al.*, 2013), en milieu d'altitude, la détection des structures archéologiques ne prend pas appui sur l'analyse de la répartition des objets récoltés en surface; la couverture végétale y est bien trop dense et empêche toute remontée du mobilier archéologique. Ce qui s'offre à l'œil de l'archéologue sont les vestiges des infrastructures, du bâti en élévation aux microreliefs. La méthode de prospection actuelle (Rendu, 2003; Reitmaier, 2010; Gassiot Ballbè, 2016a; Gassiot Ballbè *et al.*, 2016b; Rendu *et al.*, 2016; Le Couédic *et al.*, 2019) repose sur le parcours, à pied, de l'ensemble de la zone d'étude durant les périodes estivales et automnales. L'approche pédestre systématique des espaces pastoraux d'altitude ne peut donc être que spatialement limitée et ne concerner que de « petits » territoires (quelques centaines d'hectares). Ainsi, l'estive d'Anéou (Pyrénées-Atlantiques) de presque 1 300 hectares a été prospectée en 4 mois à 2 personnes (Rendu *et al.*, 2016), les 1 400 hectares de la haute vallée de Benasque (Aragon, Espagne) ont été parcourus en trois mois à deux personnes (Calastrenc *et al.*, 2004, Calastrenc *et al.*, 2005, Calastrenc *et al.*, 2006) et les 40 000 hectares du Parc d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (Catalogne, Espagne) ont nécessité dix ans de prospection à une quinzaine de

personnes. Actuellement, en haute montagne, la surface moyenne couverte par les prospecteurs est donc d'un peu moins de 176 hectares par mois.

Accéder à une information archéologique qui soit la plus complète possible dans un temps relativement court est l'enjeu de la phase de prospection en milieu d'altitude. Malgré les différentes évolutions techniques déployées ces dernières années pour faciliter et optimiser le travail de prospection, notamment par la saisie de l'information sur le terrain avec des DGPS (Differential Global Position System) et le traitement des données dans des SIG (Système d'Information Géographique), cette phase du travail se heurte encore aujourd'hui à deux verrous méthodologiques majeurs :

- Comment dépasser le cadre de la monographie d'un pâturage ou d'une montagne, pour aborder archéologiquement de plus grandes surfaces et ainsi pouvoir développer une réelle approche comparée des trajectoires des territoires d'altitude à l'échelle d'un massif ou d'une chaîne?

- Comment disposer d'un référentiel statistiquement significatif et solide qui soit susceptible de comprendre à la fois les structures visibles en surface et celles recouvertes par la végétation, les colluvionnements ou encore arasées par l'activité humaine et épierrées?

Les nouvelles avancées technologiques, la diversification et la miniaturisation des capteurs, la démocratisation et le développement des drones aériens ainsi que les progrès en ergonomie informatique des logiciels de traitement des données permettent de réfléchir à la mise en œuvre de nouvelles procédures d'acquisition de l'information primaire pour la détection des vestiges archéologiques en milieux d'altitude. C'est ce que propose de faire le programme de recherche TAHMM (Téledétection Archéologique en Haute et Moyenne Montagne). Son objectif est d'utiliser toutes les ressources techniques et méthodologiques non invasives, du satellite à l'analyse chimique des sols, pour mettre en place une approche intégrée multi-source, multi-échelle et multi-temporelle (Calastrenc *et al.*, 2018) afin d'optimiser le travail de détection archéologique en montagne. Ce programme de recherche utilise les équipements scientifiques des plateaux techniques TIG-3D (Téledétection, Imagerie, Géomatique, 3D) du laboratoire TRACES (UMR 5608) et P2G (Paléoenvironnements, Géosciences, Géoarchéologie) du laboratoire GEODE (UMR 5602). De plus, grâce à une collaboration avec le CNES dans le cadre du programme d'accompagnement scientifique ISIS, des acquisitions d'images Pléiades ont pu être programmées et réalisées en juin et juillet 2019. Une première série d'outils (téledétection par satellite et par drone, lidar par drone, photogrammétrie par drone et satellite, thermographie aéroportée par drone, prospections

géoradar et magnétique, analyse chimique des sols par fluorescence-X) a été utilisée à titre exploratoire.

Établir de nouvelles procédures et méthodes de prospection demande également de pousser plus avant l'analyse des données. Le présent article exposera les premiers résultats du travail de refonte de la chaîne de traitement et d'analyse des images thermiques acquises par drone sur des sites pastoraux d'altitude.

2. MÉTHODE ET TERRAINS

Thermographie aéroportée

La thermographie par avion est utilisée depuis les années 1970 en archéologie (Hesse & Tabbagh, 1993; Tabbagh *et al.*, 1990, Tabbagh, 1983, Tabbagh, 1977; Lundén, 1985; Bellerby *et al.*, 1990; Casana *et al.*, 2017). Elle repose sur le principe selon lequel il existe une différence de la température de surface (TS), sol et végétation, entre les zones renfermant des structures archéologiques et celles où ces structures sont absentes (Eppelbaum, 2009). Dans le cadre des mesures thermiques prises au sol, les aménagements auront tendance à réagir différemment aux changements de température par rapport aux sédiments encaissants, en se réchauffant ou refroidissant plus ou moins rapidement selon leur nature. Quant aux mesures thermiques acquises sur la végétation, les variations de la TS sont des indicateurs de l'état sanitaire du couvert végétal, notamment de son niveau de stress hydrique, en partant du principe qu'une plante qui pousse au-dessus d'une structure bâtie sera plus stressée car disposant de moins d'eau et de moins de nutriments que les autres plantes. *A contrario*, les plantes qui poussent au-dessus de structures archéologiques en creux de type fosse et fossé recevront plus d'eau et de nutriments et seront moins sujettes au stress hydrique. Ce qui est donc observable, c'est l'inertie thermique à l'emplacement des structures archéologiques (Poirier & Hautefeuille, 2018; Poirier *et al.*, 2017; Poirier *et al.*, 2013). Avec un instrument de mesure placé sur avion, la thermographie s'est avérée trop coûteuse et complexe à mettre en œuvre et a été presque abandonnée par les archéologues. Toutefois, un regain d'intérêt est observé depuis quelques années grâce à la démocratisation des drones, à la miniaturisation des capteurs infrarouges thermiques numériques et à l'amélioration de leur résolution spatiale et spectrale qui permettent de les utiliser dans le cadre de la détection d'anomalies thermiques fines (Cailloce, 2015). Coupler la thermographie avec un drone permet de pallier les contraintes fortes des acquisitions par avion ou hélicoptère : abaissement des coûts d'acquisition,

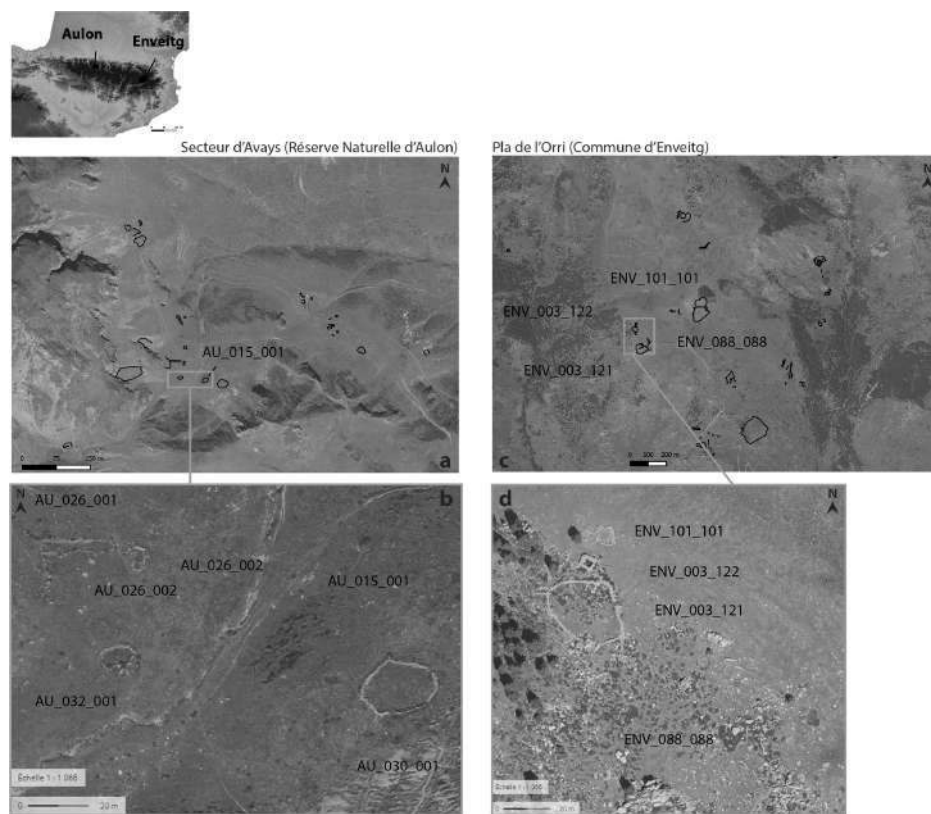
flexibilité d'utilisation, répétabilité des vols, variabilité de la hauteur d'acquisition (Hill *et al.*, 2020; Agudo *et al.*, 2018; Casana *et al.*, 2014). Au sein du programme de recherche *Archéodrone* dirigé Florent Hautefeuille (MCF, Université Toulouse Jean Jaurès) et Nicolas Poirier (CR CNRS) du laboratoire TRACES (UMR 5608), les premières acquisitions thermiques par drone ont été réalisées à partir de 2012 grâce à un drone octorotor équipé d'un appareil photographique numérique pour des travaux de photogrammétrie et d'une caméra thermique Flir T620 installée sur une nacelle munie d'un axe de rotation horizontal (Poirier *et al.*, 2013). Cette caméra permet d'obtenir, en une prise de vue, un couple d'images classiques et thermiques. Le capteur thermique couvre la gamme d'infrarouge allant de 7,5 à 14 nanomètres et a une sensibilité de 0,04 degré Celsius. Au regard du nombre moyen de pixels des images numériques produites actuellement (12 millions de pixels), la résolution de la caméra T620 (0,3 mégapixel - 640 × 480 pixels) n'est pas excellente. Toutefois, cette « faiblesse » est en partie compensée par l'abaissement de l'altitude de vol.

La technique de prises de vue thermographique suivie dans le cadre du programme de recherche TAHMM s'est basée sur les préconisations établies par les chercheurs du programme *Archéodrone* et *REPERAGE* (dir. Nicolas Poirier, CR CNRS, Laboratoire TRACES) (Poirier *et al.*, 2017; Poirier, 2018). Ces dernières varient en fonction des saisons. De façon générale, la première règle est d'effectuer les survols de façon à avoir le plus grand contraste possible entre les températures du sol (froid) et de l'air (plus chaud). La seconde concerne l'incidence de l'orientation du capteur en vol (verticale ou oblique) qui a démontré de meilleures capacités de détection des anomalies thermiques, en plaine, lorsque la position du capteur est oblique.

Deux terrains-tests pyrénéens

En septembre et octobre 2018, une première série d'acquisitions thermographiques par drone a été réalisée sur deux terrains pyrénéens (figure 1), le Pla de l'Orri situé à 2013 m d'altitude dans la commune d'Enveitg (Pyrénées-Orientales) et le secteur d'Avays situé à 1935 m d'altitude dans la Réserve Naturelle d'Aulon (Hautes-Pyrénées).

Le Pla de l'Orri à Enveitg est archéologiquement très bien connu par des prospections, sondages et fouilles extensives réalisés entre les années 1985 et 2005 par Christine Rendu (CR CNRS – FRAMESPA-UMR 5136) et l'équipe du GRAHC (Groupe de Recherche Archéologique et Historique de Cerdagne), notamment dans le cadre du Programme Collectif de Recherche « *Cerdagne : estivage et structuration sociale d'un espace Montagnard* » (Rendu *et al.* 2012; Rendu,



Légende
 ● Structure archéologique identifiée en prospection pédestre
 □ Zone d'acquisition thermique

2003; Rendu, 2000; Rendu *et al.*, 2009). Sur les 31 hectares du replat du Pla de l'Orri, ces travaux ont permis de localiser 37 structures archéologiques dont 1 abri sous roche, 18 cabanes, 2 couloirs de traite, 8 enclos, 4 murs et 4 structures dont la fonction est indéterminée qui se répartissent de part et d'autre d'une tourbière et de documenter une occupation allant de l'Âge du bronze à nos jours. La première série d'acquisitions thermiques par drone a été réalisée le 26 septembre 2018 à 15 h 30 (figure 1) par une chaude journée d'automne (température de l'air entre 19 et 20 °C dans la plage horaire 13 h à 16 h). Un vol thermique oblique, de 10 minutes, fait à 30 m d'altitude, a permis de documenter deux zones : un replat à l'ouest d'un habitat daté par la fouille de l'Âge du Bronze (structure ENV_088_088) et une zone située au nord de la cabane (ENV_003_122). 19 images thermiques et 19 images en classiques RVB ont été enregistrées.

Quant au secteur d'Avays dans la Réserve Naturelle d'Aulon, aucun travail archéologique n'avait été entrepris avant son introduction dans le programme de recherche TAHMM. Il s'agit d'un petit vallon très encaissé de 6 hectares orienté vers le nord. Au mois d'octobre, ce vallon est entièrement au soleil vers 12 h 30-13 h 00. L'acquisition thermographique

Figure 1 : (Voir planche couleur X) Localisation des zones d'étude et des aires d'acquisition thermique par drone. a. En haut à gauche, le secteur d'Avays de la Réserve Naturelle d'Aulon (Hautes-Pyrénées). b. En bas à gauche, zoom sur le secteur d'Avays avec la localisation des structures situées aux environs de la construction AU_015_001. c. En haut à droite, le secteur de Pla de l'Orri sur la commune d'Enveitg (Pyrénées-Orientales). d. En bas à droite, partie du Pla de l'Orri testée thermiquement.

Figure 1: (See colour plate X) Location of study areas and thermal acquisition areas by drone. a. Top left, the Avays sector of the Aulon Nature Reserve (Hautes-Pyrénées). b. Bottom left, zoom on the Avays sector with the location of the structures located around the construction AU_015_001. c. Top right, the Pla de l'Orri sector on the commune of Enveitg (Pyrénées-Orientales). d. Bottom right, part of the Pla de l'Orri thermal tested.

par drone a été réalisée, à 30 m d'altitude au-dessus du point de décollage, le 26 octobre 2018 à 12 h 18 par une journée d'automne chaude (entre 13 et 22 °C). Ayant testé sur le site d'Enveitg les acquisitions obliques, il a été choisi ici de tester l'impact d'une acquisition au nadir (zénithale) sur une structure remarquable, située au sud-est de la zone d'étude : la structure n° AU_015_001 (figure 1). 26 prises de vue ont été faites. À l'occasion de ces acquisitions, une prospection pédestre du vallon avec un enregistrement des données par DGPS a été réalisée. Elle a permis d'inventorier 23 structures dont 2 cabanes, 1 couloir de traite, 9 enclos, 5 murs et 10 constructions à la fonction indéterminée. (Calastrenc *et al.*, 2018).

3. RÉSULTATS

Chaîne de traitement avec le logiciel propriétaire

Le capteur FLIR T620 permet une double acquisition, thermique et RVB. Ces images thermiques montrent les variations de la TS à l'aide d'un dégradé allant du jaune

(zone pour les températures les plus chaudes) au bleu (pour les zones les plus froides). Pour chaque pixel, en plus de la valeur de couleur, est associée l'information relative à la TS de l'objet qu'il renseigne (figure 2).

Sur le secteur du Pla de l'Orri à Enveitg, un premier test de traitement a été réalisé avec le logiciel propriétaire de Flir, FlirTools, sur les images servant à documenter le replat situé au nord d'une cabane moderne (structure n° ENV_003_122) et à l'ouest de la structure ENV_101_101. L'objectif est de déterminer si des constructions sous-jacentes au couvert végétal sont présentes à cet emplacement. Les prises de vues ont donc été réalisées en oblique. Elles ne se sont pas focalisées sur un point précis, mais sur une zone (figure 2.1 et 2.2).

Un deuxième test a été réalisé sur la structure AU_015_001 du secteur d'Avays de la Réserve Naturelle d'Aulon. L'objectif ici n'est pas de chercher à percevoir des structures non visibles en surface, mais de déterminer s'il est possible de disposer d'information plus fine qu'une seule observation de surface sur une construction recouverte par de la végétation (figure 2.3 et 2.4).

Les mesures thermiques ont, dans un premier temps, suivi la chaîne de traitement « classiquement » utilisé dans le cadre de travaux archéologiques : modification des bornes de températures affichées et choix d'un gradient de couleur parmi

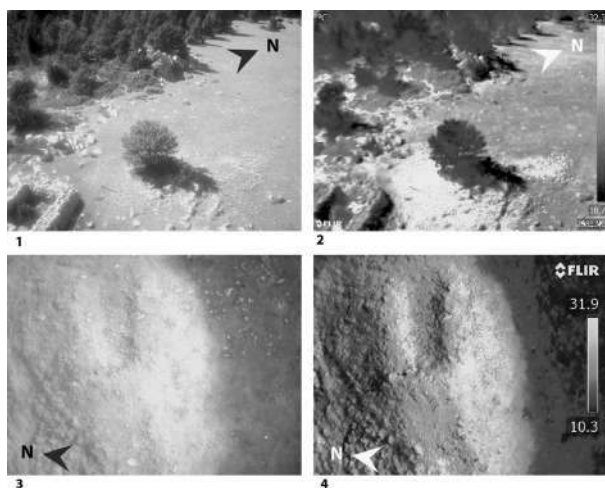


Figure 2 : (Voir planche X) Prise de vue thermographique avec la caméra Flir T 620. 2.1. Image RVB faite au nord de la structure ENV_003_122 sur l'estive d'Enveitg. 2.2. Image thermographique correspondante. 2.3. Image RVB prise par drone de la structure Au_015_001 du secteur d'Avays de la Réserve Naturelle d'Aulon. 2.4. Image thermographique correspondante.

Figure 2: (See plate X) Thermal photography with the Flir T 620 camera. 2.1. RGB image made north of the ENV_003_122 structure on the Enveitg summer camp. 2.2. Corresponding thermal image. 2.3. RGB image taken by drone of the structure Au_015_001 of the Avays sector of the Aulon Nature Reserve. 2.4. Corresponding thermal image.

les différents dégradés prédéfinis dans le logiciel FlirTool (figure 3).

La prise de mesure faite au nord de la structure ENV_003_122 du Pla de l'Orri à Enveitg, a été centrée sur le gradient de température allant de 38,1 à 24,3 degrés Celsius et la palette de couleur Midgreen.apl a été appliquée. Cela permet de mettre en évidence une anomalie thermique chaude de forme quadrangulaire (figure 3.1 et 3.3), au nord de laquelle s'étend une deuxième anomalie chaude, de surface plus réduite (figure 3.3).

Quant à l'image thermique prise au-dessus de la structure AU_015_001 du secteur d'Avays à Aulon, les températures affichées ont été limitées à la fourchette allant de 32,8 à 16,4 degrés Celsius. La palette de couleur choisie est GreyRed.apl. Ce paramétrage permet de délimiter plus précisément le mur nord de cette construction. Quant à la façade sud,

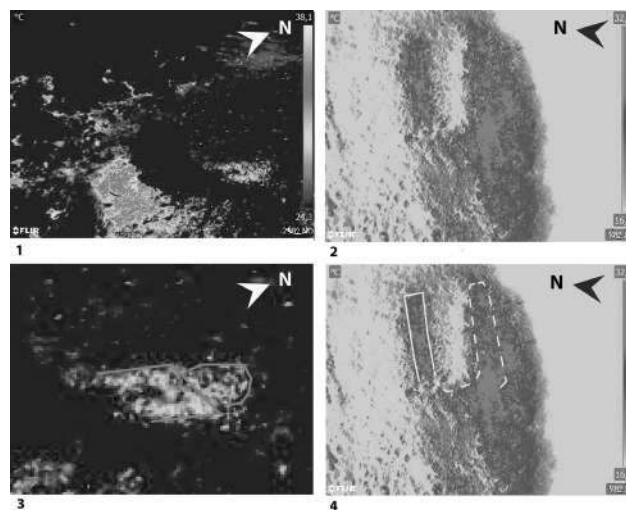


Figure 3 : (Voir planche couleur X) Traitement des images thermiques dans le logiciel FlirTools. 3.1. Image thermique prise au nord de la structure ENV_003_122 à Enveitg et traitée dans FlirTools. 3.2. Image thermique prise au-dessus de la structure AU_015_001 à Aulon et traitée dans FlirTools. 3.3. Zoom sur le traitement de l'anomalie thermique située au nord de la structure de la structure ENV_003_122 (en rouge, tracé du contour de l'anomalie thermique). 3.4. Analyse de l'image thermique prise au-dessus de la structure AU_015_001 (en jaune, l'identification des indices archéologiques).

Figure 3: (See colour plate X) Thermal image processing in FlirTools software. 3.1. Thermal image taken north of the ENV_003_122 Enveitg structure and processed in FlirTools. 3.2. Thermal image taken above the AU_015_001 structure at Aulon and processed in FlirTools. 3.3. Focus on the treatment of the thermal anomaly located north of the structure structure ENV_003_122 (in red, outline of the thermal anomaly). 3.4. Analysis of the thermal image taken above the structure AU_015_001 (in yellow, the identification of archaeological evidence).

elle est moins bien définie et semble à la fois comprendre le mur et son éboulement (figure 3.2 et 3.4).

S'affranchir du format propriétaire

Le logiciel FlirTool, bien que performant, limite les possibilités de traitement de l'image thermique. Il oblige à se contraindre à des cadres trop stricts : impossibilité de modifier les gradients de couleur, limitation dans les températures affichées, absence d'outils d'analyses complémentaires. De plus, le format propriétaire de Flir bloque tout traitement des images thermiques dans d'autres logiciels. En effet, exportées telles quelles dans un logiciel de DAO ou un SIG, ces images perdent l'information de température et ne conservent que la valeur de couleur du pixel (qui dépend du gradient appliqué). Analyser les informations thermiques à des fins de détection archéologique demande d'établir une procédure qui permette de sortir du format imposé par Flir.

Dans un premier temps, depuis le logiciel FlirTools, les images thermiques ont été exportées en format .csv. Le résultat est une matrice dans laquelle chaque cellule spécifie la température du pixel qu'elle représente. Ainsi, le positionnement de ces valeurs est sauvegardé : par exemple, la mesure située dans le coin en haut à gauche du tableau correspond au pixel de l'angle haut gauche de l'image thermique. Les coordonnées de l'angle haut gauche sont connues ainsi que la taille des pixels. Il est alors possible de restituer le raster. Dans un SIG, ce fichier est importé dans un format raster pour décrire un MNTS (Modèle Numérique de Température de Surface) dont chaque pixel correspond à la valeur de température de surface. Ce MNTS est ensuite géoréférencé, soit à partir de points topographiques pris au DGPS lors de l'acquisition thermique, soit en s'appuyant sur des relevés topographiques faits à la station totale. Pour les photographies thermiques obliques, les images géoréférencées ont ensuite été découpées pour supprimer les parties déformées et ne conserver que les zones exploitables de l'image. Une fois les images utilisables dans d'autres logiciels, il est nécessaire d'établir une procédure de traitement et d'analyse de l'information thermique qui passe par l'amélioration de la visualisation de la TS et la réalisation de profils thermiques.

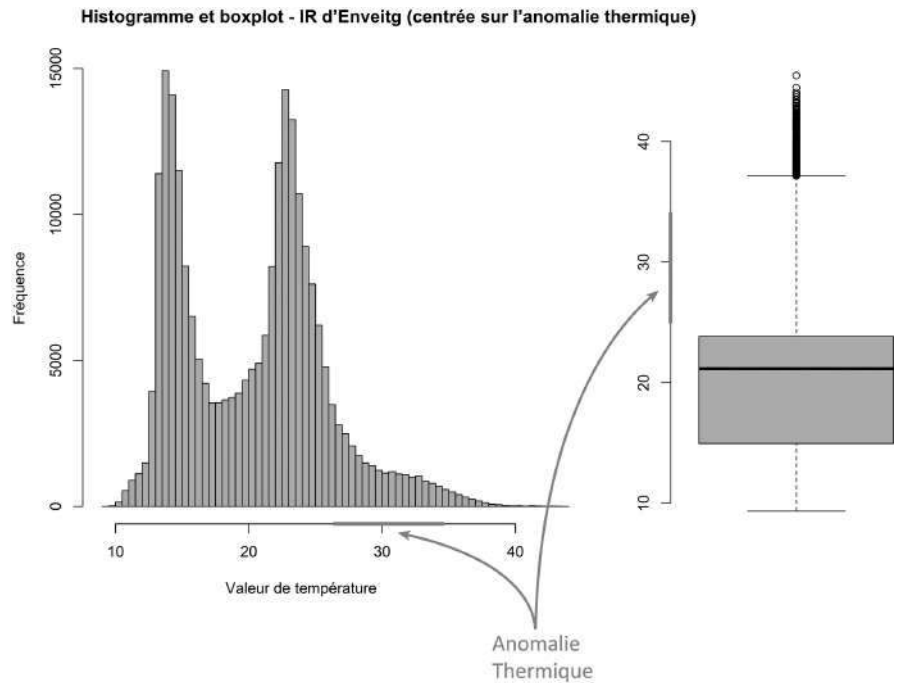
Amélioration de la visualisation de l'information thermique

Faire varier la palette de couleur revient à modifier la représentation visuelle des valeurs de TS. L'objectif est d'essayer de faire correspondre le plus possible le gradient de couleur appliqué à la distribution des mesures (Jegou, 2013). Le choix des couleurs, leur nombre et les bornes appliquées à

une image, ici thermique, sont donc primordiaux. Ainsi, pour chaque image, il est nécessaire de déterminer la meilleure palette de couleur à utiliser pour donner à voir l'organisation quantitative et spatiale de l'information thermique et également de pouvoir justifier ces choix. Pour avoir une meilleure visualisation de l'information, il est nécessaire de sortir de l'adoption d'un gradient en se basant uniquement sur une validation visuelle et l'intuition, pour s'appuyer sur un raisonnement et des outils statistiques qui peuvent rendre compte de phénomènes spatialisés en déterminant les bornes des classes à appliquer pour qu'elles soient homogènes et distinctes entre elles. Le choix de la méthode appliquée varie en fonction des objectifs de représentation (que souhaite-t-on montrer?) et en fonction de la forme de la distribution des données (normale, symétrique, asymétrique). Pour réaliser ce travail de discrétisation, les outils de la suite logicielle R, mais aussi l'application de cartographie en ligne Magrit développée par le pôle géomatique de l'UMS RIATE (<http://www.ums-riate.fr>) ont été utilisés. Cette application propose différentes méthodes de discrétisation (intervalles égaux, quantiles, Q6, Seuils naturels, Moyenne-Ecart-type, progression arithmétique ou géométrique) et indique pour chacune le nombre de classes le plus adapté à la série statistique. Pour ce faire, elle s'appuie sur la formule de Sturges-Huntsberger (Sturges, 1926; Huntsberger, 1962).

Mais définir les classes les plus adaptées à un jeu de données n'est pas suffisant. Il faut aussi sélectionner les valeurs de couleurs et les ruptures colorimétriques pour donner à voir le mieux possible l'information.

Les images thermiques prises sur le Pla de l'Orri présentent une anomalie chaude (entre 26 et 34 degrés) de forme oblongue (de 4,60 m de long sur 2 m de large) à l'ouest de la structure ENV_101_101 et au nord de la structure ENV_003_122. L'ombre d'un arbre masque la partie sud de cette anomalie. Les images aériennes prises par drone, en même temps que les images thermiques, montrent à cet emplacement une dégradation de la couche végétale qui laisse apparaître, par endroits, le sol nu, mais aucun indice (alignement de pierre, microrelief) de la présence d'une structure archéologique enfouie (figure 2). Après la phase de recomposition, géoréférencement et découpage de l'image, il a fallu définir le gradient de couleur à appliquer pour faire ressortir le plus précisément possible la distribution de l'information thermique au niveau de l'anomalie. L'histogramme des valeurs de TS (figure 4) montre une distribution asymétrique avec deux pics (autour de 13 °C et 22 °C). La prépondérance des températures basses réduit les méthodes de discrétisation utilisables à celle des quantiles, de l'amplitude égale, de la progression arithmétique et géométrique. Le choix s'est porté sur la classification par quantiles qui abaisse le poids des valeurs



Résumé :
 1er Quantile = 14.95°C Moyenne = 20.34°C Mini : 9.36°C
 Médiane = 21.17°C 3ème Quantile = 23.83°C Maxi : 45.47°C

Figure 4 : Histogramme et boîte à moustache de l'anomalie située à 10 m au nord de la structure ENV_003_122 et à 5 m à l'ouest de la structure ENV_101_101.

Figure 4: Histogram and box plot of the thermal image of the anomaly located 10 m north of the ENV_003_122 structure and 5 m west of the ENV_101_101 structure.

extrêmes et procure des cartes visuellement plus riches tant que les seuils dans la distribution des classes sont respectés (Paegelow, 2000; Badey, 2017; Oucherif, 2017). Elle crée des classes qui contiennent le même nombre de données. Ici, le choix s'est porté sur 16 classes. Quant à la boîte à moustaches, elle indique que l'anomalie thermique se trouve en dehors de l'écart interquantile. Le gradient de couleur devra donc mettre l'accent sur cette partie du spectre.

Le dégradé de couleur choisi est focalisé sur les valeurs allant de 23 à 44 degrés et regroupe les températures de 9 à 22 degrés qui correspondent à des zones d'ombre. Les exclure permet de réduire « l'effet bruit » et de se focaliser sur l'anomalie (figure 5).

Le MNTS ainsi classifié permet de distinguer au nord de l'ombre portée de l'arbre, deux lignes parallèles, d'axe nord-sud, d'environ 80 cm de large et 1,2 m de long, constituées de pierres et blocs affleurants ou situés juste sous la couche végétale qui viennent buter au nord sur une masse quadrangulaire de blocs qui s'étend sur 4 m².

Juxtaposer le MNTS classifié sur une image aérienne (figure 6) prise par drone en octobre 2019 permet de mieux situer l'anomalie thermique par rapport aux irrégularités du couvert végétal. La partie ouest de l'anomalie est fortement corrélée à la présence du sol nu. Il en va différemment pour la partie est. L'anomalie thermique chaude à cet emplacement

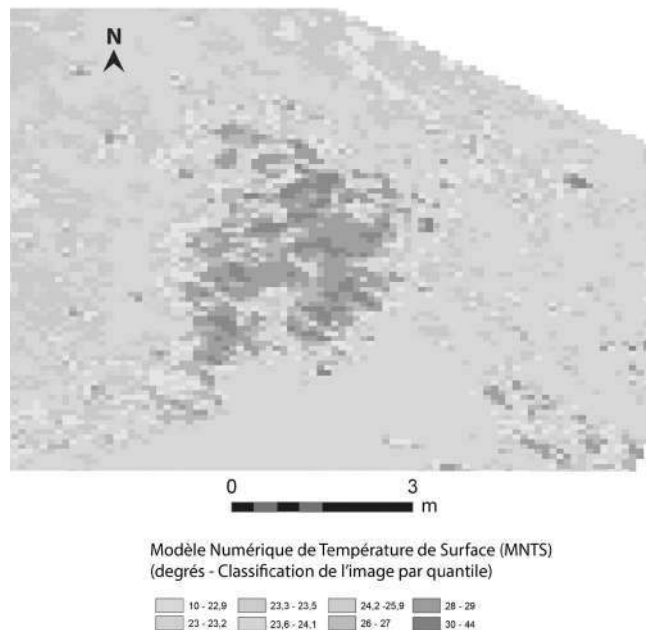


Figure 5 : (Voir planche couleur XI) MNTS classifié suivant la méthode des quantiles en 16 classes – Anomalie située au nord de la structure ENV_003_122 au Pla de l'Orri.

Figure 5: (See colour plate XI) MNTS classified according to the method of quantiles in 16 classes – An anomaly located north of the structure ENV_003_122 at Pla de l'Orri.

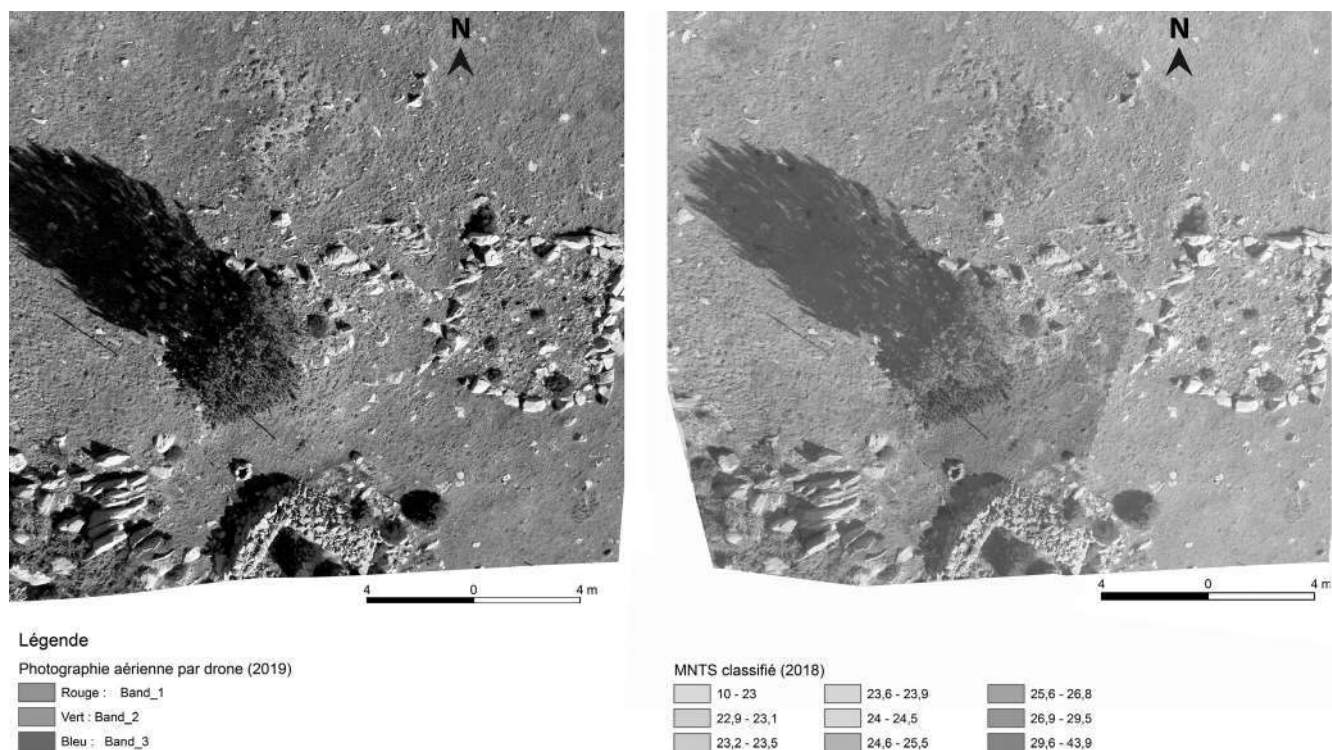


Figure 6 : (Voir planche couleur XI) À gauche, une photographie aérienne prise par drone en octobre 2019 de la zone située à 5 m à l'ouest de la structure ENV_101_101 et à 10 au nord de la structure ENV_003_122 ; À droite, juxtaposition de la photographie aérienne prise par drone en octobre 2019 de la zone située à 5 m à l'ouest de la structure ENV_101_101 et à 10 au nord de la structure ENV_003_122 et le MNTS reclassifié fait à partir d'une image thermique prise par drone en 2018.

Figure 6: (See colour plate XI) On the left, an aerial photograph taken by drone in October 2019 of the area 5 m west of the ENV_101_101 structure and 10 north of the ENV_003_122 structure; On the right, juxtaposition of the aerial photograph taken by UAV in October 2019 of the area located 5 m west of the ENV_101_101 structure and 10 north of the ENV_003_122 structure and the reclassified MNTS made from a thermal image taken by UAV in 2018.

résulte de la présence de roche sous le couvert végétal sans qu'il soit possible de confirmer, avec ces seules données, s'il s'agit d'une formation naturelle ou d'un aménagement anthropique.

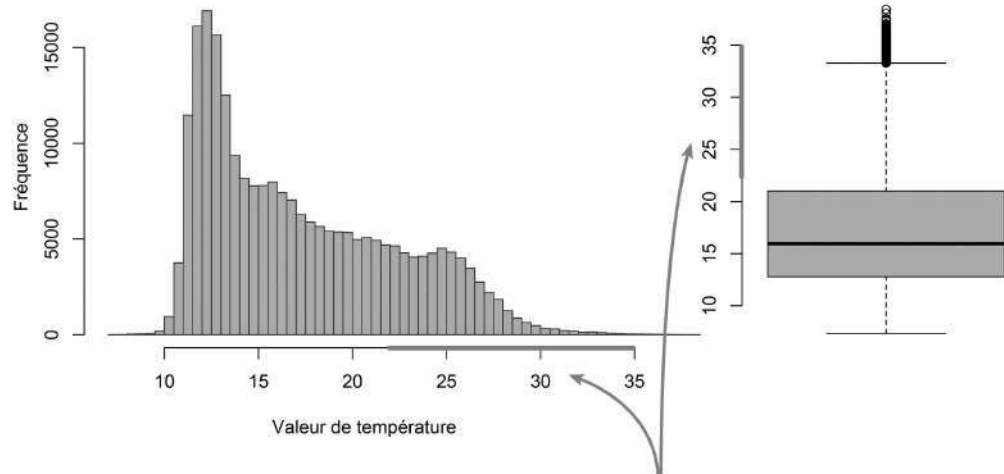
Placée sur une plateforme, la structure AU_015_001 domine le secteur d'Avays. Elle est parfaitement visible en surface et est identifiable par un macrorelief de forme rectangulaire de 6,34 m de long et 2,53 m de large (soit une surface intérieure évaluée à 15 m²). Ses hauts bourrelets, qui entourent une dépression centrale, sont bien conservés au sud, nord et ouest avec respectivement une hauteur de 1,26 m, 0,54 m et 0,48 m. La face à l'est est totalement arasée (figure 2).

L'objectif de cette acquisition thermographique est de déterminer si cette technologie permet d'avoir une meilleure lisibilité des modes de construction même sur les parties éboulées du bâtiment et/ou actuellement situées sous la couche végétale. Après reconstruction et géoréférencement de l'image thermique, il a fallu définir la méthode de discrétisation

la plus adaptée pour répondre à l'objectif. Le choix de classification des données thermiques s'est appuyé sur l'analyse de l'histogramme, la boîte à moustache (figure 7) et l'application Magrit.

Contrairement à l'analyse de l'image thermique prise à Enveitg, ici, les données sont plus homogènes (l'écart inter-quantile s'étend sur 4,27 °C alors qu'il est de 8,88 °C à Enveitg). Avec un pic de valeurs, entre 10 et 15 degrés Celsius, l'histogramme montre une distribution asymétrique biaisée à droite. Ce pic de température correspond aux zones d'ombre et notamment à celle située au sud de la structure (il s'agit de l'ombre portée des montagnes environnantes). Quant au bâti de la structure AU_015_001, il est thermiquement situé dans une fourchette de température allant de 23 à 38 degrés Celsius. Tout comme pour le secteur d'Enveitg, ici aussi, les valeurs thermiques à mettre en évidence sont situées en dehors de l'écart inter-quantile.

Histogramme et boxplot - IR d'Aulon (prise au zénith de la structure AU_015_001)



Bâti de la structure
AU_015_001

Résumé :

1er Quantile = 12.95°C	Moyenne = 17.22°C	Mini : 7.32°C
Médiane = 15.96°C	3ème Quantile = 20.99°C	Maxi : 38.42°C

Figure 7 : Histogramme et boîte à moustache de l'image thermique prise au zénith de la structure AU_015_001.

Figure 7: Histogram and box plot of the thermal image taken at the zenith of the structure AU_015_001.

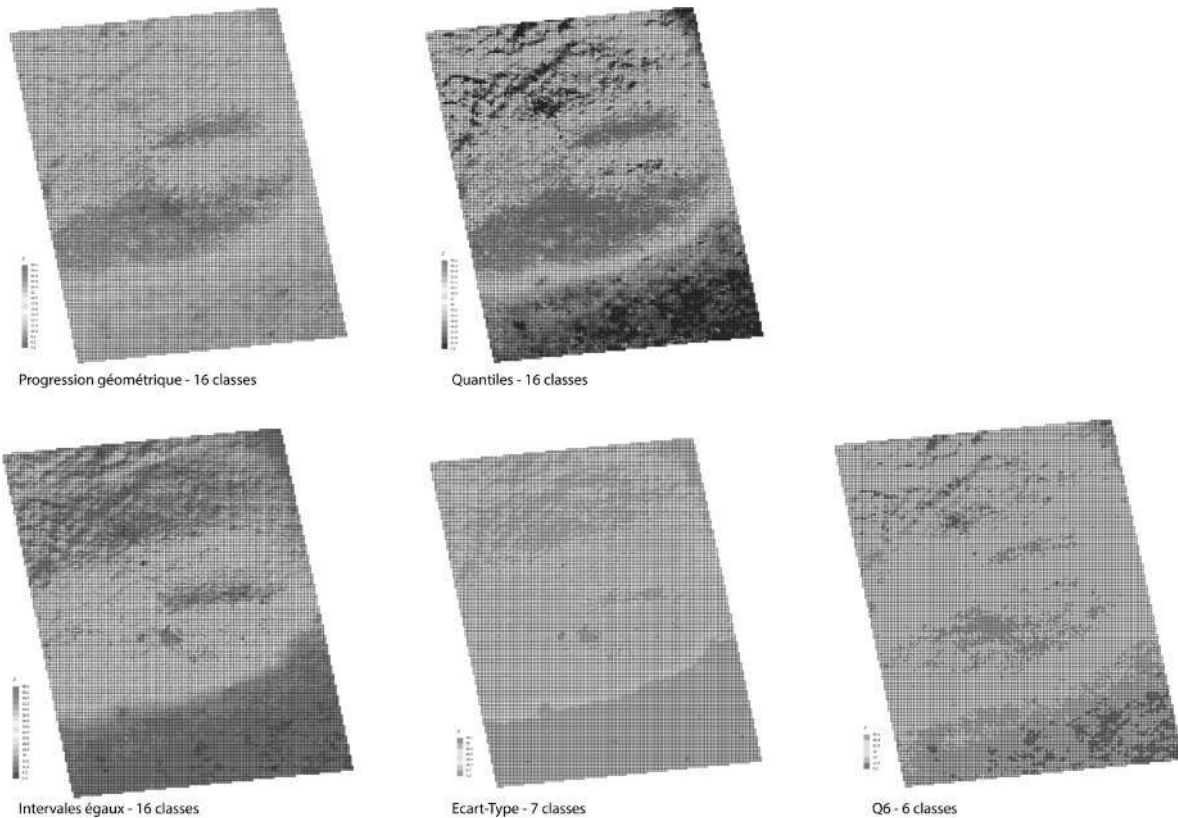


Figure 8 : (Voir planche couleur XII) Tests de discrétisation (réalisés avec l'application Magrit du CNRS).
Figure 8: (See colour plate XII) Discretization tests (carried out with the Magrit application of the CNRS).

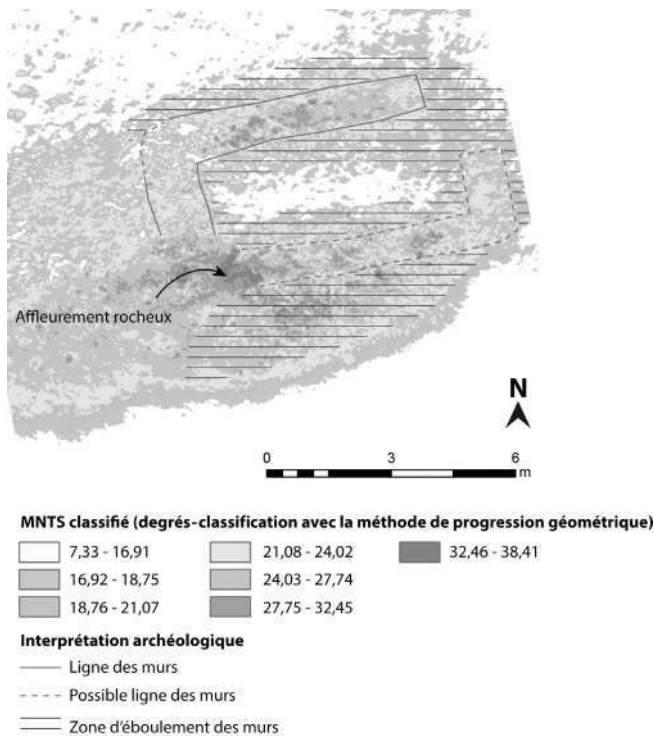


Figure 9 : (Voir planche couleur XII) MNTS classifié suivant la méthode de progression géométrique de la structure AU_015_001.
 Figure 9: (See colour plate XII) MNTS classified according to the geometric progression method of the structure AU_015_001.

Les méthodes de discrétisation des formes de distribution asymétrique sont limitées aux Seuils observés, aux effectifs égaux (quantiles, Q6), à la progression géométrique, à la progression arithmétique, aux Seuils naturels (Jenks) (figure 8). Après plusieurs tests, le choix s'est porté sur la méthode de progression géométrique parce qu'elle permet de mieux représenter les valeurs faibles et qu'elle regroupe les valeurs fortes.

Les valeurs froides (entre 7 et presque 17 degrés Celsius) ont été regroupées; ce qui a permis de mettre l'accent sur les valeurs les plus chaudes et d'écarter les valeurs correspondant à l'ombre. Deux ruptures colorimétriques ont été positionnées à 22 degrés et 27 degrés de façon à mettre du contraste dans les températures chaudes et ainsi y distinguer des variations fines.

La modification du dégradé de couleur, son adaptation aux valeurs de température et à l'objet recherché (figure 8) permet d'observer plus finement le mur nord. Sur 5 m de long et 0,50 m de large deux lignes parallèles de points chauds (entre 27 et 37 degrés Celsius) indiquent la présence d'un mur à double parement de 80 cm de largeur. Pour la face sud se dessine une ligne de températures plus basses (entre 22 et 23 degrés Celsius) qui marque la ligne entre les

vestiges du mur sud en place et son éboulement. Ce mur aurait également une largeur de 80 cm. L'angle sud-ouest (murs ouest et sud) de cette construction prend appui sur un gros bloc rocheux ou du substrat. Ce système d'épaulement à un élément rocheux est très usuel dans ce type de contexte car il permet une stabilisation de l'édifice. La face ouest paraît peu marquée avec des températures allant de 19 à 29 degrés Celsius. La faible incidence thermique de ce mur peut résulter de son mode constructif. En effet, la structure AU_015_001 paraît avoir été installée soit dans une petite dépression, soit dans la pente obligeant un creusement du sol naturel vers l'ouest pour aplanir le sol. Dans ce cas, le mur ouest aurait eu une élévation moins importante que le reste du bâti. La porte d'entrée paraît être située dans l'angle sud-est qui correspond à la zone présentant une TS plus basse et assez homogène. Quant au mur est, il est thermiquement peu marqué (entre 14 et 23 degrés Celsius) et paraît avoir été constitué soit d'une paroi faite partiellement ou totalement en matériaux périssables, soit fait d'un mur en pierre totalement éboulé et recouvert par une épaisseur plus importante de sédiment qui empêcherait la perception de l'incidence thermique de l'éboulis. Enfin, l'image thermique retravaillée interroge sur une possible extension du site vers l'ouest avec la présence d'une trace linéaire thermique chaude pouvant révéler la présence sous-jacente d'un mur ou la poursuite de l'épine du substrat rocheux (figure 9).

Approche par les profils thermiques

Comme pour un Modèle Numérique de Terrain (MNT), il est possible de traiter un MNTS autrement que par la seule définition du meilleur gradient de couleur appliqué aux données.

Sur le MNTS réalisé à Enveitg au niveau de l'anomalie thermique situé à 5 m à l'est de la structure ENV_101_101, plusieurs profils thermiques ont été réalisés (figure 10). Par ces profils, ce qui est recherché est de représenter les valeurs de TS le long d'un axe prédéfini. Ce travail a été réalisé avec le logiciel QGIS et la fonction *Profile Tool*. Les différents tests réalisés montrent qu'il est préférable de positionner les profils thermiques perpendiculairement à l'anomalie et non pas dans leur prolongement. Les profils thermiques obtenus sont des courbes très anguleuses qui demandent à être lissées et généralisées pour en faciliter la lecture. Il est ainsi nécessaire de les recalculer sur la base des moyennes mobiles dans un logiciel tableur de type Excel. Ces profils lissés permettent d'observer les variations d'amplitude et la forme des changements de température.

Les profils thermiques obtenus se lisent comme des profils topographiques. Les pics correspondent aux températures

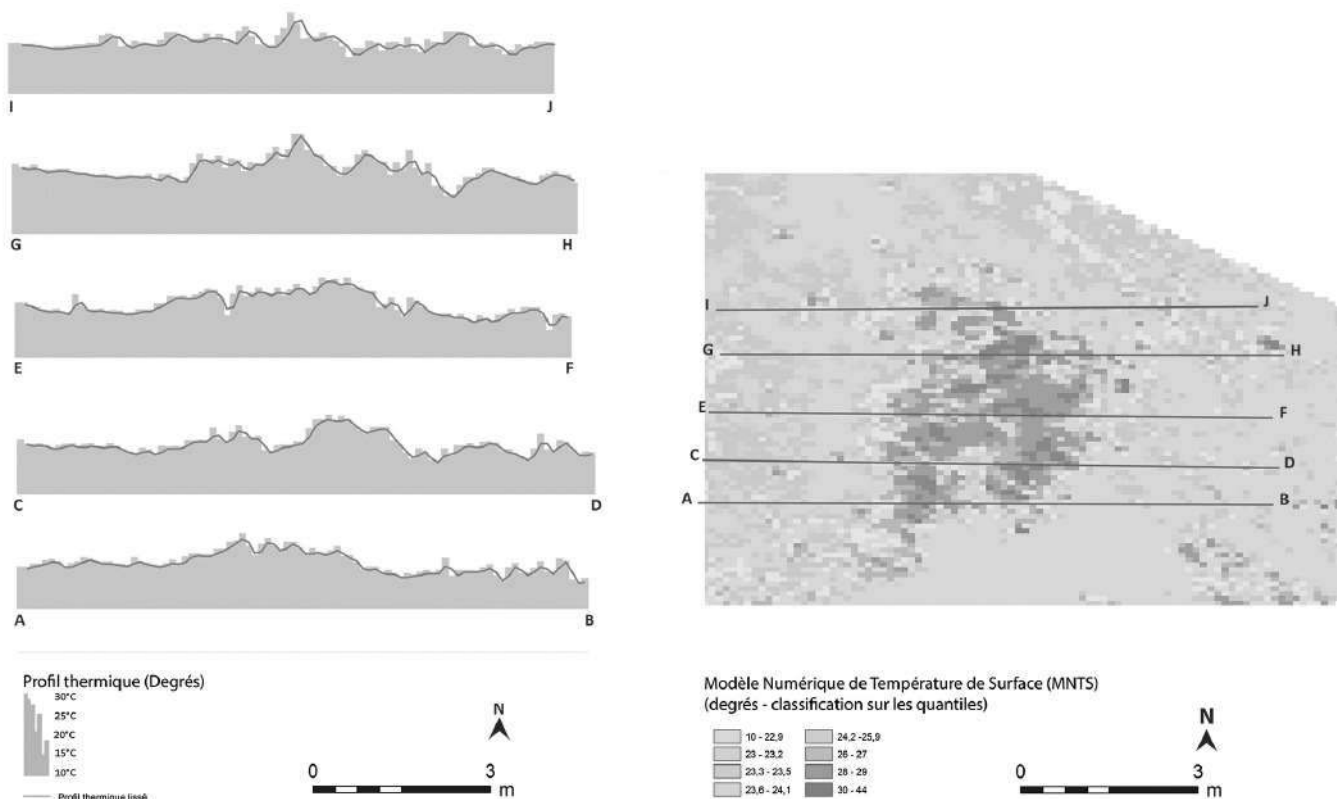


Figure 10 : (Voir planche couleur XIII) Profils des températures sur l'image thermique – zone Nord - Enveitg. Localisation des profils et représentation des profils thermiques brutes et lissés avec les méthodes des moyennes mobiles avec une période de 20 cm.

Figure 10: (See colour plate XIII) Temperature profiles on the thermal image - North zone - Enveitg. Localisation of profiles and representation of raw and smoothed thermal curves using moving average methods with a period of 20 cm.

fortes et les creux à des valeurs thermiques basses. Ainsi, un pic isolé de TS peut indiquer la présence d'un bloc affleurant la surface qui s'est réchauffé plus vite que les sédiments qui l'entourent et un creux peut correspondre à une zone d'ombre ou à une zone plus humide qui se réchauffe plus lentement que les éléments qui l'entourent. De plus, plus l'angle d'incidence de la courbe est fort (quelle que soit sa direction) et plus le changement de température est brutal.

Dans le cas des profils effectués sur l'anomalie thermique à Enveitg, le « lissage » a été calculé suivant la méthode des moyennes mobiles avec un ordre de 20 cm sur l'axe des X (nombre de périodes sur lesquelles la moyenne mobile est calculée). Ces profils thermiques (figure 10) montrent, de part et d'autre de l'anomalie, de légères fluctuations de la courbe de température, entre 20 et 22 degrés, qui signent un couvert végétal non uniforme avec la présence de quelques blocs épars. Ces légères variations se retrouvent sur l'ensemble des profils thermiques, excepté au niveau de l'anomalie thermique où l'on note sur les profils une très nette

augmentation de la température (entre 25 et 42 degrés). Les profils thermiques G-H, E-F et C-D présentent, au niveau de l'anomalie, une hausse des températures indicatrice de la présence sous-jacente d'une masse de pierre plus importante à cet emplacement. Le profil C-D est marqué par deux hausses de température sur 0,80 m de large espacé de 1 m.

Le même type de traitement a été reproduit sur le MNTS de la structure AU_015_001 du secteur d'Avays dans la Réserve Naturelle d'Aulon. Six profils d'axe nord-est/sud-ouest ont été effectués puis lissés avec la méthode des moyennes mobiles avec un ordre de 30 cm sur l'axe des X. (figure 11). Tout comme sur Enveitg, les profils thermiques montrent ici aussi une différence de température entre le bâti et l'extérieur. Les alentours de la construction sont thermiquement presque « atones » et seulement marqués de quelques pics de température qui signalent la présence de blocs épars. Cette uniformité thermique est rompue par la présence de la structure. Avec une moyenne de température située aux alentours de 16 degrés Celsius, l'intérieur même

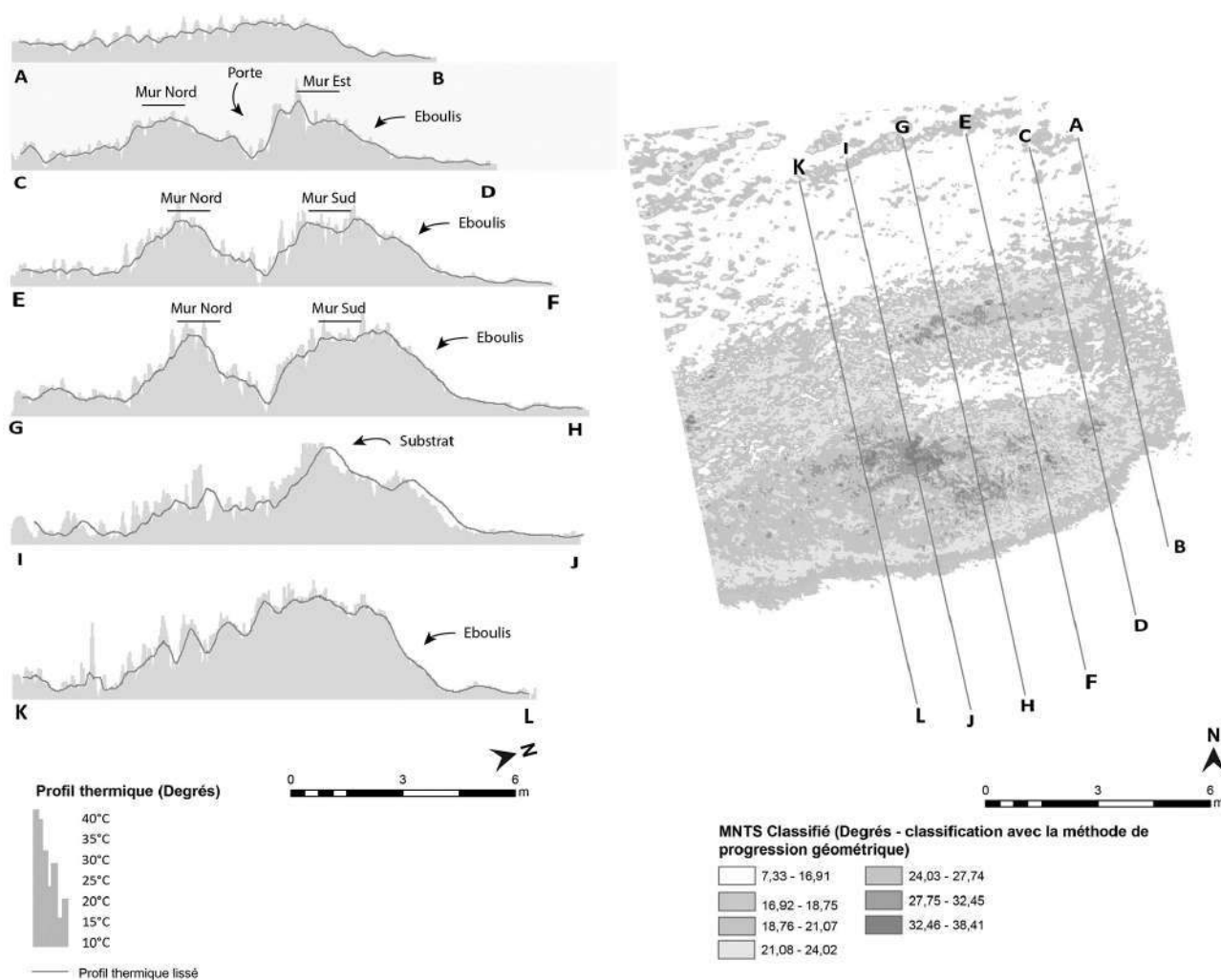


Figure 11 : (Voir planche couleur XIII) Profils thermiques bruts et lissés (méthodes moyennes mobiles avec un ordre de 30) réalisés au niveau de la structure AU_015_001 – Secteur d’Avays (Réserve Naturelle d’Aulon).

Figure 11: (See colour plate XIII) Raw and smoothed thermal profiles (moving average methods with an order of 30) carried out at the level of the structure AU_015_001 - Avays sector (Aulon Natural Reserve).

du bâtiment est thermiquement bas et correspond à l’extérieur de la structure. Les profils C-D, E-F, G-H et I-J soulignent l’incidence thermique des murs de cette construction ainsi que celle laissée par la masse de leurs éboulis. À l’emplacement des murs la TS peut plus que tripler (passer de 11 à 38 degrés) par rapport à l’environnement immédiat. Les augmentations de température brusques, notables par un fort angle d’incidence du profil, suivie d’un « plateau thermique » sont les indicateurs de la présence sous-jacente d’un mur (la masse des blocs qui constitue le mur est identique sur toute sa largeur). Les pics dépassant de ces plateaux notent la présence de pierres affleurant ou dépassant la couverture végétale qui recouvre la structure. Lorsque cette augmentation est tout aussi importante mais avec un angle

d’incidence plus faible, cela désigne la présence de l’éboulis d’un mur. Le profil C-D permet de confirmer la localisation de la porte du bâtiment dans l’angle nord-est. En effet, le mur nord, qui forme le jambage droit de la porte, est perceptible par une hausse de température, un plateau thermique, et une chute des températures au niveau de la porte, suivie d’une remontée de la TS qui marque la présence du mur de la face est. Quant au substrat rocheux sur lequel s’appuie l’angle sud-ouest de la structure, il ne se traduit pas thermiquement par une hausse très importante des températures (profil I-J) par rapport aux murs. À son emplacement la TS fluctue entre 30 et 34 degrés.

4. DISCUSSION / CONCLUSIONS

Sur le secteur d'Enveitg, l'investigation thermographique à partir de clichés obliques réalisés en 2018 avait pour objectif la détection de structures archéologiques enfouies. Elle a d'ailleurs permis de localiser et préciser une anomalie de la TS à 10 m au nord de la structure ENV-001-122. En analysant cette irrégularité (figure 10), sa forme générale (rectangulaire), la présence d'un angle droit au nord-est et de deux lignes parallèles de 80 cm de large (qui est la largeur la plus courante pour des murs de structures pastorales d'altitude) (Rendu *et al.*, 2016) pourraient être des indicateurs permettant de l'identifier comme étant le marqueur de la présence d'une structure anthropique sous la couverture végétale. Toutefois, la faible distance, 1 m, qui sépare les deux lignes parallèles interroge. Certaines infrastructures pastorales sont étroites, comme les couloirs de traite, mais ce type d'aménagement s'étend *a minima* sur une dizaine de mètres alors que cette anomalie se développe sur 6 m de long. La masse de blocs au nord de l'anomalie thermique interpelle également. Elle n'est pas située dans le prolongement des deux lignes parallèles, mais légèrement décalée dans l'angle nord-est. S'agit-il du substrat qui affleure ou résulte-t-elle du processus de destruction d'un bâtiment qui serait visible par les deux lignes parallèles plus chaudes ?

Dans le cas présenté ici, la thermographie aéroportée par drone ne fournit pas suffisamment d'information pour pouvoir identifier avec certitude l'anomalie comme étant indicatrice de la présence d'une structure archéologique sous-jacente. Elle marque toutefois une zone d'interrogation et d'intérêt qui devra être inspectée de façon ciblée avec d'autres outils non-invasifs tels que le géoradar ou le magnétomètre.

Sur le secteur d'Avays dans la Réserve Naturelle d'Aulon, la thermographie aéroportée par drone avec des prises de vues zénithales à basse altitude permet une observation fine des modes constructifs d'une structure archéologique repérée lors d'une prospection pédestre : localisation de la porte, identification d'une architecture avec des murs à double parement et d'un épaulement du bâti sur un ressaut du substrat rocheux dans l'angle sud-ouest, délimitation des murs et de leurs éboulis. Elle ouvre également à des interrogations sur le travail préalable du terrain et questionne sur un possible surcreusement ou sur une installation du bâtiment en exploitant un relief naturel existant.

Ces deux séries d'acquisition interpellent également sur la traduction thermique de la profondeur des vestiges archéologiques. En d'autres termes, est-ce que l'amplitude des variations de la TS visible sur les images thermiques et sur

les profils thermographiques peut être significative de la profondeur des vestiges, de leur volume et/ou de leur proximité par rapport à la surface ?

De la détection d'anomalies thermiques indicatrices de la présence de structures enfouies à l'amélioration de la perception des modes constructifs, la thermographie aéroportée par drone est un outil à valoriser et à intégrer dans le cadre des programmes de détection archéologique en montagne et à tester dans d'autres milieux. Toutefois, utiliser un capteur thermique en archéologie demande de pousser l'analyse des images et d'aller au-delà de la simple constatation visuelle d'une variation du gradient de couleur appliqué automatiquement par le logiciel propriétaire. Il faut sortir de ces cadres trop « restrictifs » et traiter l'information thermique différemment. Cette ouverture à d'autres traitements des données thermographiques peut notamment passer par la réalisation d'un Modèle Numérique de Température de Surface (MNTS) et de profils thermographiques. C'est la mise en évidence des variations de TS, l'analyse de leur distribution spatiale et la confrontation des points de vue entre les profils et la vision planimétrique qui sont les plus riches de renseignement.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des partenaires institutionnels du programme de recherche TAHMM : le CNRS, l'Université Toulouse Jean-Jaurès, le Ministère de la Culture, la Réserve Naturelle d'Aulon, le Parc National des Pyrénées ainsi que les laboratoires TRACES (UMR 5608), FRAMESPA (UMR 5136) et GEODE (UMR 5602).

Bibliographie

- Agudo, P.-U., Pajas, J.-A., Pérez-Cabello, F., Redon, J.-V., Ezquerro Lebron, B., 2018. The potential of drones and sensors to enhance detection of archaeological cropmarks: A comparative study between multi-spectral and thermal imagery. *Drones*, 2(3), 29.
- Badey, S. 2017. Atelier Archéomatique 17.1 : l'analyse par maille : un outil d'aide à l'analyse et de représentation cartographique quantitative. École thématique. *Les Ateliers Archéomatiques*, MSH Val de Loire, 29.
- Bal, M.-C., Rendu, C., Ruas, M.-P., Campmajo, P., 2010. Paleosol charcoal: Reconstructing vegetation history in relation to agro-pastoral activities since the Neolithic. A case study in the Eastern French Pyrenees. *Journal of Archaeological Science*, 37: 1785-1797.

- Barker, G., Grant, A., Beavitt, P., Christie, N., Giorgi, J., Hoare, P., Leggio, T., Migliavacca, M., 1991. Ancient and modern pastoralism in central Italy: an interdisciplinary study in the Cicolano mountains. *Papers of the British School at Rome*, 59: 15-88.
- Bellerby, T., Noel, M., Branigan, K., 1990. A thermal method for archaeological prospection: preliminary investigations. *Archaeometry*, 32, (2): 191-203.
- Cailloce, L., 2015. Les drones, nouveaux outils de la recherche. *Le journal du CNRS*.
- Calastrenc, C., Baleux, F., Calastrenc, J.-P., Poirier, N., Philippe, M., Rendu, C., 2018. Programme Télédétection Archéologique en Haute et Moyenne Montagne (T.A.H.M.M.). Campagne 2018. Rapport de recherche.
- Calastrenc, C., Ona, J.-L., Rivas, F.-A., 2006. *Inventario de cabañas y otras construcciones historicas en el puerto de Gorgutes-La Glera*, 2 tomes.
- Calastrenc, C., Ona, J.-L., Rivas, F.-A., 2005. *Inventario de cabañas y otras construcciones historicas en el entorno del Portillon y el puerto de la Picada (Benasque, Huesca)*, 3 tomes.
- Calastrenc, C., Ona, J.-L., Rivas, F.-A., 2004. *Inventario de cabañas y otras construcciones historicas en el Pllan del Hospital (Benasque, Huesca)*, 5 tomes.
- Casana, J., Wiewel, A., Cool, A., Hill, A. C., Fisher, K. D., Laugier, E. J., 2017. Archaeological Aerial Thermography in Theory and Practice. *Adv. archaeol. pract.*, 79: 1-18.
- Casana, J., Kantner, J., Wiewel, A., Cothren, J., 2014. Archaeological aerial thermography: A case study at the Chacora Blue J community, New Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 45: 207-219.
- Eppelbaum, L., 2009. Near-surface temperature survey: An independent tool for delineation of buried archaeological targets. *Journal of Cultural Heritage*, 10 (Supplément 1): 93-103.
- Ferdière, A., Fourteau, A. M., 1979. Gestion des archives du sol en milieu rural. Expérience de prospection systématique à Lion-en-Beauce (Loiret). *Revue d'Archéométrie*, 3 : 67-96.
- Ferdière, A., Zadora-Rio, E., 1986. La prospection archéologique : paysage et peuplement. Actes de la table ronde des 14 et 15 mai 1982, Paris. *Documents d'Archéologie Française*. Maison des sciences de l'homme, Paris, 3.
- Garcia Casas, D., 2018. Arqueologia d'un territori d'alta muntanya del Pirineu central. Persones, ramats i prats al llarg de la història al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici. Thèse, Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne.
- Gassiot Ballbè, E., 2016a. Arqueologia del pastoralisme en el Parque Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici Montañas humanizadas. Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente. Ministerio Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Gassiot Ballbè, E., Clemente Conte, I., Mazzucco, N., Garcia Casas, D., Obea Gomez, L., Rodriguez Anton, D., 2016b. Surface surveying in high mountain areas, is it possible? Some methodological considerations. *Quaternary International*, 402: 35-45.
- Gassiot Ballbè, E., Rodríguez-Antón, D., Pèlachs, A., Pérez Obiol, R., Julià, R., Bal, M. C., Mazucco, N., 2013. La alta montaña durante la Prehistoria: 10 años de investigación en el Pirineo catalán occidental. *Revista Prehistoria Alpina*, 71 (2): 261-281.
- Guédon, F., 2013. Prospection archéologique de deux sites de hauteur du luchonnais. *Revue de Comminges et des Pyrénées centrales*, 143-166.
- Guédon, F., 2006. Occupation du sol et peuplement en montagne des origines aux temps modernes : le Haut Lavedan. Thèse, Université du Mirail, Toulouse, France.
- Guillot, F., 2017. Rapport de sondages archéologiques (Soulcem – Auzat [09]) 2017. Pour une archéologie de la montagne. Rapport de recherche.
- Hesse A., Tabbagh, A., 1993. Problèmes de reconnaissance géophysique de limites parcellaires non cadastrées. *Histoire & Mesure*, 8, (3-4) : 207-223.
- Hill, A. C., Laugier, E. J., Casana, J., 2020. Archaeological Remote Sensing Using Multi-Temporal, Drone-Acquired Thermal and Near Infrared (NIR) Imagery: A Case Study at the Enfield Shaker Village, New Hampshire. *Remote Sensing*, 12, (4): 690.
- Huntsberger, D. V., 1962. *Elements of statistical inference*. Prentice-hall, London.
- Jégou, L., 2013. Vers une nouvelle prise en compte de l'esthétique dans la composition de la carte thématique : propositions de méthodes et d'outils. Histoire. Thèse, Université Toulouse le Mirail, Toulouse II, France.
- Le Couédic, M., Calastrenc, C., Rendu, C., 2019. Artefacts et écofacts d'une archéologie de l'estivage dans la longue durée. In G. Indino (dir.). *Penser, traduire et transmettre l'artefact dans ses facettes multiples. Production et échange interdisciplinaire et transfrontalier, de l'Antiquité à nos jours. Actes des journées de l'École doctorale Sciences Sociales et Humanités 4. Actes des journées de l'École doctorale Sciences Sociales et Humanités 4*. Presses universitaires de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, 223-253.
- Le Couédic, M., Champagne, A., Contamine, T., Coughlan, M., Gragson, T., Haley, B. S., 2014. Rapport de prospection et sondages, Larrau, Pyrénées-Atlantiques. Campagne 2014. Rapport de recherche.
- Le Couédic, M., 2010. Les pratiques pastorales d'altitude dans une perspective ethnoarchéologique. Cabanes, troupeaux et territoires pastoraux pyrénéens dans la longue durée. Thèse, Université François Rabelais, Tours, France.
- Lunden, B., 1985. Aerial Thermography—A Remote Sensing Technique Applied to Detection of Buried Archaeological Remains at a Site. *Dalecarlia, Sweden. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 67, (1-2): 161-166.

- Mientjes, A., 2010. Pastoral Communities in the Sardinian Highlands (Italy): A View on Social Mobility. *Ethnos*, 75, (2): 148-170.
- Mientjes, A., 2004. Modern pastoral landscapes on the island of Sardinia (Italy). Recent pastoral practices in local versus macro-economic and macro-political contexts. *Archaeological Dialogues*, 10, (2): 161-190.
- Mocci, F., Palet, J.-M., Martinez, S. M., Tzortzis, S., Walsh, K., 2005. Peuplement, pastoralisme et modes d'exploitation de la moyenne et haute montagne depuis la Préhistoire dans le Parc National des Écrins. In F. Verdin et A. Bouet. *Territoires et paysages de l'âge du Fer au Moyen Âge. Mélanges offerts à Philippe Leveau*. Collection Ausonius, Presses universitaires de Bordeaux, Bordeaux, 197-212.
- Orengo, H., 2010. Arqueologia de un paisaje cultural pirenaico de alta montaña. Dinámicas de ocupación del valle del Madriu-Perafita-Claror (Andorra). PhD Thesis, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España.
- Oucherif, A. 2017. Proposition d'un filtre d'image satellite pour la localisation des zones potentiellement humides sur le département de la Drôme. Irstea, Lyon, 48.
- Paegelow, M. 2000. Expression (carto-)graphique. Chap 10. Traitement statistique de l'information : la discrétisation. De <http://sigfrance.free.fr/ressources/filebrowser/downloads/Cours%20cartographie/pdf/lc10.pdf>.
- Palet, J. M., Orengo, H. A., Ejarque, A., Miras, Y., Euba, I., Riera, S., 2013. Arqueologia de paisajes altimontanos pirenaicos: formas de explotación y usos del medio en época romana en valle del Madriu-Perafita-Claror (Andorra) y en la Sierra del Cadí (Alt Urgell). In J. L. Fiches, R. Plana et V. Revilla. *Paysages ruraux et territoires dans les cités de l'Occident romain. Gallia et Hispania. Actes du colloque international AGER IX (Barcelona, del 25 al 27 de març de 2010)*. Mondes anciens, Presses Universitaires de la Méditerranée, Montpellier, 329-340.
- Palet, J. M., Martinez, J.-P., Ejarque, A., Miras, Y., 2007. Itxaso Euba, Hector H. Orengo, et al. Formes d'ocupació d'alta muntanya a la serra del Cadí (Alt Urgell) i la vall de Madriu-Perafita Claror (Andorra): estudi diacrònic de paisatges culturals pirenencs. *Tribuna d'Arqueologia*, 229-254.
- Pasquinucci, M., Trément, F., 2000. Non-Destructive Techniques Applied to Landscape Archaeology. In *The Archaeology of Mediterranean Landscapes*. Oxbow Books, Oxford.
- Poirier, N., 2018. From Archaeological Evidence for Agricultural Manuring to an Understanding of Settlement and Landscape Dynamics: In Experiment in Non-invasive Archaeological Methods Undertaken in South-West France. In C. Keller et C. Wohlfarth. *Funde in der Landschaft. Neue Perspektiven une Ergebnisse archäologischer Prospektionen*, 26 (LVR-Amt für Bodendenkmalpflege im Rheinland), Materialien zur Bodendenkmalpflege im Rheinland: 41-54.
- Poirier, N., Hautefeuille, F., 2018. Beyond the snapshots: Modeling Landscape dynamics from spatial statistics to geovisualization techniques. A case study from South-West France. *Reflecting Futures - 24th Annual Meeting of the European Association of Archaeologists*, Barcelona, Spain.
- Poirier, N., Hautefeuille, F., Calastrenc, C., 2017. L'utilisation des micro-drones pour la prospection archéologique à basse altitude. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 213-214, (1) : 81-94.
- Poirier, N., Hautefeuille, F., Calastrenc, C. 2013. Low Altitude Thermal Survey by Means of an Automated Unmanned Aerial Vehicle for the Detection of Archaeological Buried Structures. *Archaeological Prospection*, 20, (4): 303-307.
- Poirier, N., 2010, *Un espace rural à la loupe. Paysage, peuplement et territoires en Berry de la préhistoire à nos jours*. Presses Universitaires François-Rabelais, Tours.
- Reitmaier, T., Lambers, K., Walser, C., Zingman, I., Haas, J. N., Dietre, B., Reidl, D., Hajdas, I., Nicolussi, K., Kathrein, Y., Naef, L., Kaiser, T., 2013, Alpine Archäologie in der Silvretta. *Archäologie Schweiz*, 36, (1): 4-15.
- Reitmaier, T., 2012, Letzte Jäger, erste Hirten. Hochalpine Archäologie in der Silvretta 2007-2012. Edition Somedia, Glarus.
- Reitmaier, T., 2010. Auf der Hut – Methodische Überlegungen zur prähistorischen Alpwirtschaft in der Schweiz. In F. Mandl et H. Stadler (eds). *Archäologie in den Alpen: Alltag und Kult. Haus im Ennstal: ANISA*. Verein für alpine Forschung, 219-238.
- Rendu, C., Calastrenc, C., Le Couédic, M., Berdoy, A., 2016. *Estives d'Ossau. 7000 ans de pastoralisme dans les Pyrénées*. Édition Pas d'Oiseau, Toulouse.
- Rendu, C., Passarius, O., Calastrenc, C., Julia, R., Llubes, M., Illes, P., Campmajo, P., Jordy, C., Crabol, D., Bille, E., Conesa, M., Bbousquet, D., Lallemand, V., 2015. Reconstructing past terrace fields in the Pyrenees insights into land management and settlement from the Bronze Age to the Early Modern era at Vilalta (1650 masl, Cerdagne, France). *Journal of Field Archaeology*, 40: 1-20.
- Rendu, C., Campmajo, P., Crabol, D., 2012. Étagement, saisonnalité et exploitation des ressources agro-pastorales en montagne à l'âge du bronze. Une possible « ferme d'altitude » à Enveig (Pyrénées-Orientales). *Bulletin de l'Association pour la Recherche sur l'Âge du Bronze*, 58-61.
- Rendu, C., Bille, E., Conesa, M., Campmajo, P., Crabol, D., 2009. Margins and centers in the shaping of the Pyrenean slopes. Medieval dynamics within the long-term perspective. In J. Klapste et P. Sommer (eds). *Medieval rural settlement in marginal landscape. Ruralia VII*, Brepols, Cardiff, 235-251.
- Rendu, C., 2003. *La montagne d'Enveig. Une estive pyrénéenne dans la longue durée*. Trabucaire, Perpignan.

- Rendu, C., 2002. Pistes et propositions pour une archéologie de l'estivage à partir d'une expérience dans les Pyrénées de l'Est : Dossier spécial sur Les Habitats et systèmes pastoraux d'altitude (Pyrénées, Alpes, Massif Central). L'occupation de la haute montagne. *Archéologie du Midi Médiéval*, 147-157.
- Rendu, C., 2000. Fouiller des cabanes de berger pourquoi faire?. *Études rurales*, 151-176.
- Rendu, C., Campmajo, P., Davasse, B., Galop, D. 1995. Habitat, environnement et systèmes pastoraux en montagne : acquis et perspectives de recherches à partir de l'étude du territoire d'Enveig. *X Colloqui internacional d'arqueologia de Puigcerda*, 661-675.
- Saint-Sever, G., Remicourt, M., Soula, F., 2016. Fouille Archéologique de la Haille de Pout, Cirque de Troumouse, Gèdre (Hautes-Pyrénées), Rapport de fouille programmée.
- Sturges, H., 1926. The choice of a class-interval. *J. Amer. Statist. Assoc.*, 21, (153): 65-66.
- Tabbagh, A., Scollar, I., Hesse, A., Herzog, I., 1990. *Archaeological prospecting and remote sensing. Topics in Remote Sensing 2*. Cambridge University Press, Cambridge, 674 p.
- Tabbagh, A. 1983. Choix de la date optimale de prise de vue en prospection thermique aéroportée de structures archéologiques. *Photointerprétation*. Tecnip, Paris, n° 3, fascicule 6.
- Tabbagh, A., 1977. II-Prospections thermiques et électriques - Habitat néolithique de fond de vallée alluviale à Noyen-sur-Seine (Seine-et-Marne). *Gallia Préhistoire*, 271-280.
- Trément, F., 2011. La prospection au sol systématique. In *Les Arvernes et leurs voisins du Massif Central à l'époque romaine. Une archéologie du développement des territoires*, 51-96.
- Walsh, K. J., Tzortzis, S., Mocci, F., Defrasne, C., Talon, B., 2019. L'occupation préhistorique et protohistorique de la montagne et de l'abri Faravel dans le parc national des Écrins (Hautes-Alpes, France), In *Collection EDYTEM: L'Homme dans les Alpes, de la Pierre au Métal*. Chambéry, 20.
- Walsh, K., Mocci, F., Bressy, C., Delestre, X., 2010. Les Ecrins, un territoire d'altitude dans le contexte des Alpes occidentales de la Préhistoire récente jusqu'à l'Âge du Bronze (Hautes-Alpes, France). In S. Tzortzi et X. Delestre (eds). *Archéologie de la Montagne Européenne*, 211-225.
- Walsh, K., Mocci, F., Court-Picon, B., Richer, S., 2009. Archéologie et paléoenvironnement dans les Alpes méridionales françaises. Hauts massifs de l'Argentiérais, du Champsaur et de l'Ubaye (Hautes-Alpes et Alpes de Haute Provence) (Néolithique final – début de l'Antiquité). *Cahiers de Paléoenvironnement*, 6 : 235-254.
- Walsh, K., 2005. Risk and marginality at high altitudes : new interpretations from fieldworks on the Faravel Plateau, Hautes-Alpes, *Antiquity*, 79, (304): 289-305.

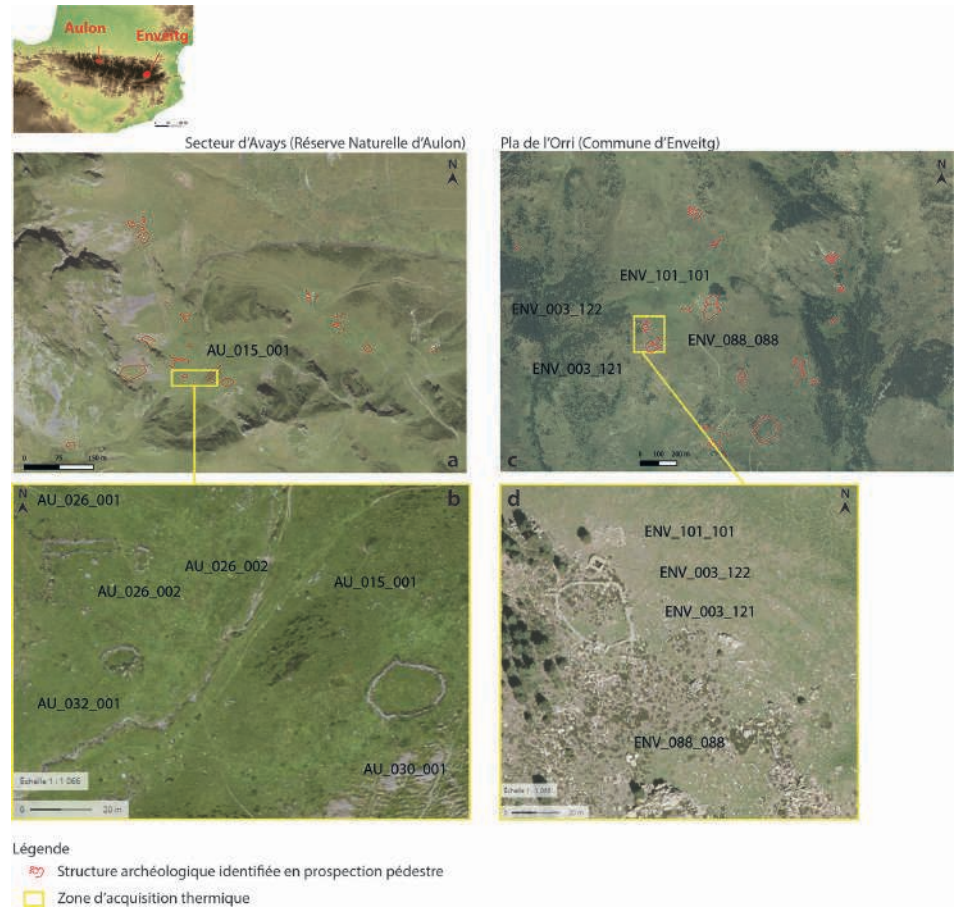


Figure 1 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 84)

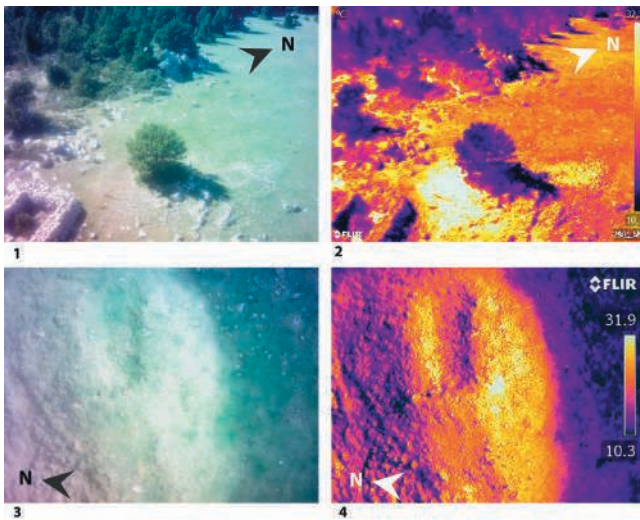


Figure 2 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 85)

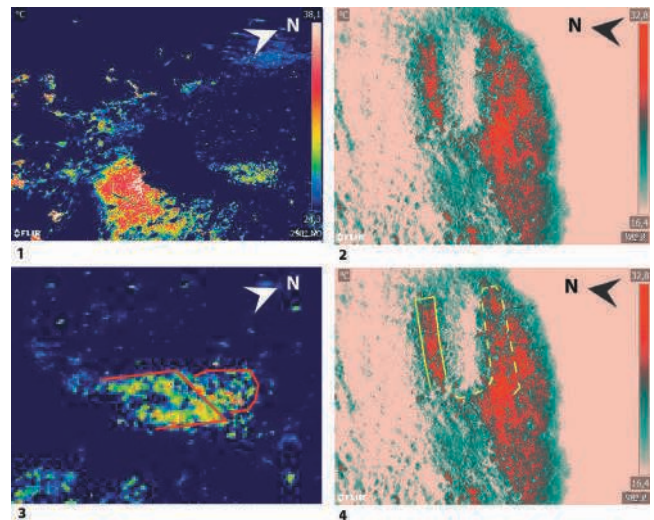


Figure 3 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 85)

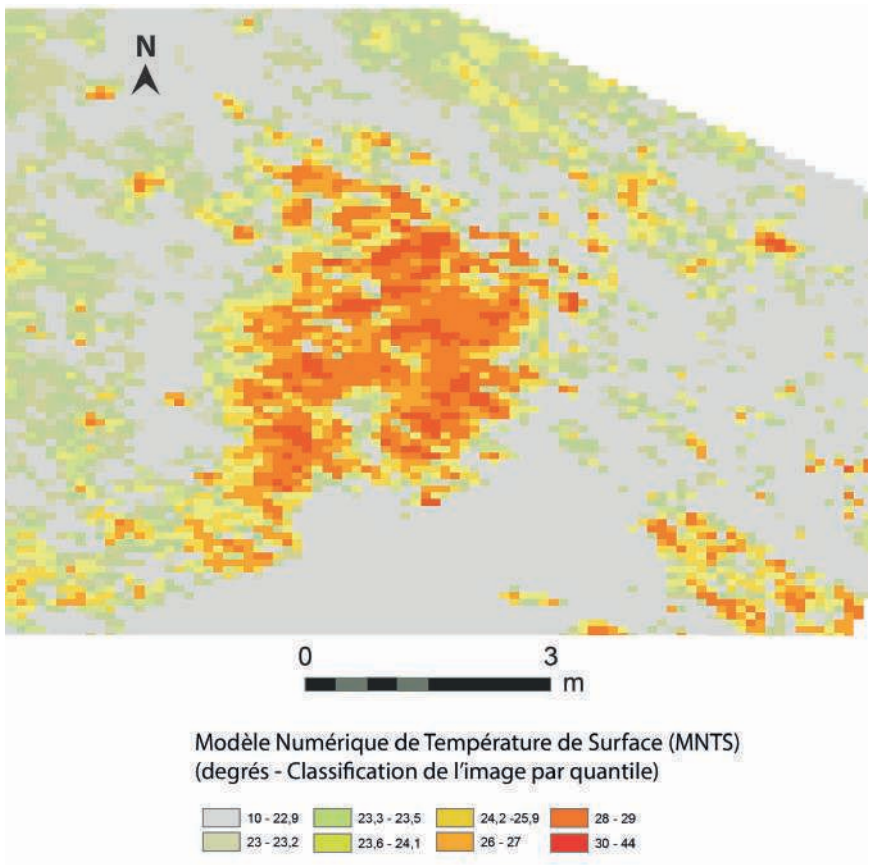


Figure 5 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 87)

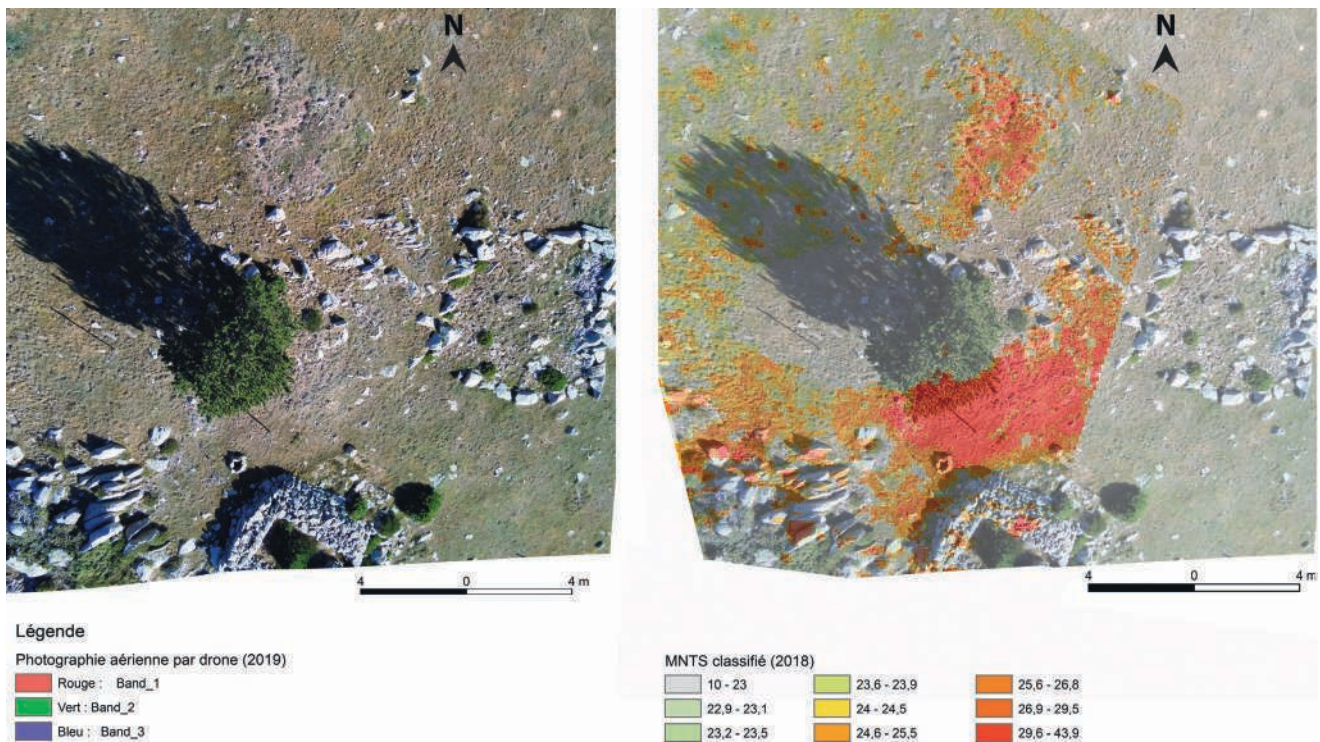


Figure 6 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 88)

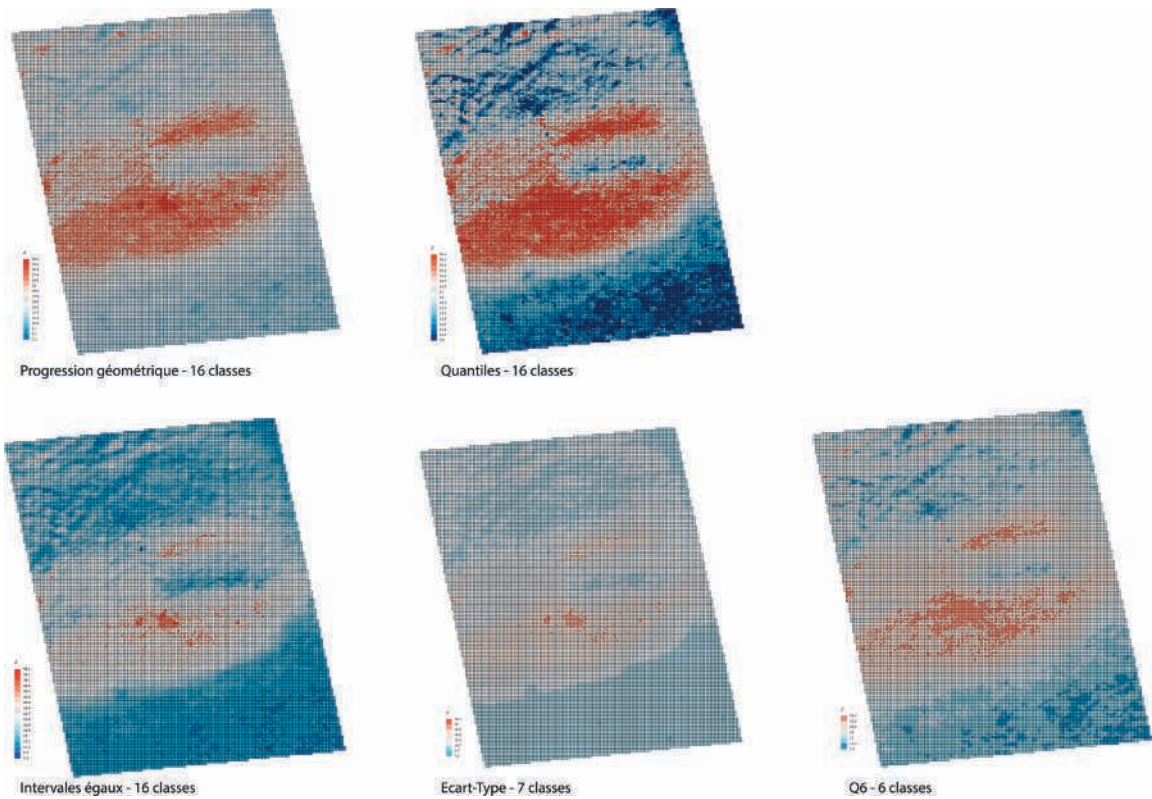


Figure 8 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 89)

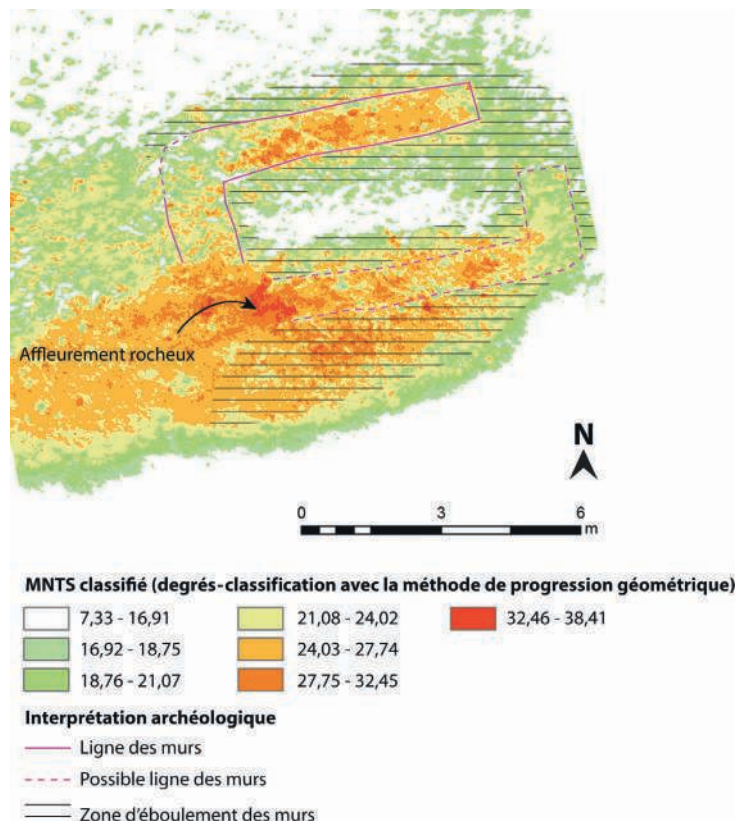


Figure 9 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 90)

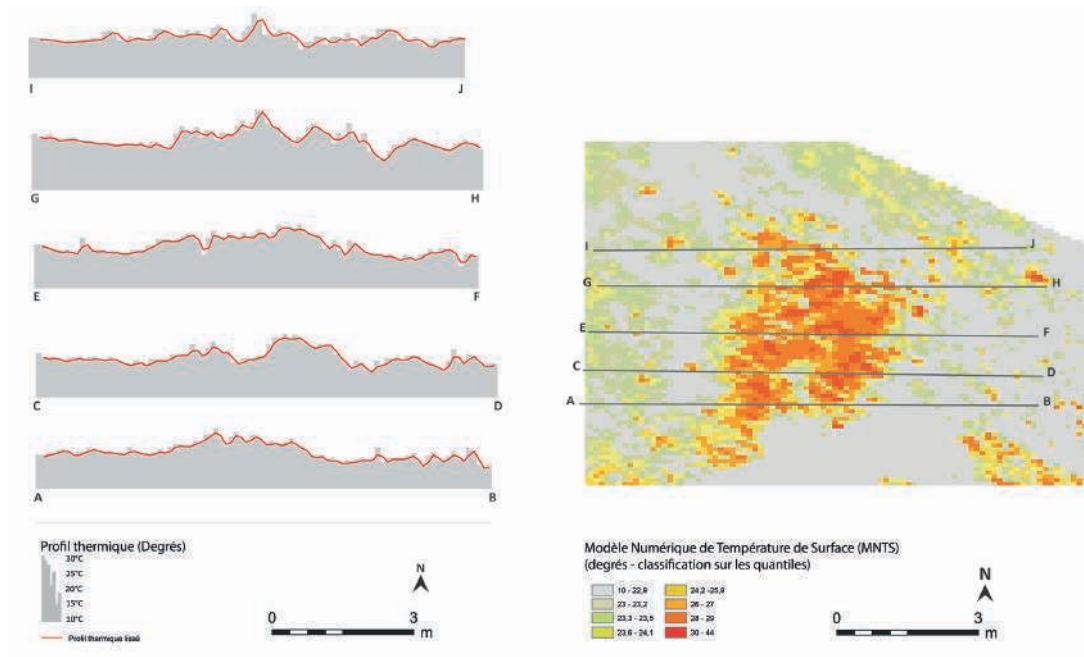


Figure 10 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 91)

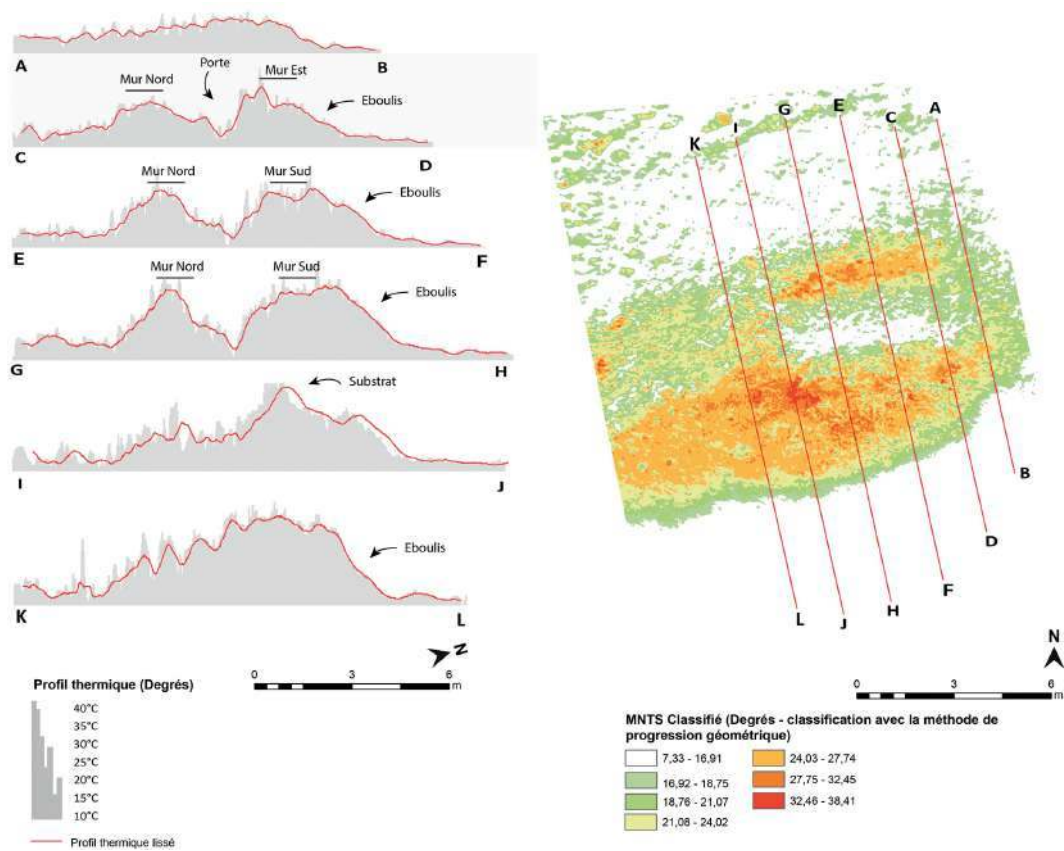


Figure 11 : Carine CALASTRENC *et al.*, Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne (p. 92)