



HAL
open science

Inspecter les montagne autrement

Carine Calastrenc, François Baleux, Nicolas Poirier, Christine Rendu, Pierre Campmajo, Nicolas Dobigeon, Nicolas Mellado, Claire Marais-Sicre, Marie-Claude Bal, Magali Philippe, et al.

► **To cite this version:**

Carine Calastrenc, François Baleux, Nicolas Poirier, Christine Rendu, Pierre Campmajo, et al.. Inspecter les montagne autrement. Bertoncello Frédérique; Ouriachi Marie-Jeanne; Nuninger Laure; Favory François. Dynamiques des peuplements, des territoires et des paysages: Bilan et perspectives en archéologie spatiale, hommages à Jean-Luc Fiches - Settlement, territory and landscape dynamics: Assessment and prospects in spatial archaeology, tribute to Jean-Luc Fiches - Actes des 42es rencontres internationales d'archéologie et d'histoire – Nice Côte d'Azur des 12-14 octobre 2022, sous la direction de Frédérique Bertoncello, Marie-Jeanne Ouriachi, Laure Nuninger, François Favory, CEPAM – UMR 7264 - Université Côte d'Azur – CNRS, 2023, Actes des Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire et d'Antibes, 2-904110-65-8. hal-04264415

HAL Id: hal-04264415

<https://hal.science/hal-04264415v1>

Submitted on 17 Nov 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.

INSPECTER LES MONTAGNES AUTREMENT

Renouvellement méthodologique de la prospection archéologique des terrains d'altitude

Carine Calastrenc^{a,b}, François Baleux^a, Nicolas Poirier^a, Christine Rendu^b, Pierre Campmajo^a, Nicolas Dobigeon^c, Nicolas Mellado^d, Claire Marais-Sicre^e, Marie-Claude Balf, Magali Philippe^f, Muriel Llubes^g

Résumé

Il aura fallu plusieurs décennies d'interactions et de dialogue entre sciences humaines et sciences de l'environnement, et une somme d'avancées méthodologiques pour que les espaces d'altitude soient envisagés autrement qu'immuable et atones. Soumis à des questionnements interdisciplinaires intégrés, ils révèlent non pas une, mais des histoires et des dynamiques complexes. En historicisant les espaces de montagne, c'est le point de vue global sur les sociétés que l'on inverse et c'est la totalité des systèmes valléens qui sont reconsidérés.

Force est de constater que les équipes impliquées dans ces recherches se trouvent confrontées au problème de l'acquisition de l'information primaire. Préalable indispensable à toute recherche en archéologie, la prospection en haute montagne a des spécificités et des enjeux méthodologiques particuliers. Comment aller au-delà du seuil du visible en surface (de murs conservés en élévation aux microreliefs) pour enrichir l'information avec les infrastructures faites en matériaux périssables ou recouvertes de végétation ? Comment systématiser l'acquisition pour arriver à traiter, plus vite, de plus grands territoires ?

Abstract

It took several decades of interaction and dialogue between human sciences and environmental sciences, as well as a number of methodological advances, for high-altitude spaces to be considered as something other than immutable and static. Subjected to coordinated interdisciplinary studies, they reveal not one, but many complex histories and dynamics. By historicising mountain areas, the global point of view on societies is inverted and all of the valley systems are reconsidered.

It is clear that the teams involved in this research are faced with the problem of acquiring primary information. An essential prerequisite for any archaeological research, high-mountain field survey has its own specificities and particular methodological challenges. How can we go beyond the threshold of the visible surface (from walls in elevation to micro-reliefs) to enrich the information with infrastructures made of perishable materials or covered by vegetation ? How can we systematise the acquisition to be able to process larger regions more quickly ?

Technological advances (photogrammetry, thermography, lidar, ground-penetrating radar, magnetometry, chemical ana-

a. Laboratoire TRACES (UMR 5608), Toulouse.

b. Laboratoire FRAMESPA (UMR 5136), Toulouse.

c. Toulouse INP, Laboratoire IRIT (UMR 5505), Toulouse.

d. Laboratoire IRIT (UMR 5505), Toulouse.

e. Université Paul Sabatier, Laboratoire CESBIO (UMR 5123), Toulouse.

f. Laboratoire GEODE (UMR 5602), Toulouse.

g. Université Paul Sabatier, Laboratoire GET (UMR 5563), Toulouse.

Les avancées technologiques (photogrammétrie, thermographie, Lidar, géoradar, magnétomètre, analyse chimique des sols), la diversification et la miniaturisation des capteurs, la démocratisation et le développement des drones aériens, qui permettent la répétabilité des acquisitions, ouvrent la réflexion à la mise en place de nouvelles procédures d'acquisition de l'information archéologique. Les outils de traitement des données, le travail en ergonomie des logiciels et l'ouverture du champ des possibles qu'offre l'intelligence artificielle permettent d'entrevoir les futures possibilités d'optimisation de la détection des vestiges archéologiques en milieux d'altitude.

Mots clés

Archéologie de la haute montagne, méthode non invasive, prospection archéologique

lysis of soils), the diversification and miniaturisation of sensors, and the democratisation and development of aerial drones, which allow for the repeatability of acquisitions, are opening up the possibility of setting up new archaeological information acquisition procedures. The new data processing tools, the work on software ergonomics and the opening up of the field of possibilities offered by artificial intelligence allow us to foresee new possibilities for optimising the detection of archaeological remains in high-altitude environments.

Keywords

High-mountain Archaeology, Non-invasive Method, Archaeological Survey

CONTEXTE ET ENJEUX SCIENTIFIQUES

Pensés comme immuables, les sociétés, les environnements et les systèmes d'exploitation des espaces montagnards ont longtemps été soustraits au regard archéologique. Il aura fallu trois décennies d'interactions et de dialogue entre les sciences humaines et les sciences de la nature, ainsi qu'une somme d'avancées méthodologiques et techniques, pour que ces territoires soient envisagés autrement. Soumis aujourd'hui à des questionnements interdisciplinaires intégrés (LE COUÉDIC, 2016; RENDU, 2021) ces espaces révèlent, peu à peu, non pas une mais des histoires, beaucoup plus longues et complexes qu'elles n'étaient jusque-là pensées.

En plaçant ces histoires au centre de certains de leurs programmes de recherches, ce que les disciplines sociales et environnementales (approches naturalistes et paléo-environnementales, archéologie, ethnologie, anthropologie, histoire et géographie), étroitement associées, veulent d'abord saisir, ce sont les dynamiques d'évolution, les logiques de transformation des espaces et de leurs ressources dans le temps long.

- Selon quels rythmes et avec quelles amplitudes se sont succédées les phases d'emprise et de déprise humaine et pastorale au cours des sept derniers millénaires ?
- Quelles complémentarités de ressources ont été mises en œuvre à chacun de ces moments ?
- Quelles formes d'organisation de l'espace social ces complémentarités sont-elles susceptibles d'exprimer ?

En historicisant les espaces de haute montagne, c'est le point de vue global sur les sociétés montagnardes que l'on inverse et c'est la totalité des systèmes valléens que l'on se doit de reconsidérer.

- Que pèsent, dans ces systèmes, les étendues immenses que constituent les estives ?
- Sont-elles les points d'inertie ou les moteurs de changements ?
- De quelles singularités « montagnardes » sont-elles éventuellement la source et pourquoi ?

L'objectif des programmes de recherche sur les espaces montagnards européens est donc de comprendre les mutations des modes d'exploitation des ressources naturelles. La méthode de travail utilisée repose sur l'acquisition des données archéologiques, historiques, ethnologiques et paléo-environnementales, et sur l'articulation des différentes séquences. Ainsi, la prospection et la fouille archéologiques des sites pastoraux d'estivage (habitats et enclos), des sites à vocation minière et métallurgique ou encore des aires de charbonnage, renseignent sur l'évolution des modes de gestion des ressources disponibles. Lorsque ces données sont mises en série, elles laissent transparaître certains changements des économies montagnardes, certains processus d'intensification ou encore des formes originales d'exploitation extensive. Complétées pour les périodes récentes au moyen de l'analyse des sources écrites, ces informations archéologiques retracent également la logique des partages territoriaux, en particulier lorsque ceux-ci sont structurés par l'étagement altitudinal. C'est la raison pour laquelle les recherches s'appuient sur une organisation des séquences archéologiques et paléo-environnementales, en transects : l'objectif est de constituer de véritables coupes à travers hautes estives, versants intermédiaires et fonds de vallée.

L'évaluation du poids des montagnes et du rôle de l'estivage dans la structuration des vallées ne passe pas seulement par l'appréhension des mutations des systèmes pastoraux montagnards dans la longue durée. Elle passe aussi par une réévaluation d'ensemble de la part et de la place de l'élevage ou encore par des éclairages sur les autres formes d'exploitation des ressources naturelles d'altitude (cf. archéologie minière par exemple). Elle passe, enfin, par l'étude de certains rapports à l'espace particulièrement présents dans les milieux montagnards (parcours pastoraux, agricultures temporaires), qui tranchent avec nos conceptions ordinaires des territoires (coexistence d'usages démultipliés dans des espaces non appropriés de manière pérenne).

La démarche suppose en premier lieu d'aborder les estives pour elles-mêmes. Du point de vue de l'archéologie, le processus d'acquisition de l'information primaire repose sur la prospection, le sondage, puis la fouille. Son premier travail consiste à élaborer une carte des sites et à tenter une analyse systémique à la lumière des données chronologiques et typologiques et des indices livrés par les sites sur les techniques d'exploitation.

Percevoir les dynamiques valléennes et les évolutions des paysages sous l'angle de l'exploitation des ressources naturelles qu'offrent les espaces d'altitude permet un décentrement, une ouverture forte sur d'autres facteurs d'anthropisation, d'échanges et de constructions territoriales, tout en restant dans des problématiques proches (formes, pratiques et distribution spatiale des exploitations).

Jalonner les terrains, réfléchir aux conditions d'un croisement pertinent des données à cette échelle de travail constituent également un enjeu important à cette étape de la recherche.

L'association des programmes déjà existants à la discussion, comme le fait le projet DEPART, qui vise à mutualiser les données primaires issues des prospections des zones d'altitudes pyrénéennes (versants nord et sud) par la mise en place d'un système d'information géographique (SIG) international (France, Espagne, Andorre), permet d'accompagner la recherche et de faciliter le comparatisme entre les territoires (LE COUÉDIC 2016).

Ainsi, depuis 30 ans, les milieux d'altitude européens (Pyrénées, Alpes, Cantabrie, montagnes insulaires, etc.) constituent un cadre novateur de recherche sur les dynamiques des modes de gestion des ressources naturelles et les évolutions des systèmes pastoraux des espaces de montagne dans la longue durée (liste non exhaustive : BAL 2010 ; GARSSIA CASAS 2018 ; GASSIOT 2010 ; 2012 ; 2013 ; 2016 ; GUÉDON 2006 ; 2013 ; GUILLOT 2017 ; LE COUÉDIC 2014 ; MOCCI 2005 ; 2008 ; 2010 ; ORENGO 2010 ; PALET 2013 ; SAINT-SEVER 2016 ; REITMAIER 2010 ; 2012 ; 2013 ; RENDU 2021-1995 ; TZORTZIS 2018 ; WALSH 2007 ; 2011).

Les équipes engagées dans ces programmes s'appuient sur un socle thématique, épistémologique et méthodologique commun qui passe par la focalisation sur des « secteurs cibles », spatialement restreints, pour lesquels sont déployées des études archéologiques, environnementales, historiques et ethnologiques. Ces projets sont construits en prenant appui sur des partenariats similaires avec les services du patrimoine, les collectivités territoriales, les parcs nationaux et régionaux et les réserves naturelles.

VERROUS MÉTHODOLOGIQUES À DÉPASSER

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.

Préalable indispensable à toute recherche en archéologie, la prospection en haute montagne a des spécificités.

Contrairement au travail de prospection en plaine (FERDIÈRE 1979 ; ZADORA-RIO 1986 ; MILLETT 2000 ; TRÉMENT 2011 ; POIRIER 2010 ; 2013 ; 2017 ; POIRIER, HAUTEFEUILLE 2018), 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 micro-reliefs. La méthode de prospection actuelle (RENDU 2003 ; REITMAIER 2010 ; GASSIOT 2016 ; RENDU 2016 ; LE COUÉDIC 2020) 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 dizaines, voire une centaine de milliers d'hectares) au regard de la superficie des massifs montagneux. Ainsi, l'estive d'Anéou (Pyrénées-Atlantiques), de presque 1300 hectares, a été prospectée en 4 mois à 2 personnes (RENDU, 2016), les 1400 hectares de la haute vallée de Benasque (Aragon, Espagne) ont été parcourus en 3 mois à 2 personnes (CALASTRENC 2004 ; 2005 ; 2006 ; 2007) et les 40 000 hectares du parc d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (Catalogne, Espagne) ont nécessité 10 ans de prospection à une quinzaine de personnes (GASSIOT 2016). Actuellement, en haute montagne, la surface moyenne couverte par les prospecteurs est d'un peu moins de 176 hectares par mois et par personne, contre 75 hectares prospectés en plaine. Toutefois, la méthode d'approche en plaine est systématique (1 prospecteur tous les 10 m), alors qu'en montagne, une partie de l'espace pastoral est exclu du fait des pentes fortes, de la présence de barres rocheuses ou de végétation trop dense (rhododendron, genêt, etc.).

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 ?
- 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, celles

faites en matériaux périssables ou 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, de traitement et de fusion des informations pour maximiser la détection des vestiges archéologiques en milieux d'altitude et pouvoir approcher l'automatisation de l'identification des marqueurs archéologiques.

L'objectif du projet de recherche TAHMM est d'utiliser des ressources techniques et méthodologiques non invasives, du satellite à l'analyse chimique des sols, et de mettre en place une approche intégrée multisource, multiéchelle et multitemporelle afin d'optimiser le travail de détection archéologique en montagne et d'insérer tout ou partie de ces données dans un train de traitement qui inclut l'intelligence artificielle. Pour ce faire, ce programme, porté par les laboratoires TRACES (UMR 5608) et FRAMESPA (UMR 5136), s'appuie sur un consortium qui unit archéologie, observation de la Terre, sciences de l'informatique, géophysique et chimie des sols (laboratoires TRACES, FRAMESPA, CESBIO, IRIT, CNES, GET et GEODE). Les membres de ce programme de recherche utilisent les équipements scientifiques du plateau technique TIG-3D (Télé-détection, imagerie, géomatique, 3D) de la plateforme ArchéoScience des laboratoires TRACES (UMR 5608) et GEODE (UMR 5602). Il dispose d'un appui financier récurrent de la DRAC, de la Réserve naturelle d'Aulon, du Conseil départemental des Hautes-Pyrénées et ponctuel de la ZA PYGAR et du Parc national des Pyrénées.

DÉPLOYER DE NOUVEAUX OUTILS POUR LA PROSPECTION ARCHÉOLOGIQUE

L'objectif du programme de recherche TAHMM (Télé-détection archéologique en haute et moyenne montagne) est méthodologique. Il cherche à définir les meilleurs outils et les meilleurs procédés de traitements des données permettant de croiser, sur une même zone d'étude, plusieurs sources d'information à haute, voire très haute résolution spatiale (taille du pixel), spectrale (nombre de bandes spectrales), radiométrique (sensibilité du capteur) et temporelle (répétitivité des acquisitions) : télé-détection par satellite et par drone, lidar par drone, photogrammétrie par drone et satellite, imagerie multispectrale par drone, thermographie aéroportée par drone, géoradar, capteur magnétique et analyse chimique des sols par fluorescence-X. L'ensemble de ces appareillages sont utilisés à des échelles différentes. (CALASTRENC 2018 ; 2019 ; 2020/2021 ; 2022).

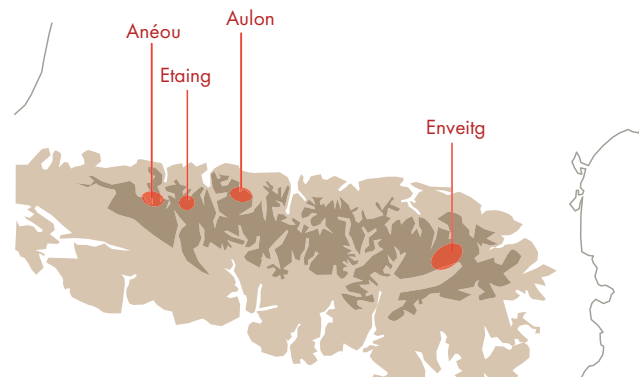


Fig. 1. Localisation des zones atelier du programme T.A.H.M.M.

Le programme TAHMM s'appuie sur 4 zones ateliers. Deux zones sont archéologiquement très bien connues – la montagne d'Enveitg dans les Pyrénées-Orientales, cadre de travaux de recherche de 1985 à 2003 dirigés par Christine Rendu (DR CNRS, Laboratoire FRAMESPA – UMR 5136) et l'estive d'Anéou dans les Pyrénées-Atlantiques étudiée de 2004 à 2011 par Christine Rendu, Carine Calastrenc et Mélanie Le Couédic –, et deux zones sont totalement vierges de tout travaux de recherche archéologique – le territoire de la Réserve naturelle d'Aulon dans les Hautes-Pyrénées et le secteur du Liantran sur les estives d'Etaing, également situé dans les Hautes-Pyrénées. Ces 4 terrains d'étude se caractérisent par leur hétérogénéité spatiale et environnementale. La montagne d'Enveitg est située sur le versant sud des Pyrénées et est marquée par le développement de petites zones forestières de pins et le recouvrement progressif de la prairie par des genêts. Le territoire de la Réserve naturelle d'Aulon est sur le versant nord des Pyrénées dans un secteur très encaissé et est marqué par une reprise végétale qui voit la croissance des rhododendrons et genévriers. Quant à l'estive d'Anéou, il s'agit d'une vaste zone herbeuse très ouverte vers l'est, située en bordure de la frontière franco-espagnole dans les Pyrénées-Atlantiques. Enfin, le secteur dit du « Liantran » dans la commune d'Etaing est recouvert à 80 % par un chaos rocheux. (fig. 1)

C'est sur ces terrains que sont réalisés les différents tests méthodologiques. Le déploiement des appareillages scientifiques s'est fait au fur et à mesure de l'avancée dans la maîtrise des procédures d'acquisition et de traitement des données.

À l'échelle d'une montagne : télé-détection satellitaire

Une détection efficace des vestiges archéologiques via les images satellite permettrait de travailler finement à une grande échelle, ce qui est jusque-là très complexe à atteindre pour les archéologues. La photo-interprétation des

images satellite est longue et fastidieuse et, pour l'instant, les recherches se centrent sur des objets archéologiques de grande taille comme les fortifications de la cité antique de Sagalassos en Turquie [LAET (DE) 2009] ou des objets archéologiques isolés constitués de matériaux différents de leur environnement comme les kourganes (tombes) dans les montagnes de l'Altai (CHEN 2021). Des travaux de détection automatique ou semi-automatique de sites archéologiques d'élevage en zone d'altitude par traitement d'image satellite ont déjà été réalisés sur des secteurs de montagne. Sur la montagne de Silvretta en Autriche (LAMBERS, ZINGMAN 2012; LAMBERS 2012; 2013; ZINGMAN *et al.* 2012; 2013a; 2013b; 2014; 2015; 2016), l'équipe de recherche dirigée par Thomas Reitmaier a travaillé sur la détection semi-automatique de structures pastorales d'altitude. L'application des algorithmes de segmentation d'image et de détection des formes a permis de repérer des structures simples, bien conservées (murs en élévation) et isolées dans des zones herbeuses. Toutefois, cette équipe s'est retrouvée confrontée à deux problèmes majeurs : la résolution radiométrique et spectrale des images satellite gratuitement disponibles n'est actuellement pas suffisante pour une identification « fine » des sites archéologiques. En effet, la résolution spatiale maximale des images satellites gratuites est de 1.5 m (images Spot 6/7) et celles des images payantes est de 0.3 m et de 0.5 m (images Worldview 4 et Pléiades). Pour reconnaître une structure, il est nécessaire qu'elle soit renseignée par plusieurs pixels. Ainsi, seuls les grands ensembles ou les constructions fortement visibles (un enclos isolé dans la pelouse) peuvent être perçues. Toutes les infrastructures pastorales arasées identifiables seulement par un microrelief ou quelques blocs alignés restent actuellement inaccessibles par ces moyens techniques. Cependant, ce problème pourrait être modéré par une approche multisource (LAET (DE), LAMBERS 2009: 12).

La complexité vient également de l'extrême variété des formes à détecter (RENDU 2016: 69, 70; LE COUÉDIC 2010: 511-515). Comment repérer l'ensemble des structures archéologiques d'un pâturage alors que les plans, les tailles, les états de conservation et les taux de recouvrement par la végétation divergent ?

Pour tenter de répondre à ces questionnements, les membres du programme TAHMM ont pris contact avec le laboratoire « Observation de la terre » (Lab'OT) du CNES et notamment avec Luc Lapierre, ingénieur en imagerie satellite et Olivier Queyrut, chef de service du Lab'OT pour mettre en place de futures collaborations sur le traitement des images satellite à des fins de détection archéologique.

À l'échelle d'un quartier d'estive : acquisitions par drone

L'utilisation des drones permet non seulement d'embarquer un panel de capteurs qui ne cesse de se développer,

mais ouvre également l'archéologue à tout un ensemble de données qui étaient jusque-là difficilement accessibles. En plus de la diversité des capteurs implémentables, ces vecteurs permettent également de rabaisser la hauteur des acquisitions et par là réduisent les limites de la détection archéologique parce qu'ils diminuent la résolution spatiale des images (POIRIER 2013; 2017). En effet, avec un drone, la taille du pixel des images produites passe à 1 cm. L'intérêt des drones vient aussi de la facilité à répéter les acquisitions soit pour avoir un suivi et permettre de percevoir une évolution, soit pour multiplier les données par la répétition.

Devant tous ces avantages, les drones en archéologie deviennent de plus en plus courants. Toutefois, leur usage est le plus souvent limité à la photographie documentaire ou à la photogrammétrie. Le traitement des données est rarement poussé au-delà de la seule constatation visuelle de la présence/absence de vestiges sur les orthophotographies. Le programme TAHMM cherche à exploiter au mieux les données issues des différents capteurs disponibles au sein du plateau TIG-3D (imagerie classique, multispectral, Lidar, thermographie) pour maximiser la détection archéologique.

Photogrammétrie

Comme beaucoup de travaux en archéologie, la photogrammétrie à partir d'image aérienne par drone est utilisée pour obtenir des orthophotographies et des modèles numériques de terrain (MNT) fins qui soutiennent la lecture, la description et l'analyse de chaque vestige archéologique. Dans le cadre du programme de recherche TAHMM, différentes méthodes de visualisation des MNT ont été utilisées pour affiner l'identification archéologique, notamment via le logiciel RVT développé par l'Institute of Anthropological and Spatial Studies de Slovénie (KOKALJ, SOMRAK 2019; KOKALJ, HESSE 2017; ZAKŠEK, OŠTIR, KOKALJ 2011), mais aussi via des outils implémentés dans certains systèmes d'information géographique (SIG) comme Saga Sig. Actuellement, 31 méthodes de visualisation ont été testées et certaines sont totalement entrées dans une routine de traitement comme SLRM (Simple Local Relief Method) ou SVF (SkyView Factor).

Les capacités de détection de chacune des méthodes de visualisation ont été testées sur chacun des 4 secteurs géographiques pris en compte dans le cadre du programme TAHMM (fig. 2). La première constatation, c'est qu'en l'état de la recherche, en haute montagne, la photo-interprétation reste la méthode la plus efficace. C'est en effet, pour le moment, la technique qui permet d'identifier entre 80 à 97 % des constructions. Une seule catégorie de structure échappe totalement à cette analyse : celle située sous des blocs rocheux ou sous la végétation. Les capacités de détection de chacune des méthodes de visualisation

utilisées varient de 5 à 50 %. Aucune d'entre elles n'est donc « magique » ni ne permet d'avoir une lecture totale ou statistiquement satisfaisante des vestiges archéologiques présents sur un territoire. Certaines sont plus efficaces que d'autres surtout en fonction des milieux. Ainsi, des méthodes de visualisation seront plus efficaces sur des chaos rocheux dans lequel sont encastrés des structures présentant une élévation importante (SLRM, Openness negative, Local Dominance, Model Topographic Position Index – MSTPI –) alors que d'autres méthodes seront plus probantes sur des zones herbeuses (SVE, SLRM et Multiombrage). De façon générale, sur l'ensemble de ces 4 territoires, 3 méthodes paraissent plus performantes en milieu de montagne : SLRM, Multiombrage et Local Dominance.

Thermographie

La technique de prise de vue thermographique suivie dans le cadre du programme de recherche TAHMM s'est basée sur les préconisations établies par les chercheurs des programmes de recherche Archéodrone et REPERAGE (dir. Nicolas Poirier, CR CNRS, Laboratoire TRACES) (POIRIER *et al.* 2017 ; POIRIER 2018 ; 2021). De façon générale, il s'agit d'effectuer les prises de vue zénithales lors de la plus grande amplitude des températures. La procédure de traitement des images thermiques développée par les membres du programme TAHMM a fait l'objet d'un article paru en 2019 dans la revue *ArchéoSciences* (CALASTRENC 2019).

En 2018 et 2019, des acquisitions thermiques ont été réalisées avec une caméra FLIR T620 placée sur un octorotor. La qualité de son capteur est très bonne pour une caméra thermique avec une résolution de 640 par 480, soit 307 200 pixels. En 2020/2021 et 2022, c'est le drone Anafi Thermal qui a été testé. L'avantage de ce drone est sa compacité et son poids qui permettent un transport très facile dans un sac à dos. La très faible résolution spatiale des images produites (160 par 120 pixels) limite considérablement les possibilités d'analyse. Les données thermiques sont généralisées et la réalisation des profils thermographiques est marquée par des « marches d'escalier » rendant très complexe la lecture archéologique (fig. 3). Ce drone peut être employé dans le cadre d'une approche préliminaire d'une zone d'étude, mais si l'objectif est d'analyser une structure ou un groupement de structures, il est nécessaire d'utiliser un capteur disposant d'une résolution plus importante.

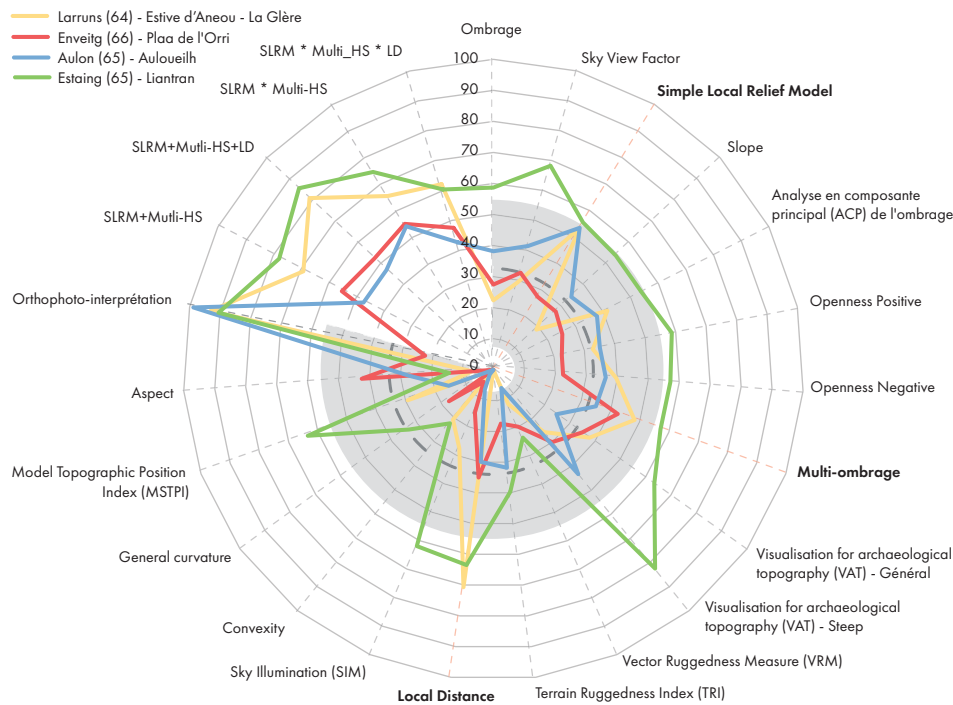


Fig. 2. Comparatif des "performances" des différentes méthodes de visualisation testées.

Image multispectrale

En septembre 2022 ont été réalisées les premières acquisitions multispectrales. Elles avaient pour but de cerner les possibilités du drone Phantom 4 et d'avoir un aperçu des résultats. La période d'acquisition n'était pas la meilleure : entre la fructification et la dormance des plantes. Ces premiers tests (fig. 4) avaient pour objectif de cerner tous les points d'achoppement, les limites et les avantages de cet appareillage pour pouvoir réaliser des acquisitions efficaces et probantes l'année suivante.

Le drone Phantom 4 multispectral est facilement transportable en sac dos, maniable et permet une acquisition d'une image zénithale et de 5 bandes spectrales : bleu (B) : 450 nm ± 16 nm ; vert (G) : 560 nm ± 16 nm ; rouge (R) : 650 nm ± 16 nm ; red edge (RE) : 730 nm ± 16 nm ; infra-rouge proche (NIR) : 840 nm ± 26 nm. Il est également possible de disposer du résultat d'un calcul d'indice à la place d'une image zénithale telle que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Les premiers traitements et les premières observations indiquent qu'en zone de montagne, au mois de septembre, le NDVI permet de faire, à grands traits, la différence entre les espèces végétales (rhododendrons, myrtilliers, genévriers et mousses). Il montre également les parties sèches des plantes et permet d'identifier l'espace entre les pieds des plantes. D'autres tests doivent être réalisés à différentes périodes de l'année et d'autres indices de végétation doivent être expérimentés.

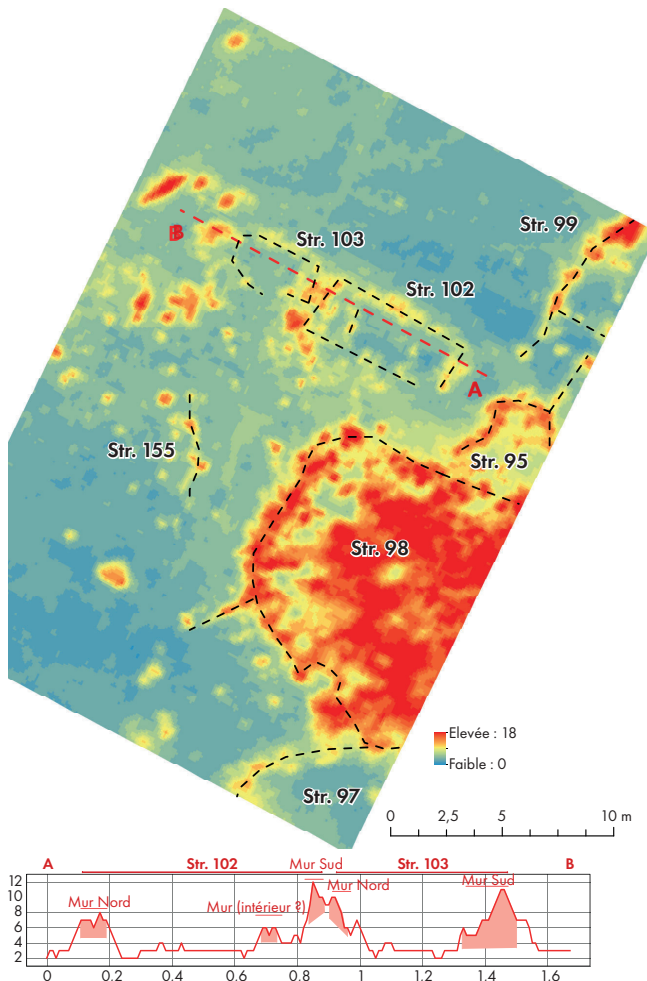


Fig. 3. Relevé thermographique de l'ensemble pastoral Str. 95-103; Str. 155.

Lidar

Les données Lidar entrent de plus en plus dans les habitudes archéologiques. Ainsi, l'équipe de recherche dirigée par Jean-Pierre Toumazet travaillant dans le Puy-de-Dôme (TOUMAZET *et al.*, 2017) a mis au point, à partir de données Lidar acquises par avion, une procédure de détection automatique des infrastructures pastorales qui se caractérise par une très forte empreinte spatiale ainsi que par une forme simple et « standardisée ». Ce travail s'est basé sur l'appariement de modèles et sur une classification orientée objet.

Tout comme en 2021, en 2022, la partie centrale du replat de l'Auloueilh a fait l'objet d'une couverture Lidar par drone (altitude d'acquisition 20 m et 4 m/sec.). Avec ces données, l'identification des structures, même très arasées, est aisée en zone herbeuse. Cela se complique toutefois lorsque le terrain est recouvert par une végétation basse et ligneuse de type rhododendron, genévrier, genêt ou myrtilleur. Il faut alors mettre en place des méthodes de classification différentes de celles usuellement réalisées,

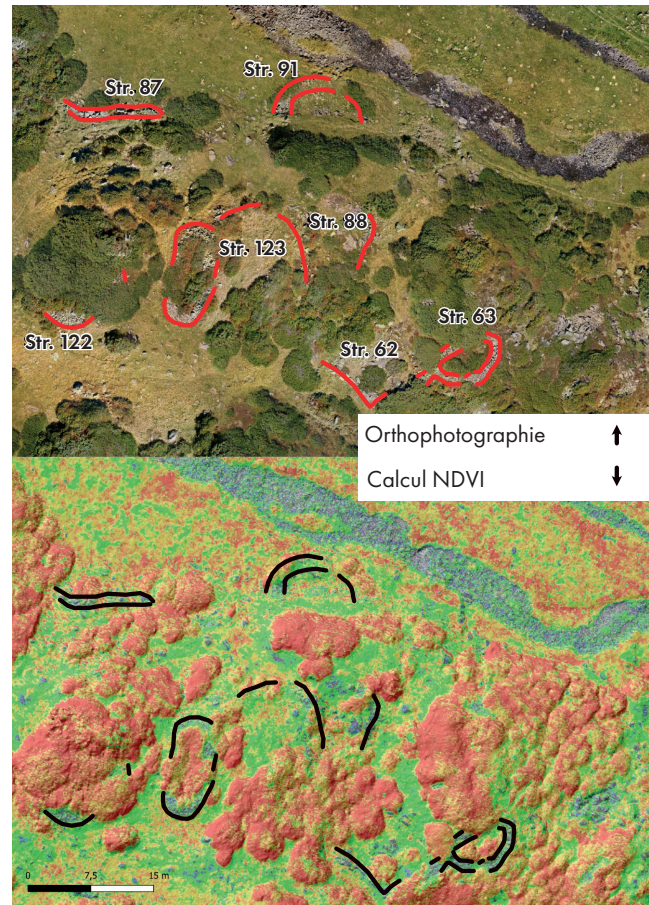


Fig. 4. Relevé multispectral d'une partie d'un grand ensemble pastoral.

qui permettent de seulement distinguer quelques éléments architecturaux cachés sous la végétation (sur 58 structures, 7, soit 12 %, sont identifiables).

Dans le cadre du consortium mis en place cette année, un stage de Master de 6 mois en cotutelle entre les laboratoires CESBIO, IRIT et TRACES [encadré par Claire Marais-Sicre (CESBIO), Nicolas Mellado (IRIT) et Carine Calastrenc (TRACES)] aura la charge de définir une procédure de classification des points sol/végétation ligneuse pour avoir une détection archéologique la plus complète possible en s'appuyant notamment sur les réseaux de neurones à faible latence. Il s'agira de cerner comment leur réactivité peut permettre un contrôle direct par l'archéologue, et de concevoir un système de feedback interactif, permettant de guider le processus d'acquisition par l'analyse et l'interprétation des données.

À l'échelle du groupement de structure : géoradar et magnétomètre

Une fois des « anomalies » repérées par des méthodes aériennes, pour compléter et affiner l'identification des

structures archéologiques, des outils terrestres de géophysique (géoradar et magnétomètre) sont utilisés. Le géoradar permet d'avoir une représentation, en 3D, des contrastes de permittivités ou de conductivités rencontrés par les ondes électromagnétiques émises et d'y distinguer des anomalies pouvant correspondre à des structures archéologiques. Cet outil a été utilisé par Ted Gracson à Laurrau (Pyrénées-Atlantiques) dans le cadre des prospections réalisées par Mélanie Le Couédic en 2014 (LE COUÉDIC 2014). Il a montré tout l'intérêt de l'usage de cet appareillage en dévoilant, sur quelques sites, des anomalies pouvant correspondre à des vestiges d'aménagements enfouis sous la surface. Le magnétomètre permet, quant à lui, de cartographier les anomalies magnétiques dues à la présence d'objet enfouis ou de matériaux ayant subi des altérations thermiques. Cet outil est particulièrement adapté pour repérer des fosses, des fossés, des zones ayant subi l'action du feu (foyer, four, forge) et, dans certains cas, des murs. Les premiers tests sont très encourageants et indiquent que les foyers archéologiques pourraient être repérés via cet outil, ce qui permettrait d'avoir une stratégie d'approche plus efficace lors des sondages et des fouilles extensives.

Détecter l'invisible : Analyses chimiques des sols

En dernier lieu, sont mises en œuvre des analyses par spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) qui permettent de déterminer les éléments chimiques qui composent un échantillon (THIRION-MERLE 2014). L'objectif est de localiser les aires de stabulation invisibles en surface ayant été délimitées avec des matériaux périssables. Les résultats des prospections pédestres montrent souvent une proportion importante de cabanes isolées sans enclos visible en surface à proximité. Or, l'enclos est une infrastructure indispensable au berger. Il permet la garde de tout ou partie du bétail la nuit, de faire les soins et, si nécessaire, la traite. Les fouilles archéologiques du secteur de « La Padria » à Enveitg réalisées par Christine Rendu (RENDU 2003) ont également montré que des activités annexes nécessitant des foyers pouvaient être entreprises à l'intérieur des enclos. L'XRF, parce qu'il identifie et quantifie les éléments chimiques présents dans le sol, permet de localiser, en surfacique et en profondeur, les variations des taux des éléments traceurs des excréments des animaux : phosphore (P), azote (N), magnésium (Mg), calcium (Ca), potassium (K) (FARDEAU & MARTINEZ 1996; BLOOR *et al.* 2012), et ainsi d'avoir une perception de la mobilité des zones de stabulation dans le temps et l'espace. Les premiers tests se sont focalisés sur le phosphore et sur l'association avec plusieurs autres éléments marqueurs des déjections animales. Ils montrent qu'il y a bien une stratification et une variabilité des taux

de phosphore dans le sol. Reste un point d'achoppement : comment rentabiliser l'acquisition de l'information ? Une mesure XRF dure 2 minutes. En une journée de terrain, un nombre maximal de mesures est possible. Dans notre cas, avec 1h30 de marche pour accéder au site, 1h30 pour en revenir et un temps de préparation des carroyages, le nombre d'acquisition ne pouvait excéder 150 à 190 mesures, soit une surface couverte de 40 m² avec une mesure par m², en surface, à 5, 10 et 15 cm de profondeur. Les membres du programme TAHMM réfléchissent actuellement à la mise en place d'une méthode de prélèvement de carotte sédimentaire de faible diamètre pour pouvoir réaliser les mesures en laboratoire et ainsi travailler sur une information plus fine.

Sondage de vérification des premières observations

Les 23 hectares du replat de l'Auloueilh dans la réserve naturelle d'Aulon ont été l'une des zones test privilégiées dans le cadre du programme TAHMM. Sur ce territoire, la totalité des appareillages a été testée. Les acquisitions entreprises dans le cadre du programme TAHMM ont pris 8 jours de terrain répartis sur plusieurs années (car le déploiement des appareillages s'est fait au fur et à mesure). Sur la base des données acquises, il a été possible d'identifier 157 structures archéologiques. L'ensemble de ces structures présente des états de conservation différents, des morphologies différentes et des associations différentes, le tout témoignant d'un usage long de cette partie d'estive. Restait à vérifier, confirmer ou infirmer la réalité de la présence de ces infrastructures. Quatre sondages archéologiques de vérification des premières observations (structure 13, 39, 133 et 152) ont donc été réalisés en septembre 2021 (fig. 5 à 8). Tous sont positifs. Aucun artefact n'a été retrouvé lors de ces sondages. La datation ne peut reposer que sur des analyses AMS 14C (réalisée par le Poznan Radiocarbon Laboratory).

La structure n° 133, identifiée uniquement sur le résultat du traitement SLRM du MNT, correspond bien à un petit édifice auquel est associé un niveau d'occupation. Les 3 autres sondages ont été entrepris sur des structures visibles en surface par des déformations du sol ou des microreliefs. Elles ont toutes été perçues et identifiées par différents capteurs et méthodes : photo-interprétation, traitements des MNT, thermographie aéroportée, magnétomètre. Pour deux de ces structures (str. 13 et 39), des mesures XRF avaient également été faites à proximité.

Pour chaque structure sondée, le bâti a été identifié et ses modes constructif et destructif ont pu être étudiés. Les murs sont tous réalisés en double parement et présentent une fourrure de blocs de plus petits modules plus ou moins

développée. Pour 2 des 4 structures sondées (face interne de la structure 13 et face externe de la structure 133), des dalles posées de chant formaient un des parements.

Pour trois structures sondées, les niveaux de circulation associés ont été identifiés. L'espace intérieur de la structure 39 était tellement impacté par la chute de blocs issus de la

destruction des murs et la chute de blocs après le dégel que le niveau de circulation a été totalement imperceptible à la fouille.

Deux de ces 4 sondages (str. 13 et str. 39) ont été placés sur une anomalie magnétique. L'objectif était de déterminer si ces anomalies correspondaient à la présence d'objets métalliques ou à une structure ayant subi l'action du feu. Pour

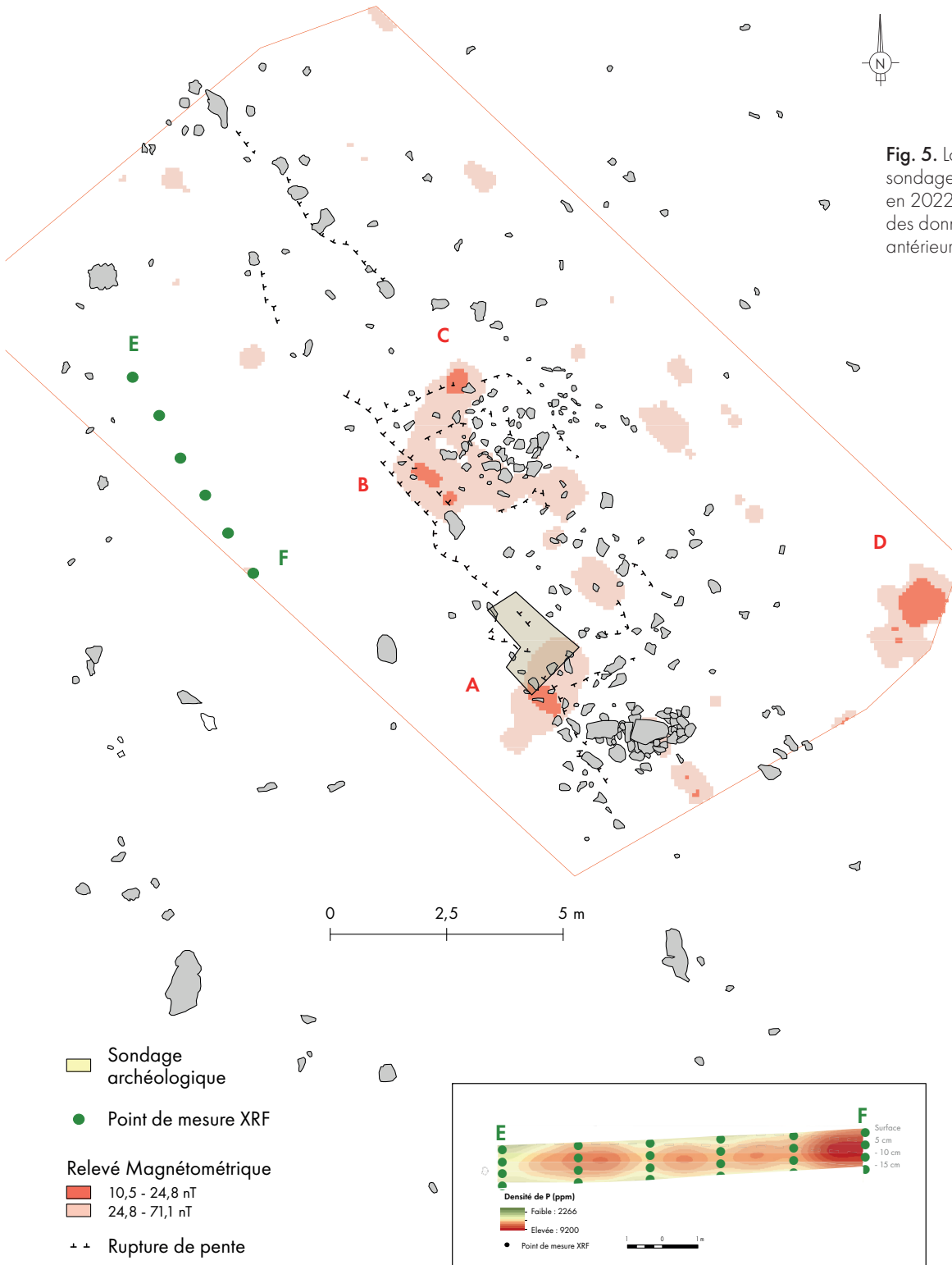
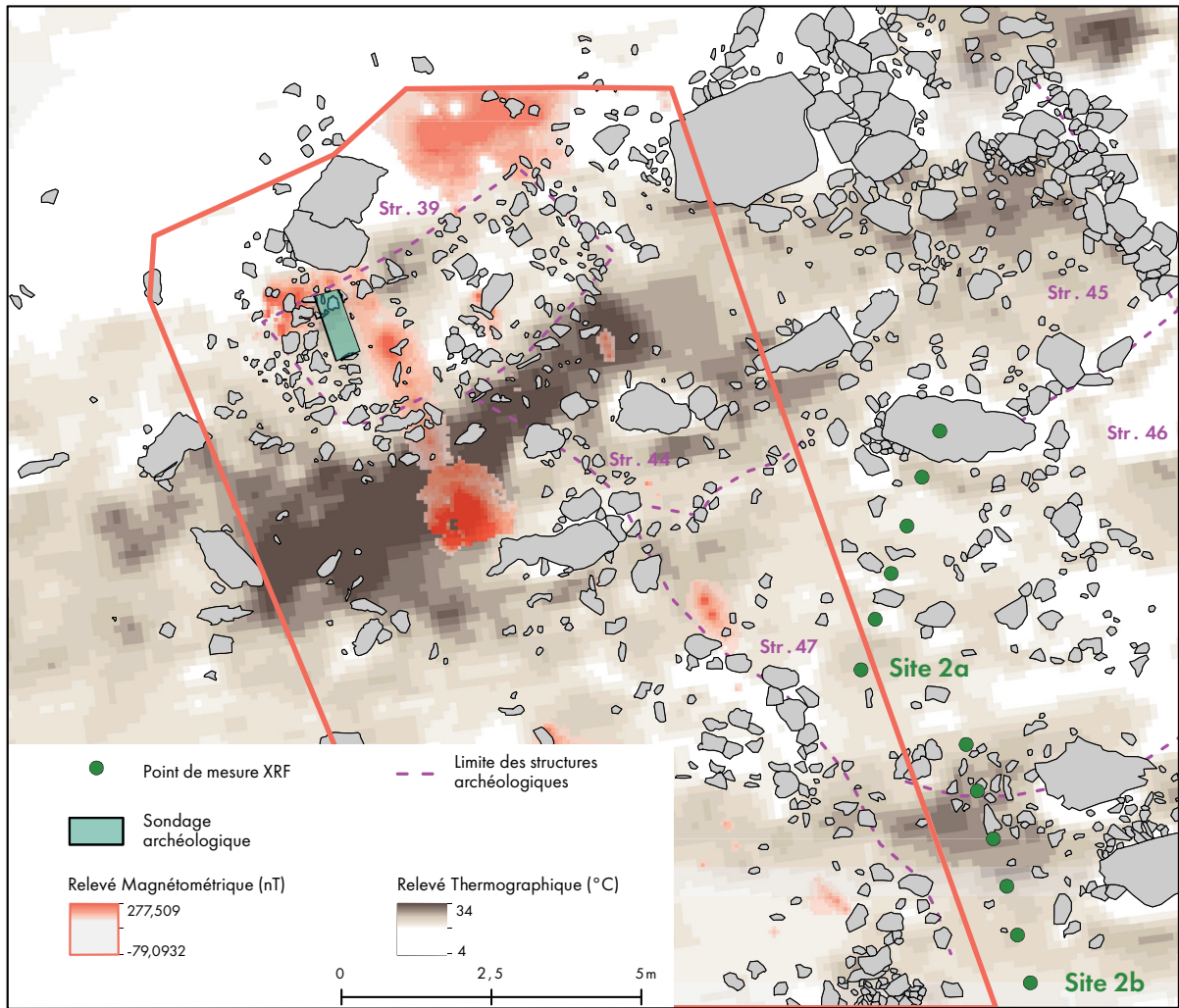


Fig. 5. Localisation du sondage réalisé en 2022 sur la str. 13 et des données acquises antérieurement.



Site 2a

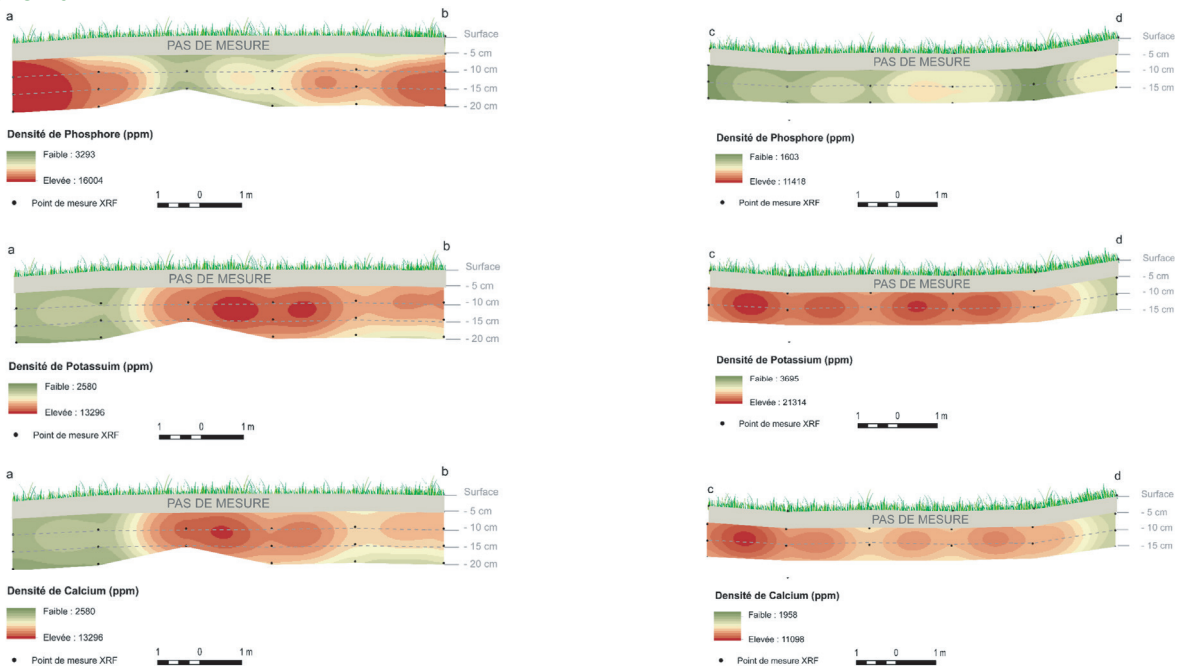


Fig. 6. Localisation du sondage réalisé en 2022 sur la str. 39 et des données acquises antérieurement.

ces deux sondages, la fouille a révélé la présence d'écofactes (charbon de bois, cendre et terre rubéfiée) à plus de 10 cm sous le niveau de circulation, sans qu'il soit possible, sur les données de ces sondages, de faire la part entre structure de combustion anthropique (foyer) ou résidu d'incendie naturel. Il y a donc, pour ces deux constructions, une possible superposition d'occupation. Cette superposition avait été entraperçue lors des acquisitions XRF réalisées à proximité de la structure 39. Celles-ci ont montré un très fort taux de P (phosphore), à 15 cm de profondeur, qui laissait penser à la présence d'un enclos sous-jacent.

Les méthodes et appareillages scientifiques mis en œuvre dans le cadre du programme TAHMM sont donc probants. Les procédures d'acquisition sont maîtrisées. Cependant, des verrous restent à lever pour affiner le traitement de certaines informations. Il s'agit notamment de l'exploitation des données Lidar et du traitement des données de télédétection par satellite.

DÉVELOPPER UNE MÉTHODE D'APPROCHE INTÉGRÉE

L'objectif du programme de recherche TAHMM est purement méthodologique. Il cherche à trouver les outils et les procédures de traitement de données permettant de croiser, sur une même zone d'étude, plusieurs sources d'information à haute, voire très haute résolution spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle (télédétection par satellite et par drone, lidar par drone, photogrammétrie par drone et satellite, thermographie aéroportée par drone, géoradar, capteur magnétométrique, analyse chimique des sols par fluorescence-X) en s'appuyant sur les avancées récentes en intelligence artificielle pour les mettre en synergie et pour tenter d'arriver à une détection automatique qui soit la plus complète possible.

Les chercheurs et ingénieurs impliqués dans le consortium TAHMM vont chercher à dépasser l'observation une à une des données et commencer à travailler à la mise en place et en pratique d'une approche intégrée. L'ensemble des partenaires a l'ambition de développer de nouvelles méthodes d'apprentissage automatique permettant une analyse conjointe des données multisource afin de tirer parti de leur complémentarité. Ces méthodes de fusion devront s'affranchir en particulier du caractère hétérogène des données (images, mesures terrain, etc.) et notamment de la disparité de leurs résolutions spatiales respectives. Le but de ce projet de recherche est d'aller au-delà des frontières actuelles en s'appuyant sur des outils avancés en analyse de données. L'élargissement nécessaire que cela demande ne peut se faire sans le recours à l'interdisciplinarité. Le projet de recherche TAHMM a donc été élaboré de façon à ce que tous ses membres puissent interagir et que la mise

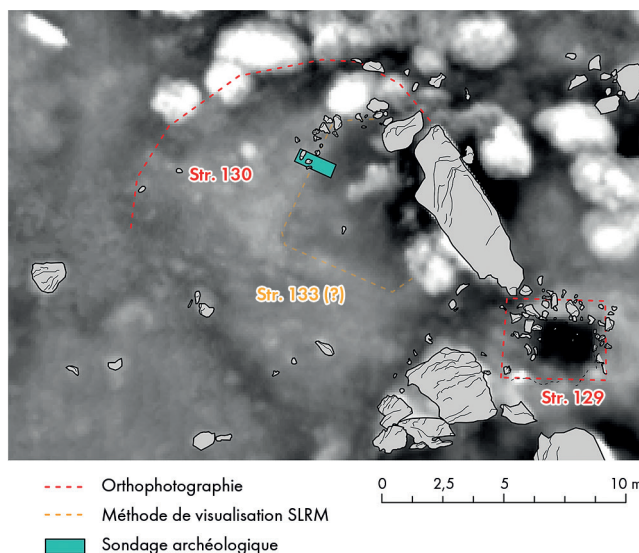


Fig. 7. Localisation du sondage réalisé en 2022 sur la str. 133 et des données acquises antérieurement.

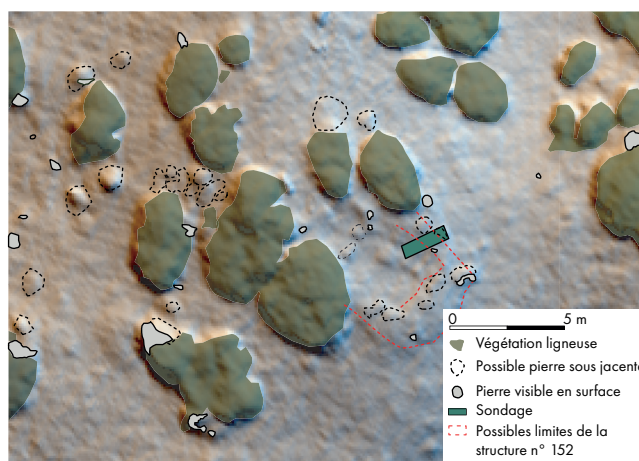


Fig. 8. Localisation du sondage réalisé en 2022 sur la str. 152 et des données acquises antérieurement.

en synergie de leurs savoir-faire permette d'ouvrir les possibilités d'analyses.

REMERCIEMENTS

Le programme de recherche TAHMM reçoit l'aide, le soutien et l'appui de nombreuses institutions et personnes que nous tenons à remercier, car sans eux, il ne pourrait être mené à bien.

Nous remercions le ministère de la Culture via la Direction régionale des Affaires culturelles et plus particulièrement le Service régional de l'Archéologie. Nos remerciements vont également au Conseil départemental des Hautes-Pyrénées et en particulier aux services des Archives et des Patrimoines et au service de l'Inventaire.

Nous tenons également à remercier la région Occitanie pour l'intérêt qu'elle apporte à ce programme de recherche.

Nous remercions également très vivement le personnel de la mairie d'Aulon ainsi que le maire et l'ensemble des conseillers, conseillers pour leurs aides techniques et leur soutien sans qui les dernières campagnes n'auraient pu avoir lieu.

Nous tenons à remercier Dominique Baudreu du Centre d'archéologie médiévale du Languedoc pour tout le travail de gestion et de suivi de ce programme de recherche.

Merci aussi à l'ensemble des bénévoles qui, sans faille, ont travaillé à nos côtés et sans qui nous n'aurions pu aboutir aux mêmes résultats : Hadrien Hocde, Rebecca Michiels, Maialen Gauthier, Marvyn Bigot. En dernier lieu, nous tenons à remercier Jean-Pierre Calastrenc et Marie Calastrenc, travailleurs de l'ombre, sans qui tout serait compliqué, voire impossible.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- BLOOR, J., JAY-ROBERT, P., LE MORVAN A. & FLEURANCE G. 2012. « Déjections des herbivores domestiques au pâturage: caractéristiques et rôle dans le fonctionnement des prairies ». *INRAE Productions Animales*, 25(1): 45-56. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2012.25.1.3196>
- BINTZ P., GRIGGO C., MARTIN L. & PICAUVET R. 2019. *L'Homme dans les Alpes, de la pierre au métal*. Presses universitaires Savoie Mont Blanc; Laboratoire EDYTEM. 978-2-919732-87-6. (halshs-01767885)
- CALASTRENC C., POIRIER N., BALEUX F., RENDU C. & BAL M.-C. 2022. *Inspecter les zones d'altitude. Développement d'une méthode intégrée multi-source pour la prospection archéologique des terrains d'altitude*, 150 p.
- CALASTRENC C., CAMPMAJO P., POIRIER N., BALEUX F., RENDU C. & BAL M.-C. 2021. *Inspecter les zones d'altitude. Développement d'une méthode intégrée multisource pour la prospection archéologique des terrains d'altitude*, 208 p.
- CALASTRENC C., BALEUX F., POIRIER N. & RENDU C. 2020. « Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne ». *Archeosciences, revue d'Archéométrie*, 44, 1: 81-96.
- CALASTRENC C., BALEUX F., POIRIER N., RENDU C. & PHILIPPE M. 2019. *Programme de télédétection archéologique en haute et moyenne montagne (TAHMM) – Campagne 2019*, 197 p.
- CALASTRENC C., BALEUX F., POIRIER N., RENDU C. & PHILIPPE M. 2018. *Programme de télédétection archéologique en haute et moyenne montagne (TAHMM) – Campagne 2018*, 205 p.
- CALASTRENC C., LE COUÉDIC M., BARGE O. & BAL M.-C. 2007. *Archéologie pastorale en vallée d'Ossau – Atelier 2 du PCR « Dynamiques sociales, spatiales et environnementales dans les Pyrénées centrales » – Rapport de sondages archéologiques et prospections – Campagne 2007*, 216 p.
- CALASTRENC C. & LE COUÉDIC M. 2006. *Archéologie pastorale en vallée d'Ossau – Atelier 2 du PCR « Dynamiques sociales, spatiales et environnementales dans les Pyrénées centrales » – Rapport de sondages archéologiques et prospections – campagne 2006*, 203 p.
- CALASTRENC C. & LE COUÉDIC M. 2005. *Rapport de prospection-inventaire et de sondages archéologiques – campagne 2005 – Archéologie pastorale en vallée d'Ossau*, 2 tomes, 325 et 118 p.
- CALASTRENC C., LE COUÉDIC M. & RENDU C. 2004. *Prospection inventaire – Archéologie pastorale en vallée d'Ossau 2004*.
- CHEN F., ZHOU R., VOORDE T. (VAN DE), CHEN X., BOURGEOIS J., GHEYLE W., GOOSSENS R., YANG J. & XU W. 2021. « Automatic detection of burial mounds (kurgans) in the Altai Mountains ». *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 177: 217-237.
- FARDEAU J.-C. & MARTINEZ J. 1996. « Épandages de lisiers: conséquences sur le phosphore biodisponible et sur la concentration de quelques cations dans la solution du sol ». *Agronomie, EDP Sciences*, 16 (3): 153-166. (hal-00885784)
- FERDIÈRE A. & FOURTEAU A.-M. 1979. « Gestion des archives du sol en milieu rural. Expérience de prospection systématique à Lion-en-Beauce (Loiret) ». *Revue ArchéoScience*, 3: 67-96.
- 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, Université autonome de Barcelone.
- GASSIOT E. (dir.) *et al.* 2016. *Arqueologia del pastoralismo en el Parque Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici. Montañas humanizadas*, Organismo Autónomo Parques Nacionales, ISBN: 978-2-9523824-5-8
- GASSIOT E., CLEMENTE CONTE I., MAZZUCCO N., GARCIA CASAS D., OBERA GÓMEZ L. & ANTON D. 2016. « Surface Surveying in High Mountain Areas, Is It Possible? Some Methodological Considerations ». *Quaternary International*, 402: 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.j.2015.09.103>.
- GASSIOT E., PELACHS A., BAL M.-C., GARCIA V., JULIA R., PEREZ R., RODRIGUEZ D. & ASTROU A.-C. 2010. « Dynamiques des activités anthropiques sur un milieu montagnard dans les Pyrénées occidentales catalanes durant la Préhistoire: une approche multidisciplinaire », in: TZORTZIS S., DELESTRE X. (dir.), *Archéologie de la montagne européenne*. Bibliothèque d'archéologie méditerranéenne et africaine, 4: 33-43.
- GASSIOT E., RODRIGUEZ ANTON D., BURJACHS F., ANTOIN F. & BALLESTEROS A. 2012. « Poblamiento explotación y entorno natural de los estados alpinos y subalpinos del Pirineo central durante la primera mitad del Holoceno ». *Revisata Cuaternario y Geomorfología*, 26, 3-4: 29-45.
- GASSIOT E., RODRIGUEZ ANTON D., PELACHS A., PEREZ OBIOL R., JULIA R. & BAL M.-C. 2013. « La alta montaña durante la Prehistoria: 10 años de investigación en el Pirineo catalan occidental ». *Revista Prehistoria Alpina*: 261-281.
- GUDEON F. 2006. *Occupation du sol et peuplement en montagne des origines aux temps modernes: le Haut Lavedan*. Thèse de 3e cycle de l'université de Toulouse,
- GUILLOT F. 2017. *Rapport de sondages archéologiques (Soulcem - Auzat 09). Pour une archéologie de la montagne*.
- KOKALJ Ž. & SOMRAK M. 2019. « Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping ». *Remote Sensing* 11, 7: 747.

- KOKALJ Ž & HESSE R. 2017. *Airborne laser scanning raster data visualization: A Guide to Good Practice*. Ljubljana: Založba ZRC.
- LAET V. (DE) & LAMBERS K. 2009. « Archaeological prospecting using high-resolution digital satellite imagery: recent advances and future prospect ». *Computer applications and quantitative methods in archaeology*: 9-17.
- LAET V. (DE), PAULISSEN E., MEULEMAN K. & WAELEKENS M. 2009. « Effects of image characteristics on the identification and extraction of archaeological features from Ikonos-2 and Quickbird-2 imagery: case study Sagalassos (southwest Turkey) ». *International Journal of Remote Sensing*, 30:21, 5655-5668. DOI: 10.1080/0143116080270582
- LAMBERS K. & ZINGMAN I. 2013a. Towards detection of archaeological objects in high-resolution remotely sensed images: the Silvretta case study. In: *Archaeology in the digital era*, II. 40th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Southampton, 26-30 March 2012). e-papers <https://doi.org/10.13140/2.1.4614.9120>
- LAMBERS K. & ZINGMAN I. 2013b. Texture segmentation as a first step towards archaeological object detection in high-resolution satellite images of the Silvretta Alps. In: *Archaeological prospection II*: 327-329. 40th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Southampton - 26-30 Mars 2012). Vienne, Wolfgang *et al.* edition.
- LE COUEDIC M. 2020. « Les cayolers et leur environnement (Pays basque): approche croisée entre histoire et archéologie ». *Actualité de la recherche sur le pastoralisme. Séminaire TERRAE*, BURRI S. Toulouse, France. (hal-02950254)
- LE COUEDIC M., RENDU C., GARCIA CASA D., GASSIOT BALBE E., CALASTRENC C., CLEMENTE CONTE I., RODRIGUEZ D. 2016. Comparer et modéliser les sites, les territoires et les systèmes pastoraux pyrénéens dans la diachronie: présentation et premiers résultats du projet collaboratif DEPART. In: DEBOFLE P., SANCHEZ J.-C. (éd.), *Pays pyrénéens et environnement*: 321-338. Actes du 62^e Congrès de la Fédération historique de Midi-Pyrénées, Bagnères-de-Bigorre (Hautes-Pyrénées), 12-13-14 juin 2015: 150^e anniversaire de la Société Ramond (1865 – 2015) dans le cadre des commémorations nationales.
- LE COUEDIC M., CHAMPAGNE A., CONTAMINE T., COUGHLAN M., GRAGSON T. & HALEY B. S. 2014. *Rapport de prospection et sondages, Larrau, Pyrénées-Atlantiques. Campagne 2014*. ITEM, EA 3002, Université de Pau et des Pays de l'Adour. Consulté à l'adresse <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01317581>
- MILLET M., PASQUINUCCI M. & TREMENT F. 2000. « The comparison of surface and stratified artifact assemblages ». *Non-destructive techniques applied to landscape archaeology. The Archaeology of Mediterranean Landscapes* 4: 216-222.
- MOCCI F., PALET J.-M., SEGARD 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: VERDIN F., BOUET A. (éd.), *Territoires et paysages de l'âge du Fer au Moyen Âge. Mélanges offerts à Philippe Leveau*. Presses universitaires de Bordeaux, collection Ausonius: 197-212. (halshs-00129518)
- MOCCI F., WALSH K., TALON B., TZORTZIS S., COURT-PICON M. *et al.* 2008. « Structures pastorales d'altitude et paléoenvironnement: Alpes méridionales françaises du Néolithique final à l'âge du Bronze », in: JOSPIN J.-P., AVRIE T., *Premiers bergers des Alpes: de la préhistoire à l'Antiquité*. Infolio Editions: 92-101. (halshs-00409403)
- ORENGO H. 2010. *Arqueología de un paisaje cultural pirenaico de alta montaña. Dinámicas de ocupación del valle del madriu-perafita-claror (Andorra)*. Thèse, Tarragona: Universitat Rovira i Virgili. Institut català d'arqueologia clàssica.
- PALET J.-M., GARCIA A., ORENGO H. & POLONIO T. 2016. Ocupacions ramaderes altimontanes a les capçales del Ter (Vall de Núria i Coma de Vaca, Queralls): resultats de les intervencions arqueològiques 2010-2015. In: *Tretzenes Jornades d'Arqueologia de les comarques de Girona (Banyoles, del 10 al 11 de juny 2016)*: 67-75. Banyoles, Generalitat de Catalunya.
- 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*, Wiley, 20 (4): 303-307.
- POIRIER N., HAUTEFEUILLE F. & CALASTRENC C. 2017 « L'utilisation des microdrones pour la prospection archéologique à basse altitude ». *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*. 2013: 81-94.
- POIRIER N. 2010. *Un espace rural à la loupe: paysage, peuplement et territoires en Berry de la Préhistoire à nos jours. Perspectives historiques*. Tours: Presses universitaires François-Rabelais.
- POIRIER N. 2012. *Thermographie aéroportée*. Récupéré sur Archéodrone: <https://blogs.univ-tlse2.fr/archeodrone/thermographie-aeroportee/>
- POIRIER N. 2018. « Les défis d'une approche multisource des dynamiques d'occupation du sol: l'exemple de la vallée de la Garonne ». *Archéologie, Histoire et Analyse spatiale. Dialogue interdisciplinaire sur la question des SIG archéologiques et historiques* (p. s/n). Lille.
- POIRIER N. « Tracé LGV – REPERAGE (Recherches sur les Espaces, le Peuplement et les Réseaux Anciens de la Garonne) [notice archéologique] ». *ADLFI. Archéologie de la France - Informations* [en ligne]. Occitanie, mis en ligne le 28 janvier 2021. <http://journals.openedition.org/adlfi/53422>
- REITMAIER T. 2013. « Alpine Archäologie in der Silvretta ». *Archäologie Schweiz*, 36: 4-15.
- REITMAIER T. 2010. « Auf der Hut — Methodische Überlegungen zur prähistorischen Alpwirtschaft in der Schweiz ». *ANISA. Verein für alpine Forschung*: 219-239.
- REITMAIER T. 2013. Silvretyta Historica: Satellite-assisted Archaeological Survey in an Alpine Environment. *38th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA, Granada, Spain, April 2010)*: 543-546.
- RENDU C. 2021. *La fabrication des espaces d'altitude. Un parcours pyrénéen entre pastoralisme et agriculture*. Habilitation à diriger des recherches, 1 et 2. Paris.
- RENDU C., BAL M.-C., BILLE E., CALASTRENC C., CAMPMAJO P., CRABOL D., HARFOUCHE R., LE COUEDIC M., PARENT G., POUPET P. & RUAS M.-P. 2005. *Rapport de PCR, PCR Cerdagne. Estivage et structuration sociale d'un espace montagnard*. SRA Languedoc-Roussillon, 129 p.

- RENDU C., PASSARIUS O., CALASTRENC C., JULIA R., LLUBES M., ILLES P., CAMPMAJO P., JORDY C., CRABOL D., BILLE E., CONESSA M., BOUSQUET 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*: 1-20.
- RENDU C. 2000. « Fouiller des cabanes de berger pourquoi faire ? ». *Études rurales*: 151-176.
- RENDU C. 2003. « 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, premiers acquis et perspectives (table ronde de Lattes, 30 janvier 2002) ». *Archéologie du Midi médiéval*, 21: 147-157 (10.3406/amime.2003.1406). (halshs-00131077)
- RENDU C. 2003. *La montagne d'Enveitg. Une estive pyrénéenne dans la longue durée*. Perpignan: Trabucaire.
- RENDU C. 2003. « Pour faire le portrait d'une montagne. Ombres et lumières autour d'Enveitg (Cerdagne, Pyrénées-Orientales) ». *Études rurales*: 11-30.
- 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: KLAPSTE J., SOMMER P., *Medieval rural settlement in marginal landscape. Rurality VII*: 235-251.
- RENDU C., CALASTRENC C. & LE COUEDIC M. 2006. *Archéologie pastorale en vallée d'Ossau, rapport final d'opération, campagne 2006, sondages et prospections*.
- RENDU C., CALASTRENC C., LE COUEDIC M. & BERDOY A. 2016. *Estives d'Ossau. 7000 ans de pastoralisme dans les Pyrénées*. Toulouse: Pas d'Oiseau.
- 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 Enveitg (Pyrénées-Orientales) ». *Bulletin de l'Association pour la promotion des recherches sur l'âge du Bronze*: 58-61.
- 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'Enveitg. *X Colloqui internacional d'arqueologia de Puigcerda*: 661-675.
- RENDU C. & CAMPMAJO P. 1995. « Bergers et troupeaux de Cerdagne: Pastors i ramats de Cerdanya. *Musée de Cerdagne*, 75 (halshs-00963438).
- 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*.
- THIRION-MERLE V. 2014. « Spectrométrie de fluorescence X », in: *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes*. Collection Sciences archéologiques. Éditions des archives contemporaines. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393984>.
- TREMENT F. 2011. « La prospection au sol systématique ». *Les Arvernes et leurs voisins du Massif central à l'époque romaine. Une archéologie du développement des territoires*, 1: 51-96.
- TOUMAZET J.-P., VAUTIER F., ROUSSEL E., RASSAT G. & DOUSTREYSSIER B. 2017. « Automatic detection of complex archaeological grazing structures using airborne laser scanning data ». *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12: 569-579. [ff10.1016/j.jasrep.2017.03.012f](https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.03.012f).
- TZORTZIS S., MOCCI F., WALSH K., DEFASNE C., TALON B. *et al.* 2018. « L'occupation préhistorique et protohistorique de la montagne et de l'abri Faravel dans le parc national des Écrins (Hautes-Alpes, France) ». In: *L'Homme dans les Alpes, de la pierre au métal*. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, 20: 161-176.
- WALSH K. & MOCCI F. 2011. « Mobility in the Mountains: Late Third and Second Millennia Alpine Societies' Engagements with the High-Altitude Zones in the Southern French Alps ». *European Journal of Archaeology*, 14(1-2): 88-115. [doi:10.1179/146195711798369427](https://doi.org/10.1179/146195711798369427)
- WALSH K., COURT-PICON M., MOCCI F., SEGARD M. & PALET MARTINEZ J. M. 2007. « Occupation de la montagne et transformation des milieux dans les Alpes méridionales au cours de l'âge du Bronze: approche croisée des données palynologiques et archéologiques en Champsaur et Argentiérois (Hautes-Alpes, France) », in: MORDANT C., MAGNY M., *Environnements et cultures à l'âge du Bronze en Europe occidentale*: 89-106.
- ZADORA-RIO E. 1986. « Archéologie d'un espace rural: la genèse du parcellaire de la commune de Blou (Maine-et-Loire) ». *Revue géographique de l'Est*, 26, 3-4: 155-166.
- ZAKŠEK K., OŠTIR K. & KOKALJ Ž. 2011. « Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique ». *Remote Sensing*, 3 (2): 398-415.
- ZINGMAN I., SAUPE D. & LAMBERS K. 2013a. « Automated search for livestock enclosures of rectangular shape in remotely sensed imagery ». *Conference Image and Signal Processing for Remote Sensing XIX*. Dresden, Germany. <https://doi.org/10.1117/12.2027704>
- ZINGMAN I., SAUPE D. & LAMBERS K. 2013b. Detection of Texture and Isolated Features Using Alternating Morphological Filters. In: *11th International Symposium, ISMMUppsala, Sweden, May 27-29*, Volume: Mathematical Morphology and Its Applications to Signal and Image Processing: 440-451. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38294-9_37
- ZINGMAN I., SAUPE D. & LAMBERS K. 2014. « A morphological approach for distinguishing texture and individual features image ». *Pattern Recognition Letters*, 47: 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.03.019>
- ZINGMAN I., SAUPE D. & LAMBERS K. 2015. « Detection of incomplete enclosures of rectangular shape in remotely sensed images ». *EARTHVISION 2015 IEEE/ISPRS Workshop "Looking from above: When Earth observation meets vision"*. Boston: 86-96. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2015.7301387>
- ZINGMAN I., SAUPE D., SAUPE D.-A.-B., PENATTI O. & LAMBERS K. 2016. « Detection of Fragmented Rectangular Enclosures in Very High Resolution Remote Sensing Images (Vol. 54) ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (8): 4580-4593. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2545919>