



**HAL**  
open science

## **Rapport final 2023 programme collectif de recherche (2021-2023) le FER en Ariège et dans les Pyrénées-Orientales (PCR FERAPO)**

Gaspard Pagès, Alexandre Disser, Philippe Fernandez, Marie-Claude Jolly-Saad,  
Jean-Noël Lamiable, Maxime L'Héritier, Jordi Mach, Jean-Charles Méaudre,  
Florian Téreygeol

### ► To cite this version:

Gaspard Pagès, Alexandre Disser, Philippe Fernandez, Marie-Claude Jolly-Saad, Jean-Noël Lamiable, et al.. Rapport final 2023 programme collectif de recherche (2021-2023) le FER en Ariège et dans les Pyrénées-Orientales (PCR FERAPO). CNRS; Ministère de la culture et de la communication; Drac - SRA Occitanie. 2024, pp.129. <halshs-05210315>

**HAL Id: halshs-05210315**

**<https://shs.hal.science/halshs-05210315v1>**

Submitted on 10 Sep 2025

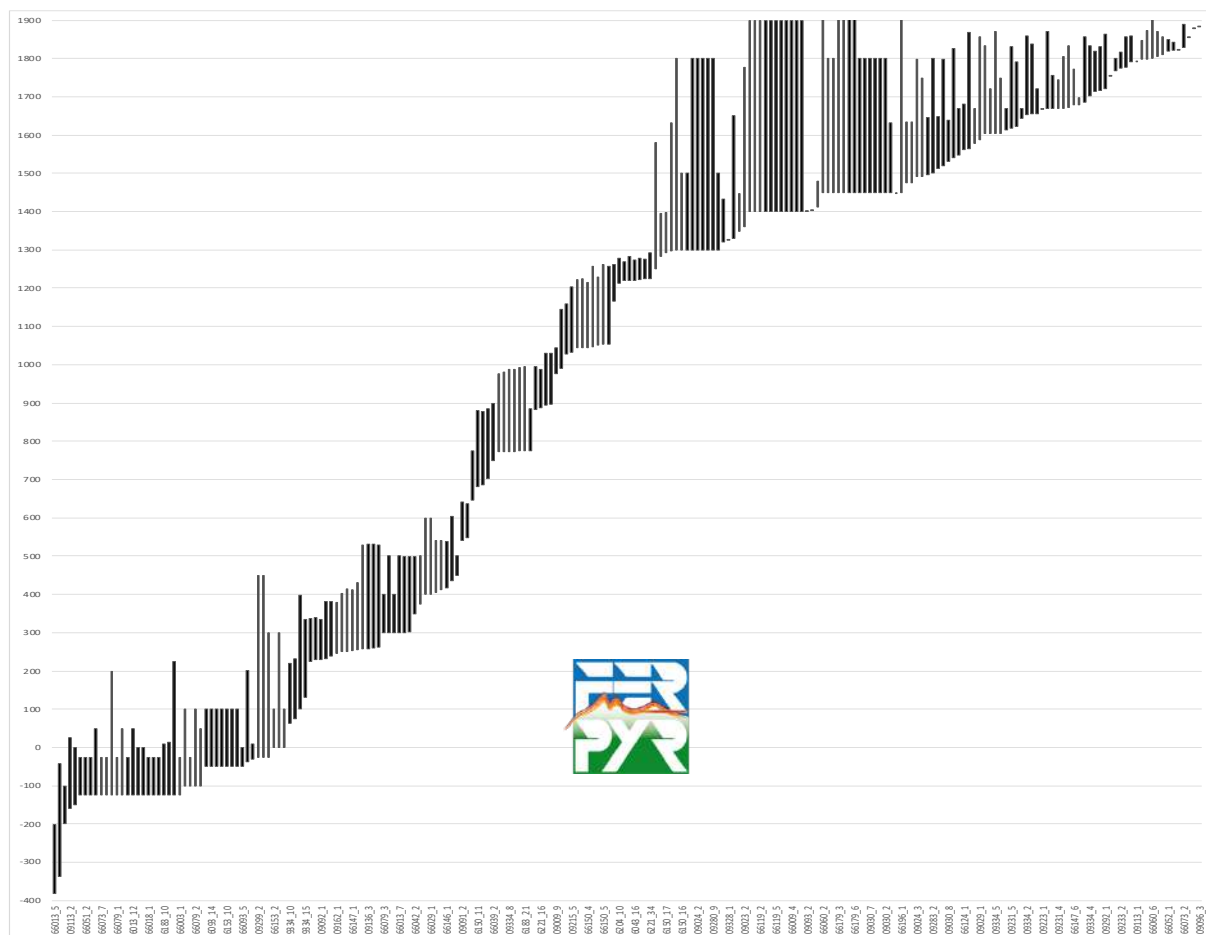
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.



HAL Authorization

**Rapport final 2023**  
**Programme Collectif de Recherche (2021-2023)**  
**le FER en Ariège et dans les Pyrénées-Orientales**  
**(PCR FERAPO)**  
**Arrêté n°76-2023-0739 du 11/07/2023**



Par  
Gaspard Pagès, Alexandre Dissier

**Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)**  
**Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn) - UMR7041**  
**LAPA-IRAMAT- UMR 7065**

**Service Régional de l'Archéologie**  
**Direction Régionale des Affaires Culturelles Occitanie**  
**Ministère de la Culture et de la Communication**

Janvier 2024



## Sommaire

Sommaire .....	2
Avant-propos .....	2
Section I : Données administratives, techniques et scientifiques.....	3
1. Fiche signalétique.....	3
2. Générique de l’opération.....	3
Section II : Inventaire détaillé .....	8
1. Préambule.....	8
2. animations scientifiques entre 2021 et 2023 .....	9
2. Les 15 sites métallurgiques découverts en 2023 .....	13
3. Notices complémentaires aux découvertes archéologiques .....	29
2. Les 108 charbonnières découvertes en 2022 et 2023 .....	34
Section III : Synthèse géographique et chronologique des découvertes .....	36
Section IV : Minerai et scorie, synthèse concernant leur composition chimique .....	82
Vers un nouveau triennal 2024-2026 .....	121
Table des figures .....	124
Table des tableaux.....	126
Table des matières.....	127

### Avant-propos

Sauf mention contraire, les figures comme le texte sont des auteurs aillant rédigés ce rapport. Dans toutes les figures, sauf mention contraire, le Nord est indiqué par le haut de la page (exactement perpendiculaire).

### **Illustration de couverture**

Les bornes chronologiques inférieures et supérieures du fonctionnement de tous les sites de réduction datés dans les départements de l’Ariège et des Pyrénées-Orientales.

## Section I : Données administratives, techniques et scientifiques

### 1. Fiche signalétique

#### *Nature et références de l'opération*

Rapport final du Programme Collectif de Recherche (2021-2023) « le FER en Ariège et dans les Pyrénées-Orientales » (PCR FERAPO) dont le numéro d'arrêté est 76-2023-0739 du 11/07/2023 (Figure 1).

#### *Responsable scientifique de l'opération et organisme de rattachement*

- Gaspard Pagès - Chargé de Recherche au CNRS dans l'équipe Archéologie de la Gaule dans le Monde Antique (GAMA) de l'UMR7041 Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn).
- Alexandre Disser - Chargé de Recherche au CNRS dans le Laboratoire Archéomatériaux et Préviation de l'Altération (LAPA) de l'UMR 7065 Institut de Recherche sur les Archéomatériaux (IRAMAT).

#### *Localisation*

Tous les départements de l'Ariège (09) et des Pyrénées Orientales (66)

#### *Dates d'intervention sur le terrain*

Du 21 au 31 juillet.

Du 14 au 21 août.

#### *Mots-clés*

##### Chronologie

Antiquité romaine (Gallo-romaine), époque médiévale, époque moderne

##### Interprétation

Ateliers métallurgiques, analyse de métaux, acquisition de données

### 2. Générique de l'opération

#### *Equipe de prospection et/sondage (par ordre alphabétique) entre 2021 et 2023*

Philippe Cabau de Fauroune

Jean-Claude Coulet

Sandrine Bienfait

Patrick Berlureau

Alexandre Disser

Claude Dubois

Philippe Fernandez

Florence Guillot

Tobias Heal

Jean-Noël Lamiable

Denis Leblon

Denis Langlois

Jordi Mach

Sibylle Manya

Jean-Charles Méaudre

Sébastien Nègre

Gaspard Pagès  
Jacques Seguelas  
Michel Thouzery  
Enrique Vega  
Jean-Marc Zeziola

*Sans oublier tous les informateurs qui nous aident sur le terrain, près de 300 personnes de l'ombre sans qui cette recherche n'aurait pas été possible....*

*Analyse des archéomatériaux (par ordre alphabétique) entre 2021 et 2023*

Philippe Dillmann : UMR 7065-IRAMAT- LAPA  
Alexandre Disser : UMR 7065-IRAMAT- LAPA  
Manon Gosselin : UMR7041 ArScAn et UMR 7065-IRAMAT- LAPA  
Tobias Heal : UMR7041 ArScAn et UMR 7065-IRAMAT- LAPA  
Eddy Foy : UMR 7065-IRAMAT- LAPA  
Stéphanie Leroy : UMR 7065-IRAMAT- LAPA  
Maxime L'Héritier : UMR7041 ArScAn  
Gaspard Pagès : UMR7041- ArScAn équipe GAMA  
Enrique Vega : UMR 7065-IRAMAT- LAPA

*Anthracologie entre 2021 et 2023*

Marie-Claude Saad : UMR7041- ArScAn équipe GAMA  
Christophe Vaschalde : LA3M-UMR 7298 / ISEM-UMR 5554

*Céramologie entre 2021 et 2023*

Jérôme Kotarba INRAP

*Photographies, photogrammétrie et couverture 3D entre 2021 et 2023*

Cédric Beauval Archéosphère  
Jean-Charles Méaudre UMR 7065-IRAMAT- LAPA

*SIG et Web SIG 2021 et 2023*

Laurent Costa (Ingénieur de Recherche CNRS, UMR 7041 ArScAn et MSH Mondes)  
Julien Curie (Postdoctorant, UMR 7041 ArScAn et MSH Mondes)

*Histoire entre 2021 et 2023*

Catherine Verna : Université de Paris 8 EA1571 : Histoire des pouvoirs, savoirs et sociétés

*Gestion administrative 2023*

**Association Pyrène**

*Financements 2023*

- CNRS, UMR7041 Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn), équipe GAMA.
- CNRS, UMR 7065-IRAMAT- LAPA
- Ministère de la Culture et de la communication, DRAC Languedoc-Roussillon, SRA Languedoc-Roussillon.



**PRÉFET  
DE LA RÉGION  
OCCITANIE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Direction régionale  
des affaires culturelles**

Arrêté n° 76-2023-0739 du 11/07/2023 portant autorisation de projet collectif de recherches.

Le Préfet de région ;

Vu le Code du patrimoine et notamment son livre V ;

Vu l'arrêté préfectoral du 3 mars 2023 portant délégation de signature à M. Michel ROUSSEL, Directeur régional des affaires culturelles d'Occitanie ;

Vu l'arrêté modificatif du 20 juin 2023 de M. Michel ROUSSEL portant subdélégation de signature aux agents de la Direction régionale des affaires culturelles (compétences régionales et ordonnancement secondaire) ;

Vu le dossier, enregistré sous le n° PGR762023000130, de demande d'opération archéologique arrivé le 18 décembre 2022 ;

Vu l'avis favorable de la Commission territoriale de la recherche archéologique (CTRA), Commission Sud-Ouest, qui s'est réunie du 13 au 14 avril 2023 ;

## **ARRÊTE**

**Article 1** - Monsieur Gaspard PAGÈS est autorisé, en qualité de responsable scientifique, à conduire une opération de projet collectif de recherches à partir de la date de notification du présent arrêté jusqu'au 31 décembre 2023, sise en :

RÉGION : OCCITANIE

DÉPARTEMENTS : ARIÈGE et PYRÉNÉES-ORIENTALES

Intitulé de l'opération : 2023 - PCR FERAPO.

Programme de recherche : Axe 12. Mines et matériaux associés.

Code de l'opération : **1112631**

### **Article 2 - Prescriptions générales**

Les recherches sont effectuées sous la surveillance du Conservateur régional de l'archéologie territorialement compétent et conformément aux prescriptions imposées pour assurer le bon déroulement scientifique de l'opération.

Le responsable scientifique de l'opération informe régulièrement le Conservateur régional de l'archéologie de ses travaux et découvertes. Il lui signale immédiatement toute découverte importante de caractère mobilier ou immobilier. Il revient au Préfet de région de statuer sur les mesures définitives à prendre à l'égard des découvertes.

À la fin de l'année civile, le responsable scientifique de l'opération adresse au Conservateur régional de l'archéologie, en triple exemplaire papier plus un exemplaire au format pdf sur un support physique (CD, clé USB...), un rapport accompagné des plans et coupes précis des structures découvertes et des photographies nécessaires à la compréhension du texte. L'inventaire de l'ensemble du mobilier recueilli est annexé au rapport d'opération. Il signale les objets d'importance notable. Il indique les études complémentaires envisagées et, le cas échéant, le délai prévu pour la publication.

### **Article 3 - Destination du matériel archéologique découvert**

Le responsable prend les dispositions nécessaires à la sécurité des objets mobiliers. Le mobilier archéologique est mis en état pour étude, classé, marqué et inventorié. Son conditionnement est adapté par type de matériaux et organisé en fonction des unités d'enregistrement. Le statut juridique et le lieu de dépôt du matériel archéologique découvert au cours de l'opération sont fixés conformément aux dispositions légales et réglementaires et aux termes des conventions passées avec les propriétaires des terrains concernés.

### **Article 4 - Mouvements et prélèvements sur les objets**

Pendant la durée d'étude du mobilier archéologique (maximum 5 ans), l'État est responsable de la sécurité des biens et de la réalisation des opérations d'étude scientifique nécessaires dans l'intérêt public de la recherche archéologique. Ainsi, tout mouvement des collections à des fins d'étude, d'expertise ou d'analyse, doit faire l'objet d'un accord préalable du Conservateur régional de l'archéologie. La demande à lui adresser doit être accompagnée d'un inventaire des pièces concernées par ce déplacement et indiquer la durée du mouvement.

Par ailleurs, si ce transfert temporaire pour étude ou analyse induit une sortie du mobilier hors du territoire national, le responsable de l'opération doit adresser une demande spécifique d'autorisation au Conservateur régional de l'archéologie (formulaire Cerfa n° 02-0083, <https://www.culture.gouv.fr/Media/Thematiques/Circulation-des-biens-culturels/Files/Informations-pratiques-procedures-d-exportation/Formulaire-de-demande-d-autorisation-de-sortie-temporaire-AST-d-un-bien-culturel-Cerfa-n-02-0083>).

### **Article 5 - Versement des archives de fouilles**

L'intégralité des archives accompagnée d'une notice explicitant son mode de classement et de conditionnement et fournissant la liste des codes utilisés avec leur signification, fait l'objet de la part du responsable de l'opération d'un versement unique. Ce versement est détaillé sur un bordereau récapitulatif établi par le responsable de l'opération, dont le visa par le Préfet de région vaut acceptation et décharge. Le lieu de conservation est désigné par le Préfet de région.

### **Article 6 - Prescriptions particulières**

Néant.

**Article 7** - Le Directeur régional des affaires culturelles est chargé de l'exécution du présent arrêté, qui sera notifié à Monsieur Gaspard PAGES.

Fait à Montpellier, le 11 juillet 2023.

Pour le Préfet de région,  
et par délégation, le Directeur régional des affaires culturelles,  
et par subdélégation,  
le Conservateur régional de l'archéologie



Didier DELHOUME

Figure 1 : PCR FERAPO, copie d'arrêté de décision du préfet de région.

## Section II : Inventaire détaillé

### 1. Préambule

En 2023, nous avons continué à harmoniser les données rassemblées dans les départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales. Aujourd'hui plus de 715 sites sont donc inventoriés sur les 2 départements à l'heure actuelle et 750 charbonnières. Ces données sont disponibles, régulièrement mises à jour et surtout encore travaillées. Elles seront stabilisées au cours de l'année 2024.

Elles sont consultables ici :

<https://fnp.huma-num.fr/aws/app/06f53e56-73ab-11ec-acd2-bdee5baca7bf/index.html?dummy=1643015360504>

Dans ce rapport sont exposés les résultats bruts des actions réalisées en 2023. Mais c'est surtout la synthèse chronologique, géographique et chimique qui est détaillée dans ce rapport de fin de triennal en tenant compte de toutes les données produites depuis pratiquement 10 ans et le commencement des programmes 1. Le fer antique et médiéval du massif du Canigou et des Pyrénées-Orientales sous la direction de Gaspard Pagès en 2014 et 2. Mines et métallurgie du fer pour les périodes historiques dans le département de l'Ariège sous la direction d'Alexandre Disser en 2017.

Dans ce rapport, les données brutes présentées comptent :

15 nouveaux sites découverts en 2023

108 charbonnières découvertes en 2022 et 2023

16 nouvelles datations C14 qui sont ventilées dans le bilan chronologique et géographique.

24 analyses ICP de scorie de fer qui sont ventilées dans le bilan chimique détaillée.

À noter que toutes les données, notamment des découvertes, avec leur géoréférencement, sont disponibles en couche shp ou GEOPACKAGE. Veuillez vous adresser pour cela à Gaspard Pagès ou Alexandre Disser.

Au terme de ce triennal, nous dressons également un bilan sur l'animations de la recherche au sujet du PCR FERAPO : publications colloque etc.

À noter que cette année Gaspard Pagès a collaboré en tant que spécialiste à l'étude et à la rédaction du rapport de l'opération de fouille archéologique préventive de l'INRAP dénommée "Cœur-de-Ville" à Prades (Pyrénées-Orientales) - F137928 – et dirigée par Odile Maufra

## 2. animations scientifiques entre 2021 et 2023

### *Publications scientifiques :*

- L'Héritier M., Verna C., Gosselin M., Mach J., Pagès G.
- 2022 : Le fer des ferrures de porte des églises médiévales du Roussillon : technique, qualité, provenance et datation, *Les Cahiers de Saint-Michel de Cuxa*, n°LIII, p. 219-220
- Pagès G., Dillmann P., Vega E., Berranger M., Bauvais S., Long L., Fluzin P.,
- 2022, «Vice-versa : the iron trade in the western Roman Empire between Gaul and the Mediterranean», *Plos One*, <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0268209>
- Pagès G., Verna C.,
- 2022, L'invention de l'industrie antique et médiévale, *Artefact - Techniques, histoire et sciences humaines*, n°17, p. 243-264
- Mach J. et Pagès G.
- 2021 : « Le Pla de les Iules 1 : premier jalon sur la production du fer ancienne dans la haute vallée de Carol », *Records de l'Aravó*, n° 17, p. 6-12.
- Pagès G.,
- Sous-presse, « La production des fers dans l'Antiquité romaine : entre industrie et commerce à moyennes et longues distances » in Philippe Charlier et Dominique Garcia (Dir.), *Anthropologie et Archéologie du fer*, CNRS éditions.
- Pagès G.,
- Sous-presse, « Des Pyrénées à la Montagne Noire, la production du fer dans la Narbonnaise antique : vers un bilan historiographique et archéologique de 50 années de recherche » in Hédi Dridi, Silvia Festuccia, Lorenza Ilia Manfredi (Dir), *Le massif de l'Atlas entre Sahara et Méditerranée : ressources, itinéraires et installations*, éditions Alphil, Neuchâtel (Série Philainos, n° 3).
- Pagès G.,
- Sous-presse, « Les mines », in Sanchez C., Ginouvez O. et Sabrié R. (DIR.), *Narbonne, fille de Rome*, éd. Midi-Pyrénées, Portet-sur-Garonne.
- L'Héritier M., Verna C., Gosselin M., Mach J., Heal, Pagès G.
- Sous-presse : Les ferrures des portes des églises et des fortifications médiévales du Roussillon : technique, qualité, provenance et datation, *Les Cahiers de Saint-Michel de Cuxa*.
- Alexandre Dissier,
- Sous-presse, 'Réduction des minerais de fer dans la vallée de Vicdessos (Ariège). Percevoir la longue durée à travers l'histoire et l'archéologie', actes de la table-ronde « Techniques et temporalités », *Revue Artefact*
- Alexandre Dissier, Claude Dubois, Jean-Noël Lamiable,
- Sous-presse, 'Recherches sur l'extraction et le traitement des minerais de fer en Ariège, de l'Antiquité à l'époque contemporaine', Actes de la journée départementale d'archéologie de l'Ariège 2023
- Pagès G., Jolly-Saad M.-C.
- A paraître, Exploitation of wood and iron in the Pyrenean highlands during the Visigothic period: the case of Puymorens pass and Carol Valley, *Frontiers in Environmental Archaeology*.

## Rapport INRAP

- Pagès G., 2023, « 11. Étude préliminaire des déchets de la métallurgie » in Maufra O. et Tosna D. (DIR.), *Cœur de Ville, rues du Palais de Justice et Jean Jaurès Flanc méridional de la Ruha de l'Antiquité à nos jours (Prades, 66)*, Nîmes éd. Institut national de recherches archéologiques préventives de Midi Méditerranée (coll. Rapport final d'opération de fouille archéologique, Ministère de la Culture, Service Régional de l'Archéologie d'Occitanie), p. 389-400.

## Colloques

### 2021 :

- Gaspard Pagès, Alexandre Disser, *'Prospections thématiques « Mines et métallurgie aux périodes historiques »*, communication orale dans les Journées d'étude de la Société Archéologique Française d'Etude des Mines et de la Métallurgie, Moulis (Ariège), 21-24 octobre 2021.
- Catherine Verna, Philippe Dillmann et Gaspard Pagès. Atelier concept du GDR 2092 Techniques et production dans l'histoire (TPH) Archéométrie et histoire des techniques (Nanterre) : « *L'histoire de la sidérurgie. Un terrain expérimental* ».

### 2022 :

- Gaspard Pagès, Laurent Costa, Philippe Dillmann, Enrique Vega, Jean-Charles Méaudre, Catherine Verna, Stéphanie Leroy, Alexandre Disser, Florian Téreygeol, XXIIIe colloque du GMPCA, Chambéry : « L'industrie du fer dans la moitié orientale des Pyrénées (du Canigou au Couserans) de l'Antiquité au XVIIe s. : les programmes FEDER FERMAPYR et PCR FERAPO ».
- Julien Curie, Gaspard Pagès, Laurent Costa, Alexandre Disser, and Eddy Foy, XVIIIème Congrès Français de Sédimentologie (Brest) : « Le WebSIG des programmes FEDER FERMAPYR et PCR FERAPO, une plateforme numérique en ligne alliant géosciences et archéologie »
- Alexandre Disser, Claude Dubois, Jean-Noël Lamiabie, *'Recherches sur l'extraction et le traitement des minerais métalliques de l'Antiquité au XXe s.'*, Journée départementale d'archéologie de l'Ariège, 23 avril 2022
- Alexandre Disser, Gaspard Pagès, *'Etudier sur la longue durée le patrimoine minier et métallurgique de l'est du massif pyrénéen'*, communication orale dans le séminaire TERRAE de l'UMR TRACES, 10 juin 2022.
- Alexandre Disser *'Réduction des minerais de fer dans la vallée de Vicdessos (Ariège). Percevoir la longue durée à travers l'histoire et l'archéologie'*, Table-ronde « Techniques et temporalités » du GDR Techniques et Production dans l'Histoire, 12 octobre 2022
- Gaspard Pagès, Alexandre Disser, *'Le fer dans la moitié orientale des Pyrénées de l'Antiquité à l'Époque moderne : les programmes FERAPO et FERMAPYR ; nouvelles perspectives'*, communication orale dans les Journées d'étude de la Société Archéologique Française d'Etude des Mines et de la Métallurgie, Laurion (Attique, Grèce), 26-29 octobre 2022
- Gaspard Pagès et Catherine Verna, séminaire de l'École Normal Supérieure de Paris Technique et science du Moyen Âge à la Renaissance : matériaux, pratiques et savoirs sur « L'observatoire catalan. La métallurgie du fer de l'Antiquité à la Renaissance ».

### 2023 :

- Maxime L’Héritier, Catherine Verna, Manon Gosselin, Tobias Heal, Jordi Mach, Alexandre Disser, Gaspard Pagès, XXIVe colloque du GMPCA, Nice : « Les ferrures des portes romanes du Roussillon : qualité, technique et provenance. Une première approche ».
- Laurent Costa et Gaspard Pagès, XXIVe colloque du GMPCA, Nice : « Vers une base de données collaborative sur l’exploitation du minerai de fer dans les Pyrénées : les prolongements du programme FEDER FERMAPYR et PCR FERAPO » par
- Pagès Gaspard, Disser Alexandre, Téreygeol Florian, 1er Forum de l’Archéologie Régionale de la région Occitanie, Narbonne : « Mines et métallurgies primaires antiques et médiévales du Haut-Languedoc aux Pyrénées ».
- Gaspard Pagès et Alexandre Disser, Workshop international Secondary glass productions in the early Middle Ages (Orléans): “How did late Roman and early Medieval Glassmakers and Blacksmiths interact? A Review of some archaeological and archaeometric Evidences” par
- Pagès Gaspard, Disser Alexandre, Vega Enrique, Méaudre Jean-Charles, Foy Eddy, Manon Gosselin, Maxime L’Héritier, Dillmann Philippe, Florian Téreygeol, Verna Catherine, séminaire de l’Ecole Normal Supérieure de Paris Technique et science du Moyen Âge à la Renaissance : matériaux, pratiques et savoirs sur « Comprendre le paysage métallurgique antique et médiéval de la moitié orientale des Pyrénées à travers l’archéométrie ».
- Gaspard Pagès et Laurent Costa, séminaire Humanités numériques en Histoire du master Histoire et Archives de l’Université de Paris 8 sur « FEDER FERMAPYR et PCR FERAPO: d’une base de données archéologique à une base de données collaborative ».
- Gaspard Pagès, Cours d’été IUK (UPV/EHU) Más que espadas; el hierro en el imperio romano à Irun (Pays Basque Espagne) : « L’évolution des techniques et des systèmes de production antique en Gaule du Sud ».
- Gaspard Pagès, Cours d’été IUK (UPV/EHU) Más que espadas; el hierro en el imperio romano à Irun (Pays Basque Espagne) : « L’interaction de l’industrie du fer avec son environnement naturel et le réseau de peuplement de Narbonnaise ».

#### *Enseignements universitaires :*

##### 2022 :

- Alexandre Disser, Emilie Bérard, *‘Approches interdisciplinaires pour l’étude de la métallurgie du fer’*, cours magistral (3h) dans le cadre de l’unité d’enseignement Licence 3 P2R de Sorbonne Université

##### 2023 :

- Alexandre Disser, Emilie Bérard, *‘Approches interdisciplinaires pour l’étude de la métallurgie du fer’*, cours magistral (3h) dans le cadre de l’unité d’enseignement Licence 3 P2R de Sorbonne Université
- Alexandre Disser, Emilie Bérard, *‘Production, circulation et échanges des matériaux ferreux’*, cours magistral (2h) dans le cadre du module Archéométrie du Master Sociétés et Biodiversité, Muséum National d’Histoire Naturelle, 22 mars 2023
- Alexandre Disser, *‘Reconstituer les systèmes de production et d’échange des alliages ferreux anciens’*, Jeudis d’Archéologie Médiévale et Moderne de Paris Panthéon-Sorbonne, séminaire de Master (3h)

*Conférences grand public :*

- 2022 : Alexandre Disser, Claude Dubois, Jean-Noël Lamiable *et al.*, 'Vingt siècles d'activités minières et métallurgiques ? Nos connaissances actuelles sur les rythmes et les techniques de production du fer en Ariège', Conférence présentée au Journées du fer de Sem (Ariège), 30-31 juillet 2022
- 2023 (Annulée au dernier moment) : conférence au Musée de Cerdagne (Sainte-Léocadie, 66) sur « Exploitation du minerai et production de fer de l'Antiquité au Moyen Âge dans la vallée de Carol dans son contexte régional »

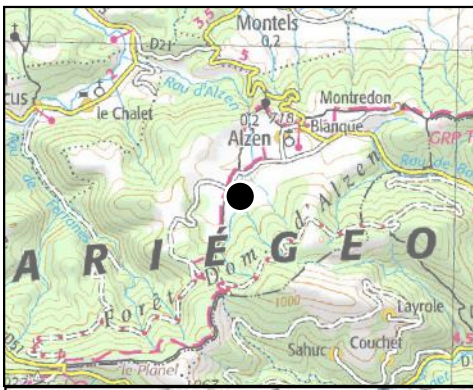
*Site internet :*

Gaspard Pagès, Laurent Costa, Julien Curie, Alexandre Disser, WebSIG '*L'industrie du fer dans le massif des Pyrénées (du Canigou au Couserans/Antiquité-milieu XVIIe s.)*,  
url :<https://fnp.huma-num.fr/aws/app/eceeb117-b0f3-11ec-889a-851face7698e/index.html?dummy=1648732682940>

## 2. Les 15 sites métallurgiques découverts en 2023

NOM SITE	COMMUNE	N°PROJET	Page catalogue nouveau site
Estreme 02	ALZEN	09009 11	14
Saleix Village 01	AUZAT	09030 9	15
Cazaux 01	CAZAVET	09091 1	16
Cazaux 02	CAZAVET	09091 2	17
Viala 01	GESTIES	09134 1	18
Raziou 01	LERCOUL	09162 7	19
Barraque 01	MONTELS	09203 1	20
Freychenet Village 01	FREYCHENET	09215 5	21
Clot de Menie 01	FREYCHENET	09215 6	22
Sarraute 02	SAURAT	09280 11	23
Portillon d'Albe 01	SENTEIN	09290 1	24
Seuillac 01	SIGUER	09295 7	25
Camp du Dragon 01	VAL DE SOS	09334 15	26
Maison Fred	VAL DE SOS	09334 16	27
Cabre Morte 3	PRATS-DE-MOLLO-LA-PRESTE	66150 21	28

Tableau 1 : Table des matières des 15 sites métallurgiques découverts en 2023.



**Nom : Estreme 02**

**Commune et code commune : ALZEN ; 9009**

N° projet : 09009\_11

N° Patriarche :

X en L93 : 574707.7172555582

Y en L93 : 6210412.130924149

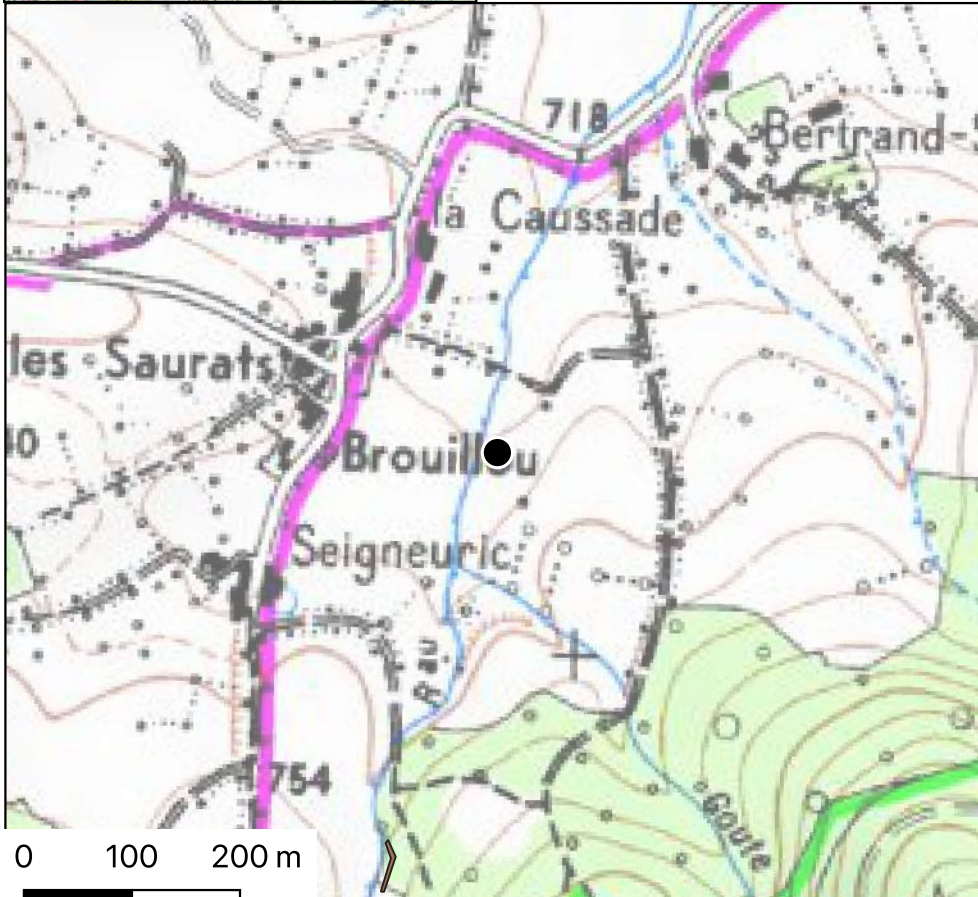
**Cadastre**

Section : OB

Date création : 27/11/2023

Numéro : 131 a 134

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Dissier Alexandre, Jean Noel  
Lamiable

Informateur :

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel  
Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°): 0

Commentaire :

Végétation PRAIRIES:

Lisibilité : MAUVAISE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : DETRUIT

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

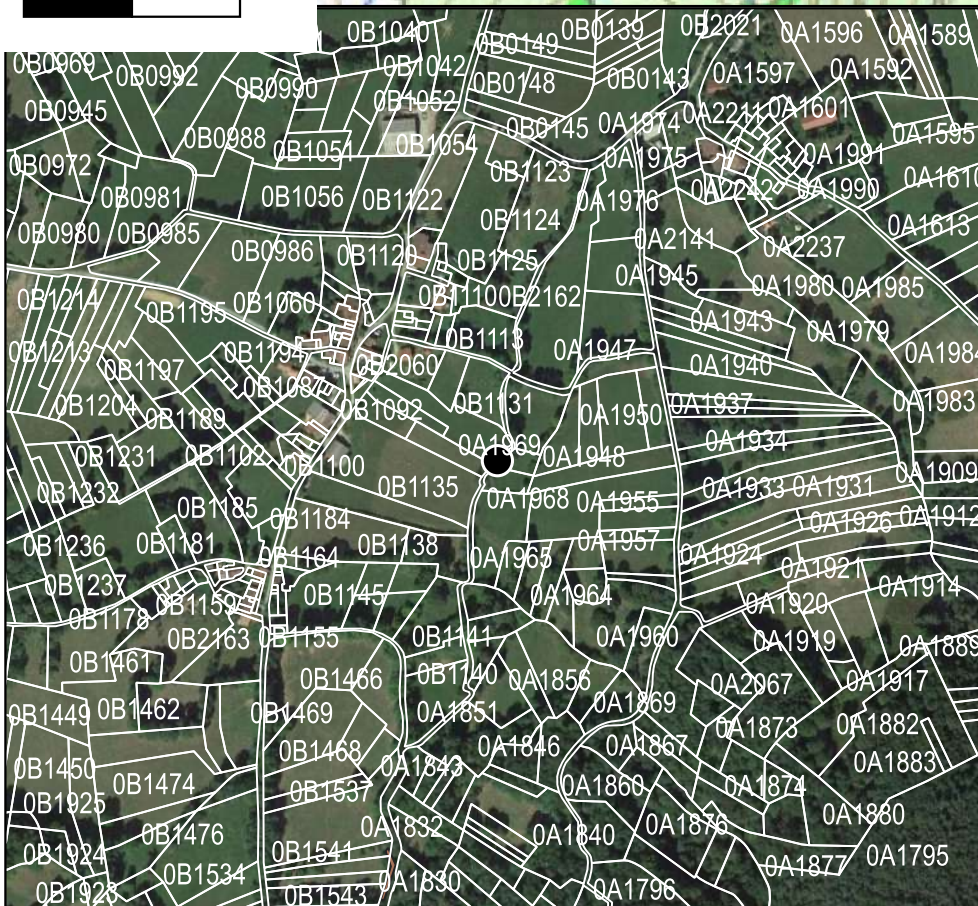
Analyse ICP : 00

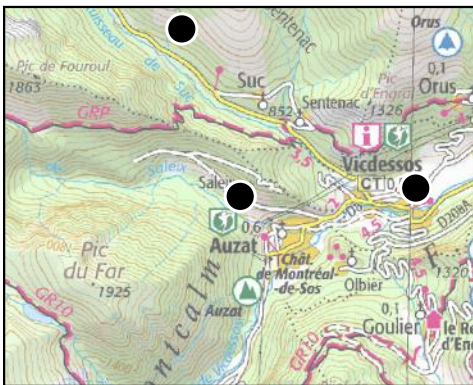
Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





# Nom : Saleix Village 01

Commune et code commune : AUZAT ; 9030

N° projet : 09030\_9

N° Patriarche :

X en L93 : 574843.5062731713

Y en L93 : 6186846.286632217

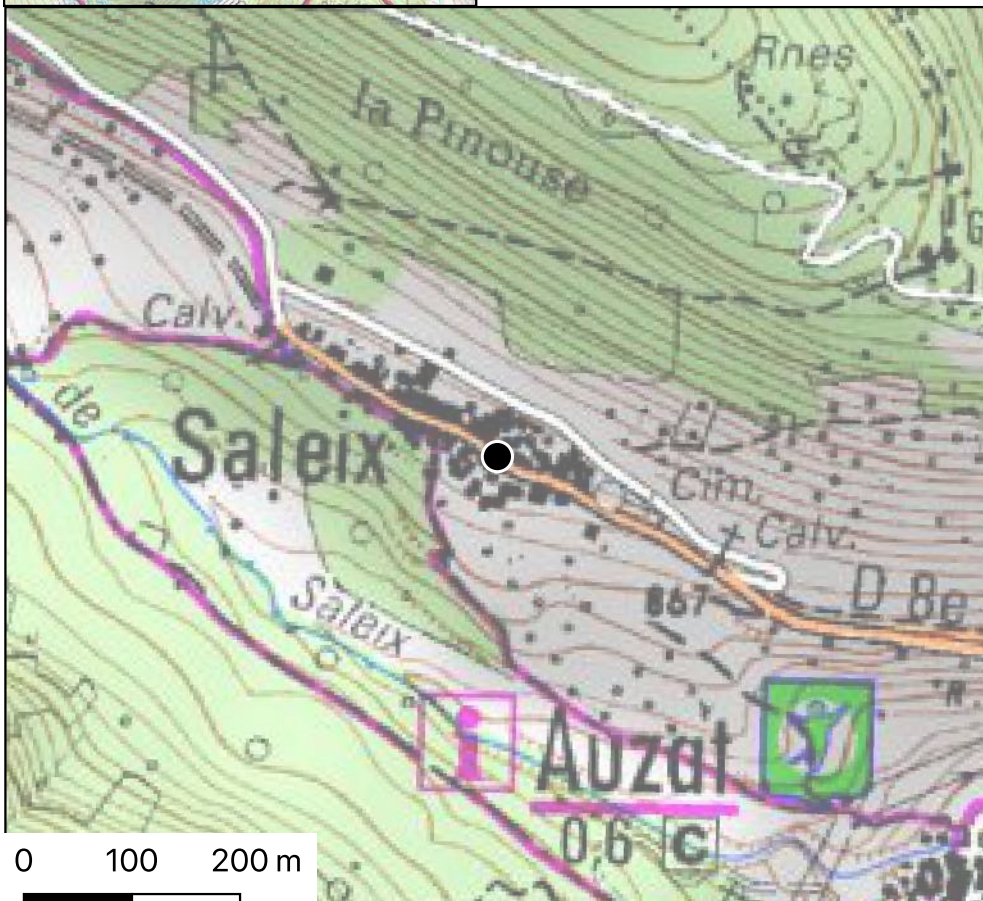
## Cadastre

Section : OD

Numéro : multiple

Date création : 27/11/2023

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Jean Noel Lamiable

Informateur :

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation HABITAT:

Lisibilité : MAUVAISE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : DETRUIT

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

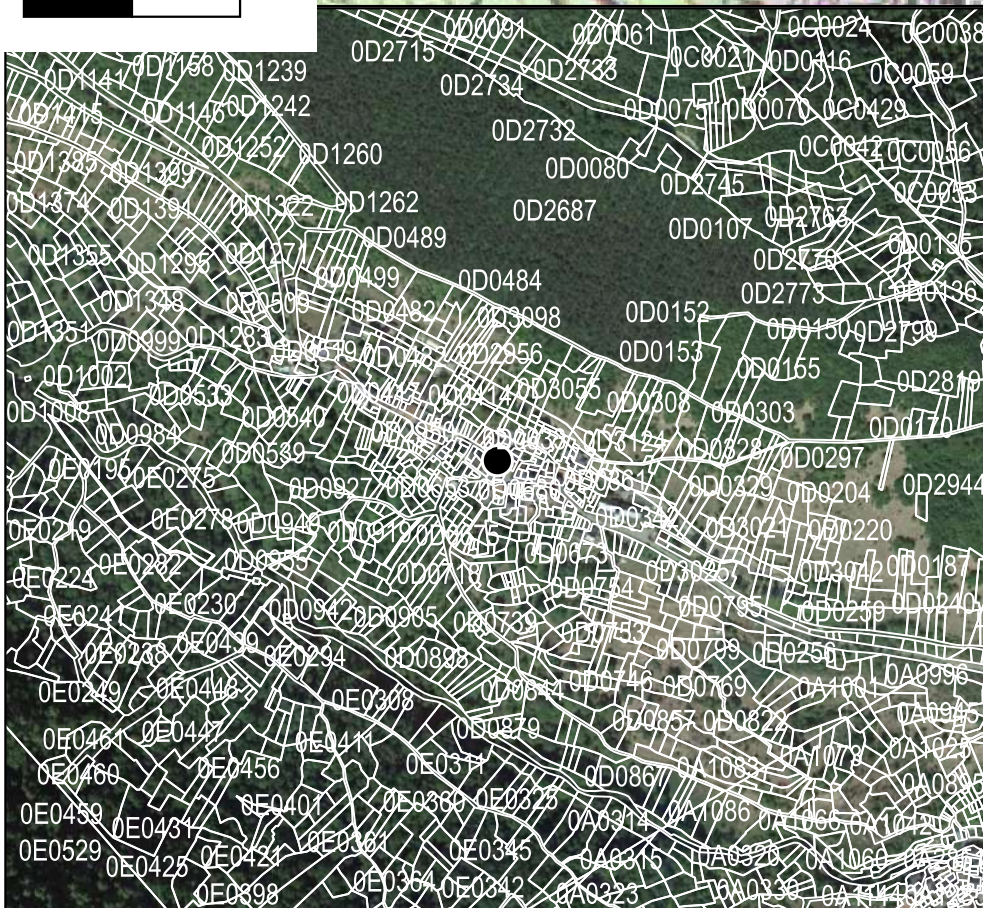
Analyse ICP : 00

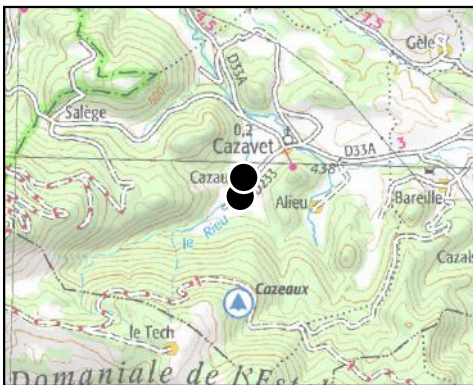
Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





# Nom : Cazaux 01

Commune et code commune : CAZAVET ; 9091

N° projet : 09091\_1

N° Patriarche :

X en L93 : 539740.8857986964

Y en L93 : 6212731.777184664

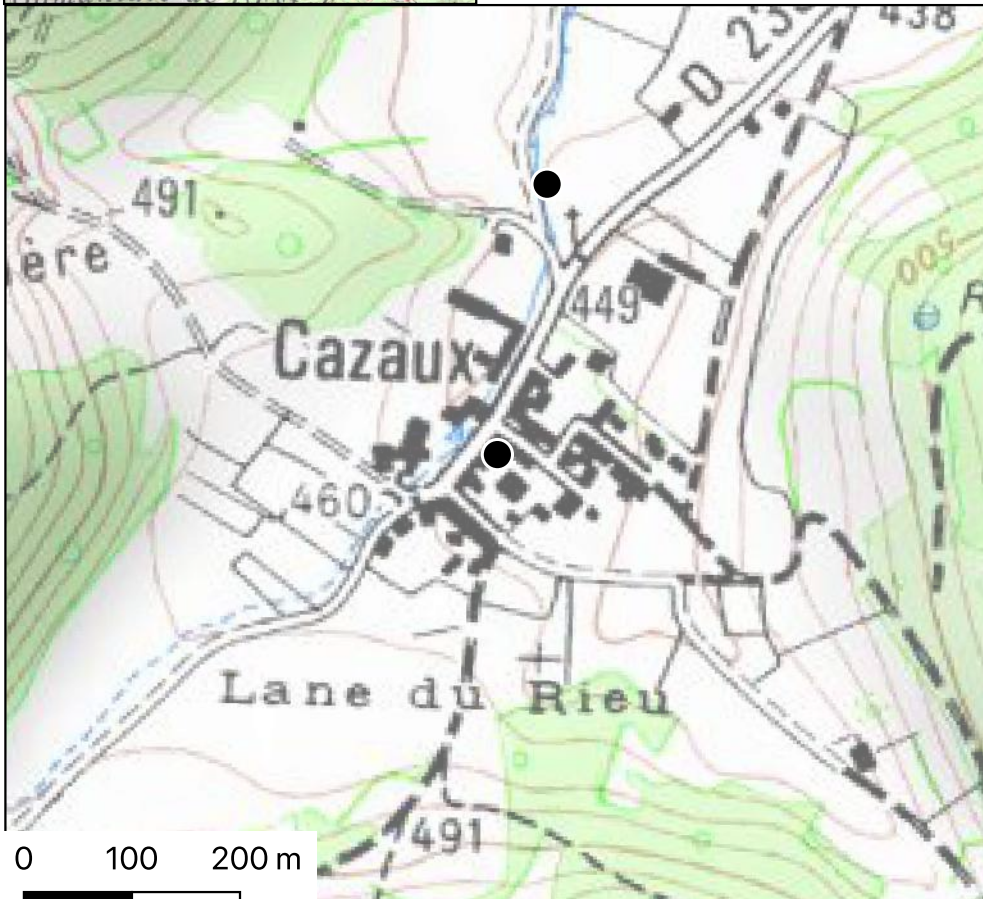
## Cadastre

Section : OB

Numéro : 613

Date création : 27/11/2023

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Nathalie Dupuy

Informateur : Nathalie Dupuy

Equipe : Dissier Alexandre, Dubois Claude, Dupuy Nathalie, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation HABITAT:

Lisibilité : MAUVAISE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : DETRUIT

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

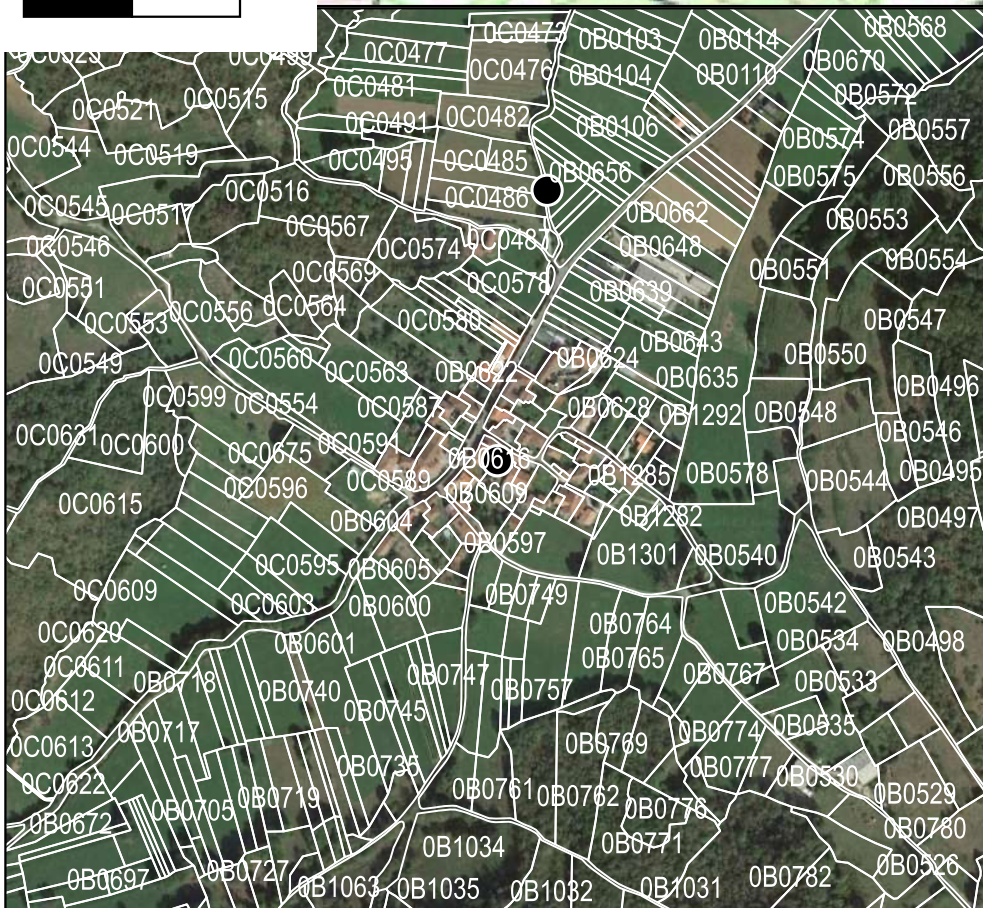
Analyse ICP : 00

Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





# Nom : Cazaux 02

Commune et code commune : CAZAVET ; 9091

N° projet : 09091\_2

N° Patriarche :

X en L93 : 539786.9214154538

Y en L93 : 6212982.210939825

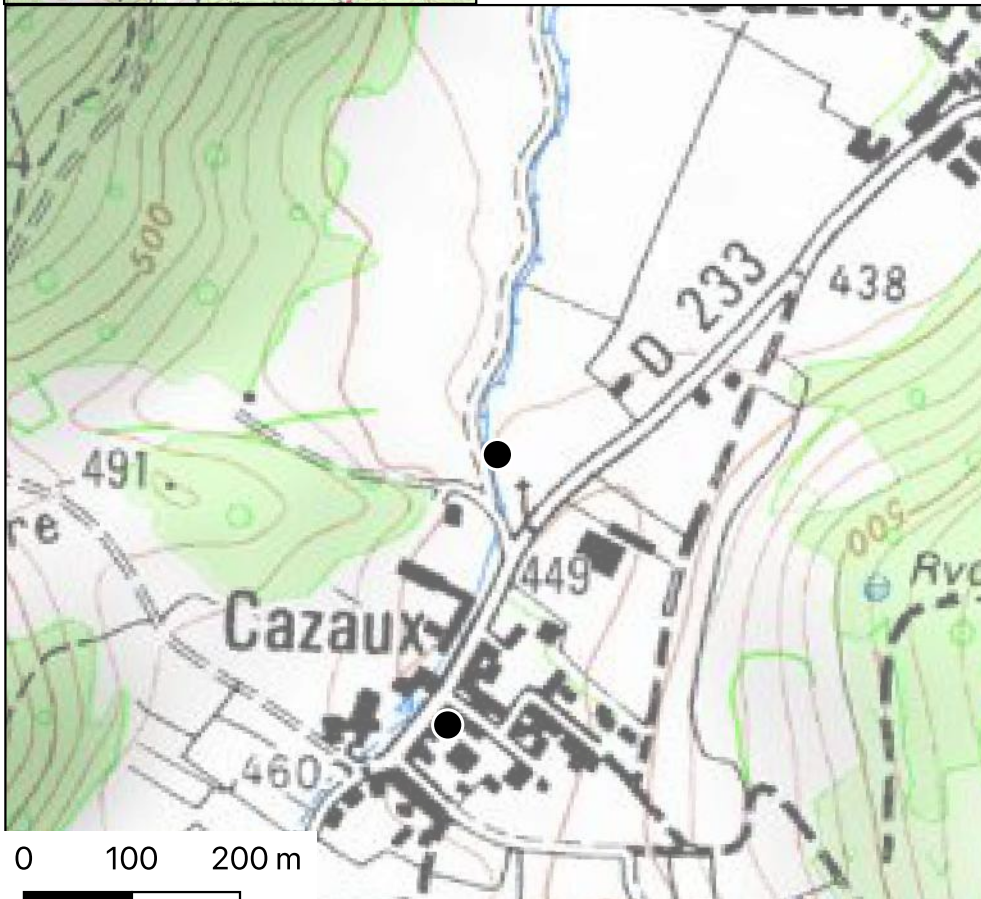
## Cadastre

Section : OB

Numéro : 650 a 653

Date création : 27/11/2023

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : COURTE

Type datation : C142

Epoque : MOYEN-AGE

Période : HAUT\_MOYEN-AGE

Date inf : 541

Date sup : 642

Biblio :

Archives :

Inventeur : Nathalie Dupuy

Informateur : Nathalie Dupuy

Equipe : Dissier Alexandre, Dubois Claude, Dupuy Nathalie, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte :

NOUVELLE\_INVENTEUR\_EXT

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation FRICHES:

Lisibilité : BONNE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : REMANIE

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

Analyse ICP : 00

Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





**Nom : Viala 01**

**Commune et code commune : GESTIES ; 9134**

N° projet : 09134\_1

N° Patriarche :

X en L93 : 582787.749302974

Y en L93 : 6186180.843360538

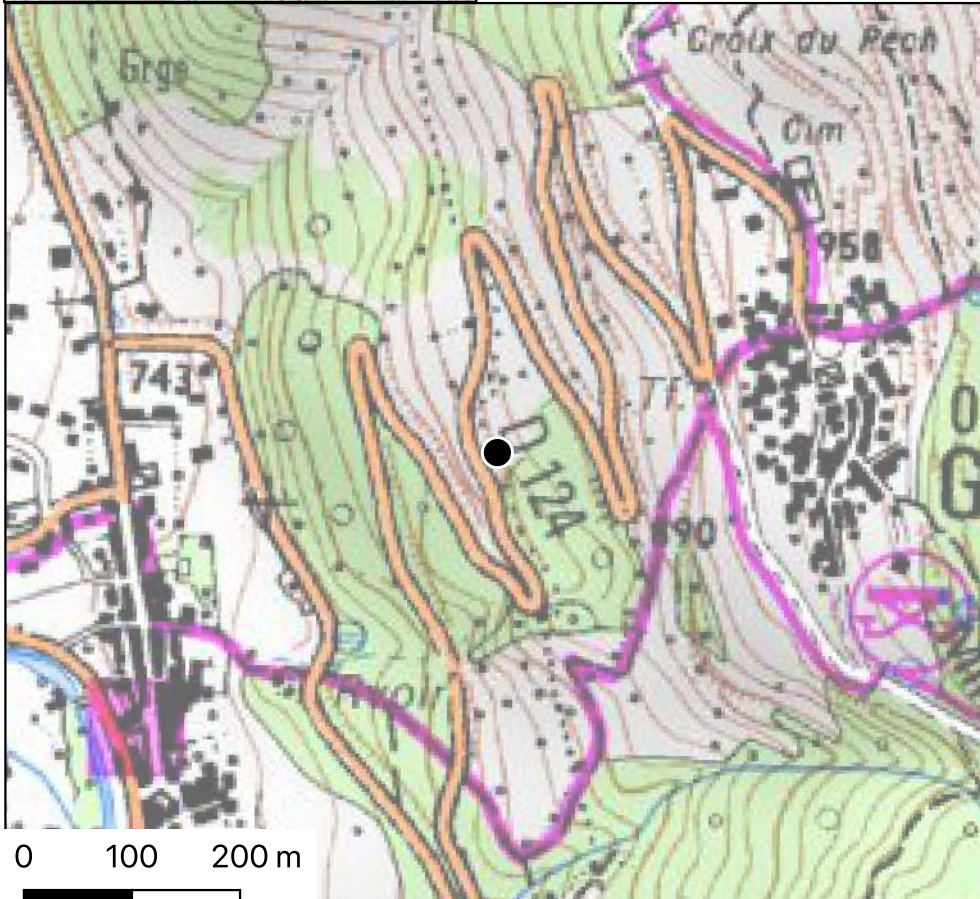
**Cadastre**

Section : OA

Date création : 27/11/2023

Numéro : multiple

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Jean Noel Lamiable

Informateur :

Equipe : Cledou Odette, Dissier Alexandre, Dubois Claude, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation PRAIRIES:

Lisibilité : MOYENNE

Etat de conservation : IND.

Type de conservation : DETRUIT

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

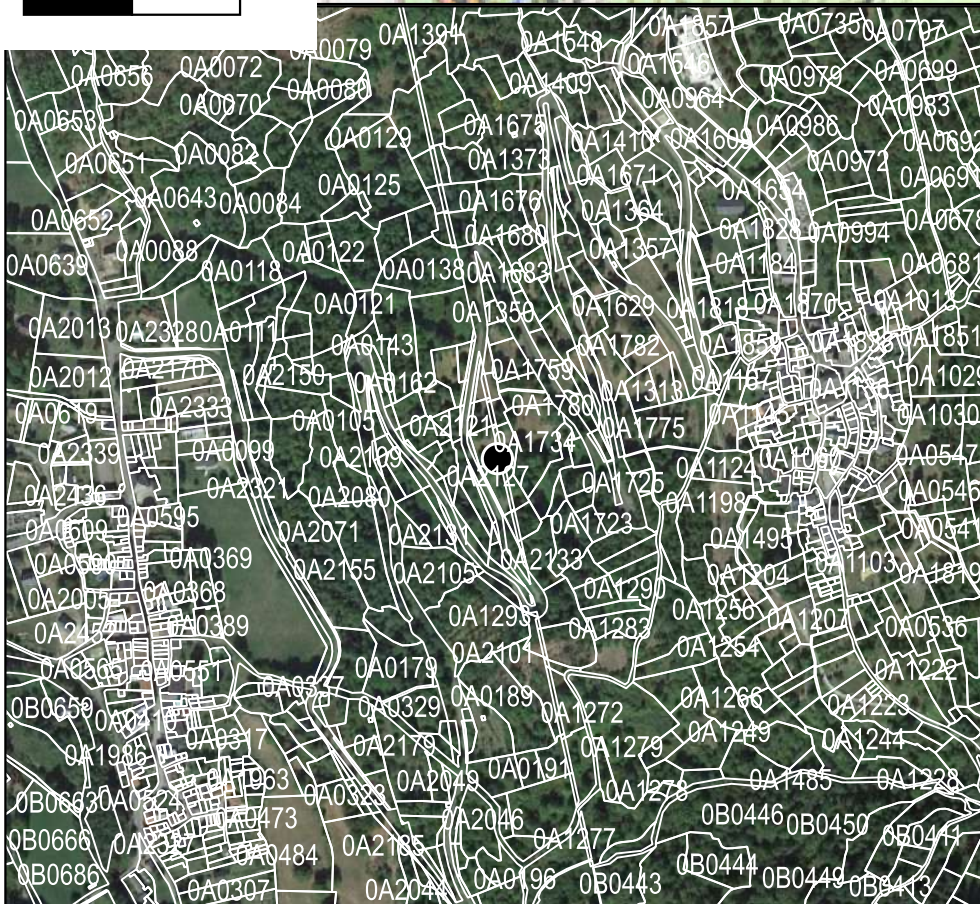
Analyse ICP : 00

Analyse ICP minéral : 0

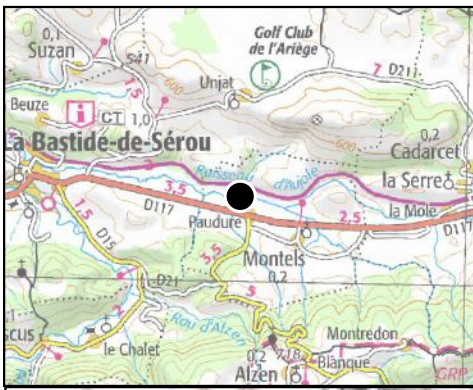
Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :







**Nom : Barraque 01**

**Commune et code commune : MONTELS ; 9203**

N° projet : 09203\_1

N° Patriarche :

X en L93 : 574617.4582603979

Y en L93 : 6213524.104958312

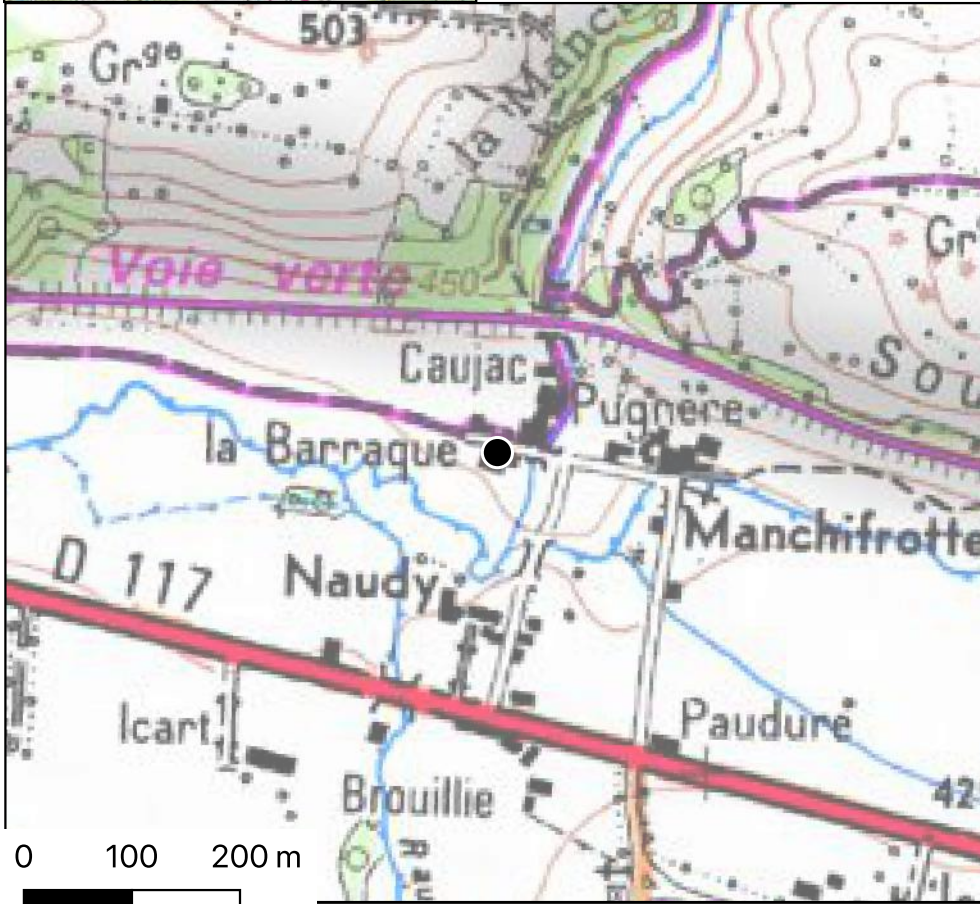
**Cadastre**

Section : OB

Numéro : 471 ; 479 a 484 ; 497 et 498 ; 586

Date création : 27/11/2023

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Dissier Alexandre

Informateur :

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation HABITAT:

Lisibilité : MOYENNE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : ARASE

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

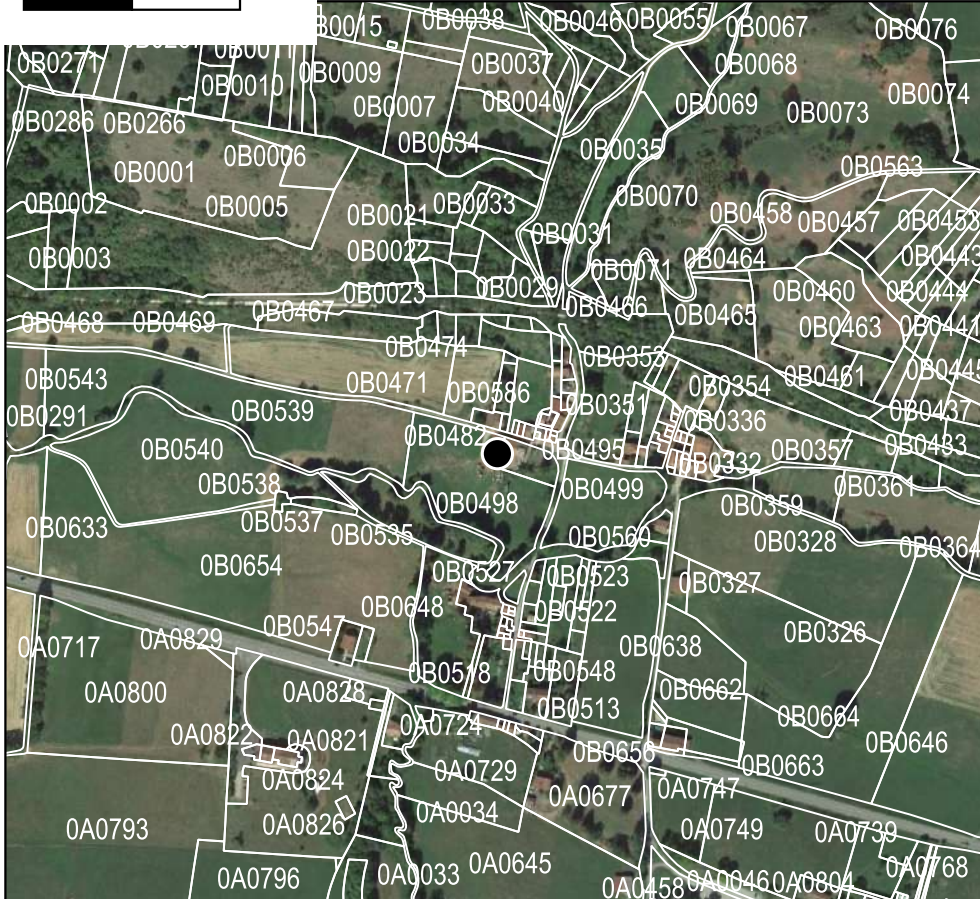
Analyse ICP : 00

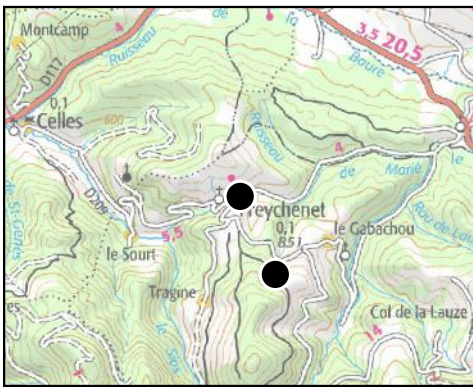
Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





# Nom : Freychenet Village 01

Commune et code commune : FREYCHENET ; 9215

N° projet : 09215\_5

N° Patriarche :

X en L93 : 595512.2236430971

Y en L93 : 6201886.339188072

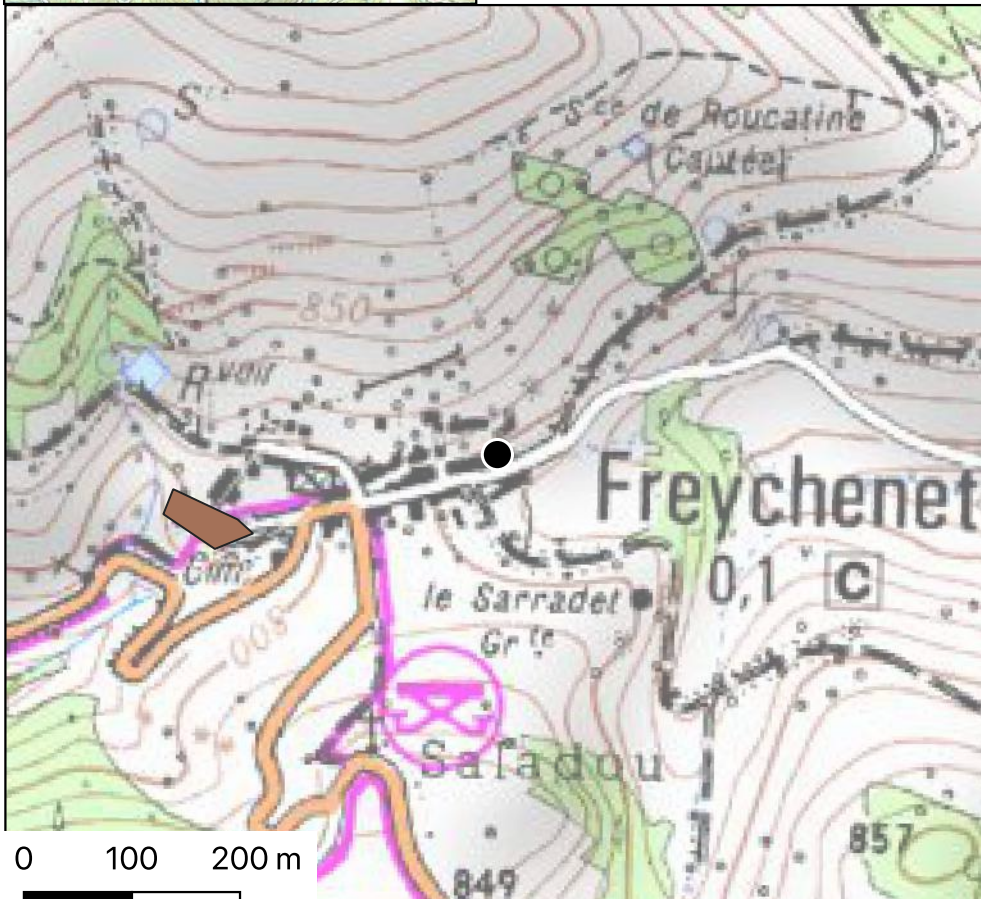
## Cadastre

Section : OA

Date création : 27/11/2023

Numéro : 516 ; 1531 a 1533

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : ETABLIE

Type datation : C142

Epoque : MOYEN-AGE

Période : MOYEN-AGE\_CENTRAL

Date inf : 1032

Date sup : 1203

Biblio :

Archives :

Inventeur : Jean Noel Lamiable

Informateur :

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

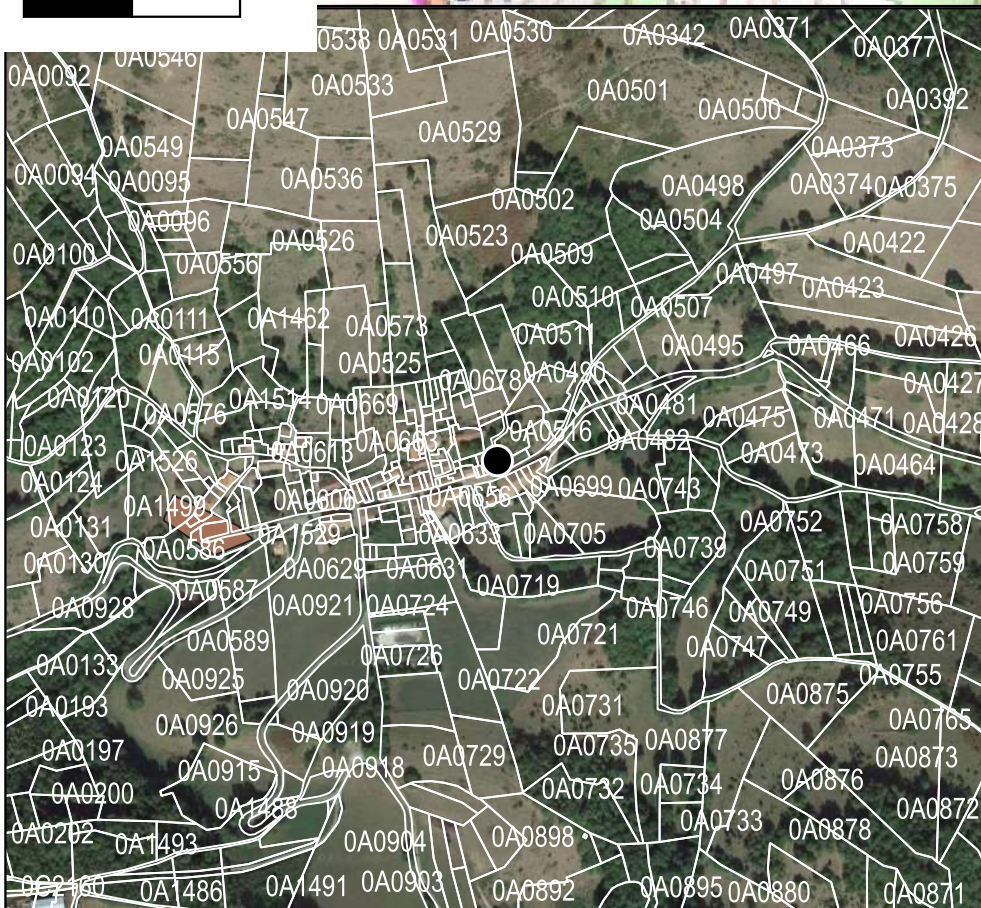
Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0



Commentaire :

Végétation HABITAT:

Lisibilité : MOYENNE

Etat de conservation : MOYEN

Type de conservation : ARASE

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

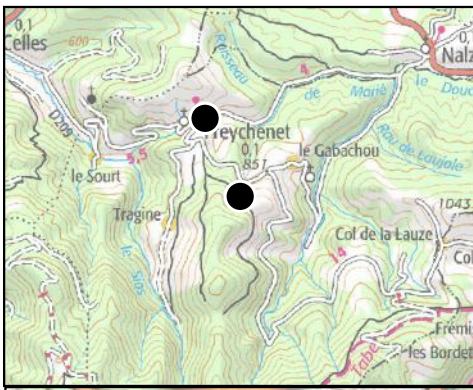
Analyse ICP : 00

Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :



# Nom : Clot de Menie 01

Commune et code commune : FREYCHENET ; 9215

N° projet : 09215\_6

N° Patriarche :

X en L93 : 595977.4130694588

Y en L93 : 6200853.203199006

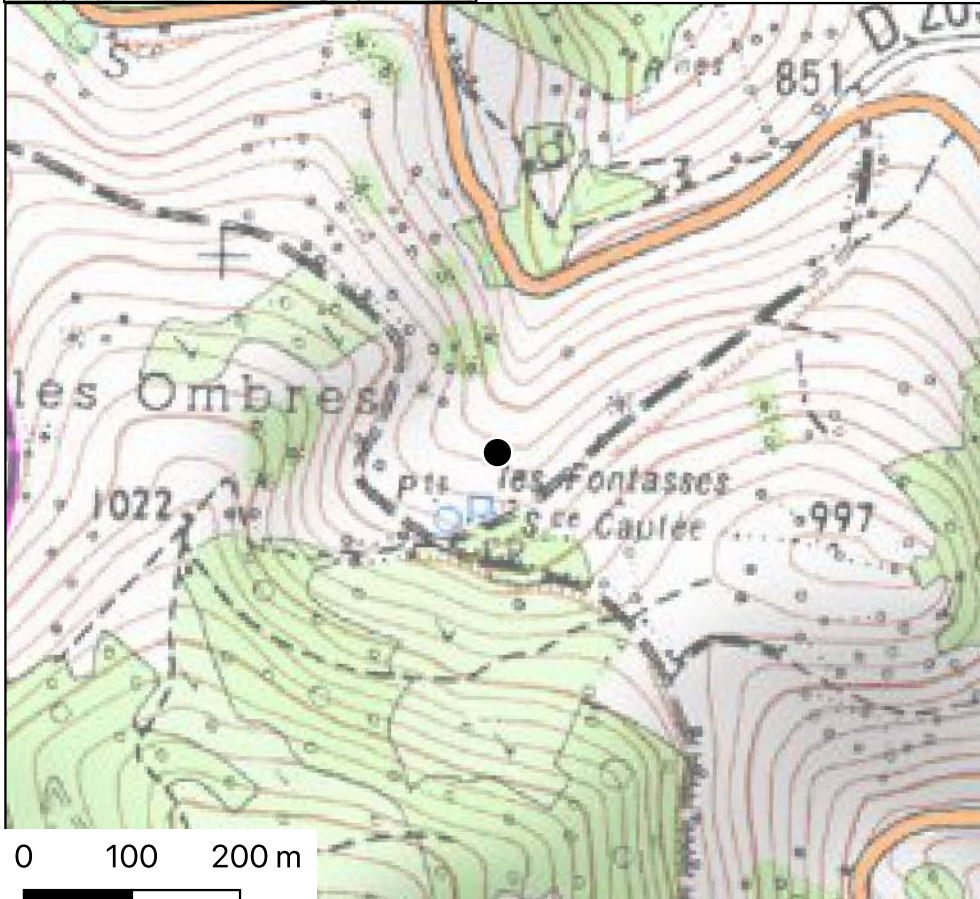
## Cadastre

Section : 0C

Numéro : 113 a 120 ; 132

Date création : 27/11/2023

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Informateur :

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation FORET:

Lisibilité : MAUVAISE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : DETRUIT

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

Analyse ICP : 00

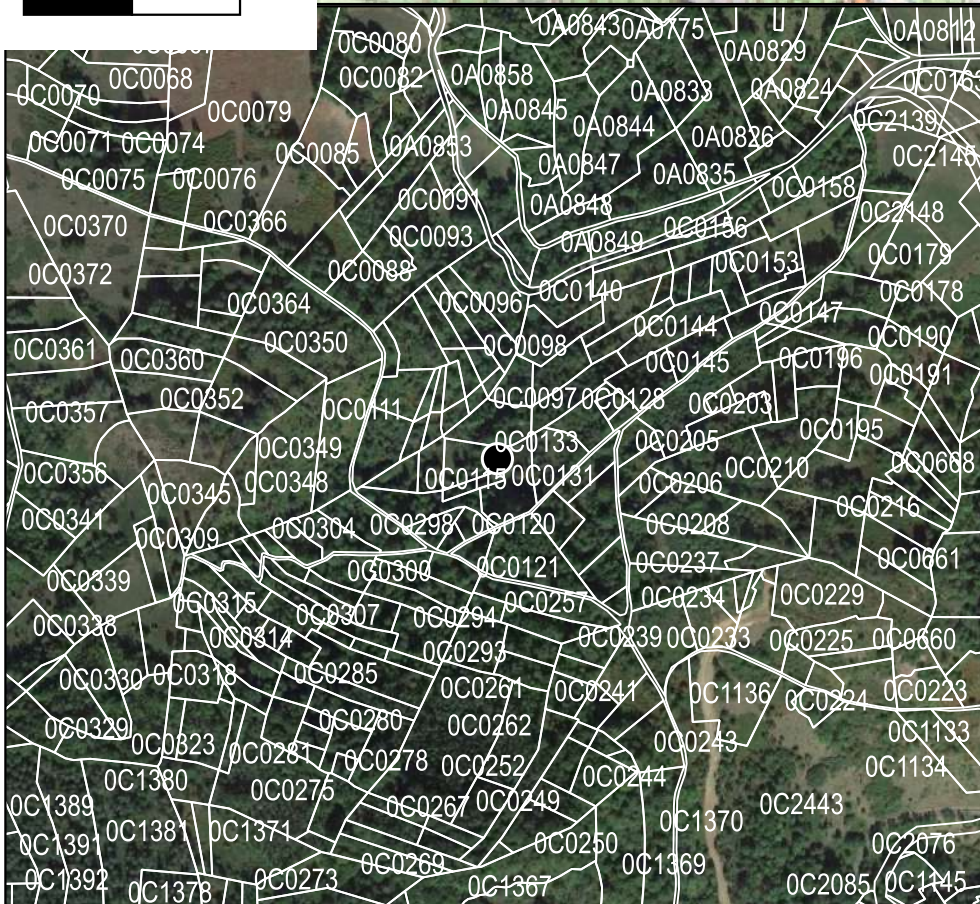
Analyse ICP minéral : 0

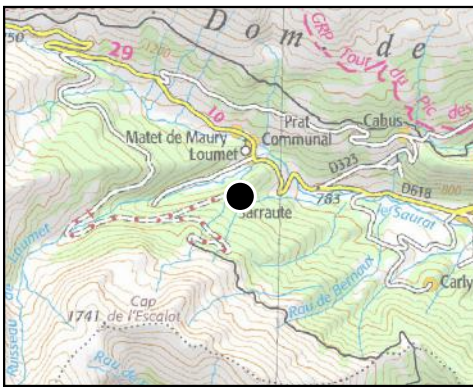
Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :

0 100 200 m





## Nom : Sarraute 02

Commune et code commune : SAURAT ; 9280

N° projet : 09280\_11

N° Patriarche :

X en L93 : 576800.047964352

Y en L93 : 6198958.8822803255

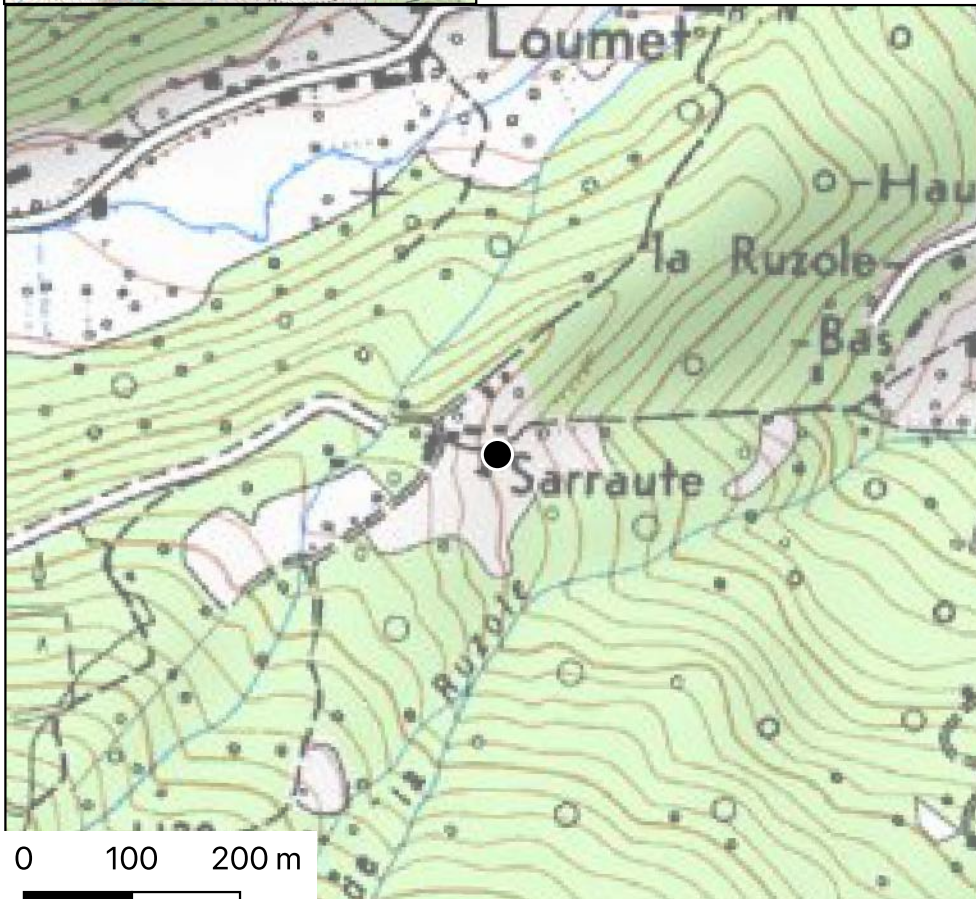
### Cadastre

Section : OF

Date création : 27/11/2023

Numéro : 944 a 946

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : ETABLIE

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Jean Noel Lamiable

Informateur : Giteau biblio

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation PRAIRIES:

Lisibilité : BONNE

Etat de conservation : MOYEN

Type de conservation : EN

ELEVATION\_DEGRADE

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

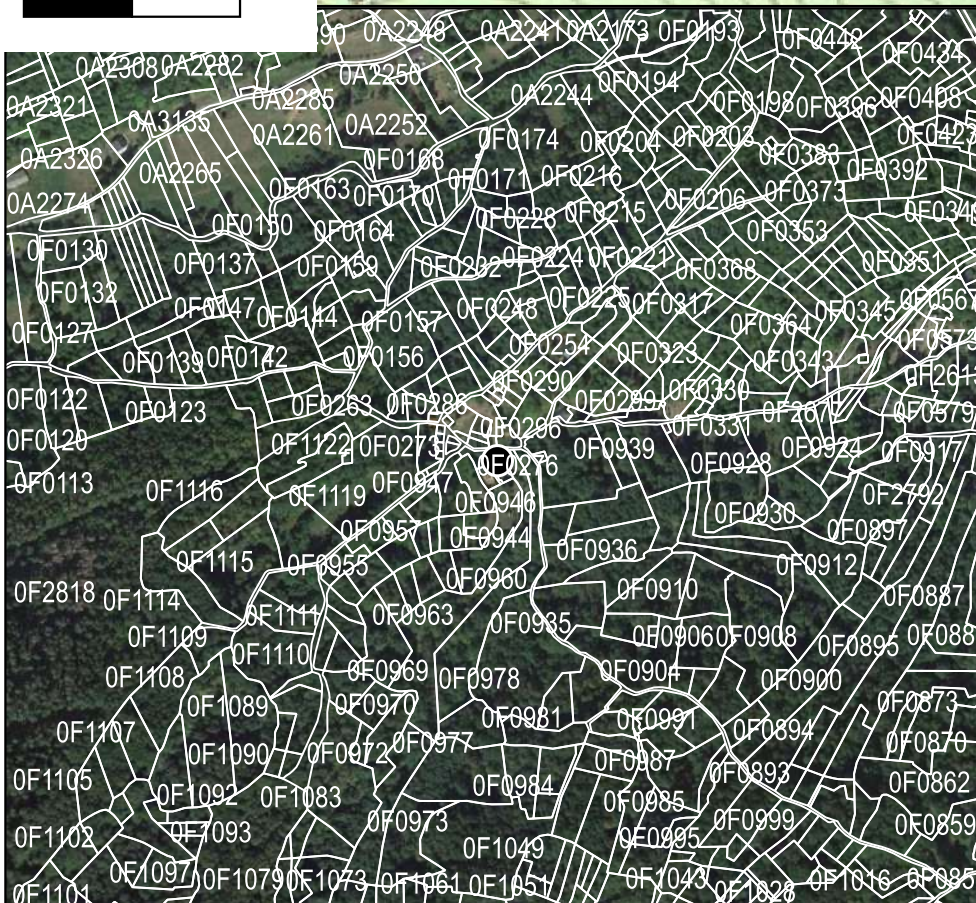
Analyse ICP : 00

Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





# Nom : Portillon d'Albe 01

Commune et code commune : **SENTEIN ; 9290**

N° projet : 09290\_1

N° Patriarche :

X en L93 : 526272.9786322453

Y en L93 : 6192897.530184192

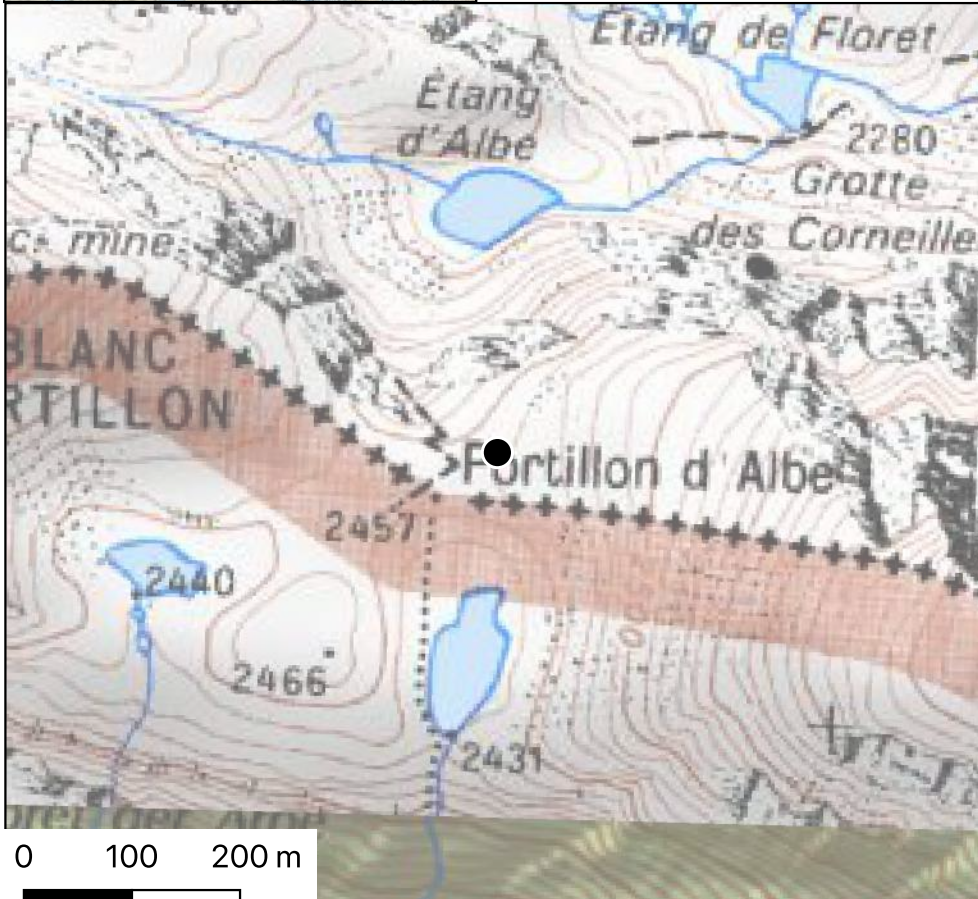
## Cadastre

Section : OC

Date création : 27/11/2023

Numéro : 2475

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**ELABORATION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : EPOQUE CONTEMPORAINE

Période : EPOQUE CONTEMPORAINE

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Gerard Viole

Informateur : Gerard Viole

Equipe :

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation PRAIRIES:

Lisibilité :

Etat de conservation :

Type de conservation : IND.

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

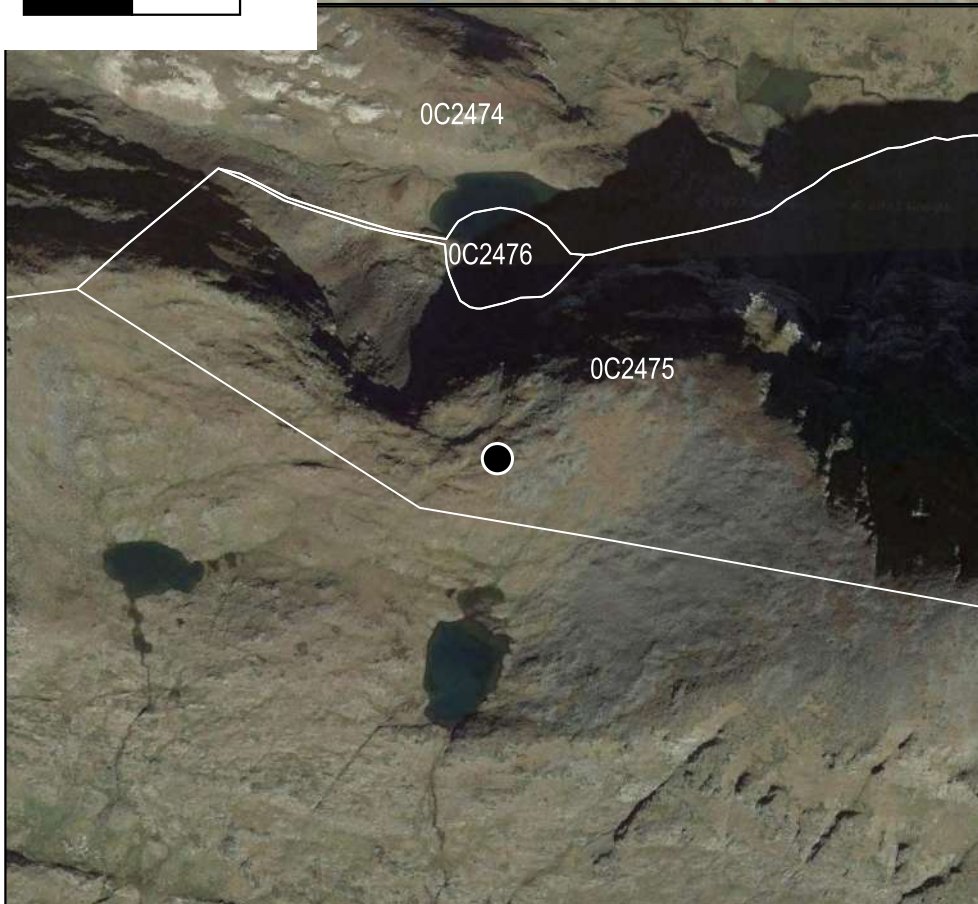
Analyse ICP : 00

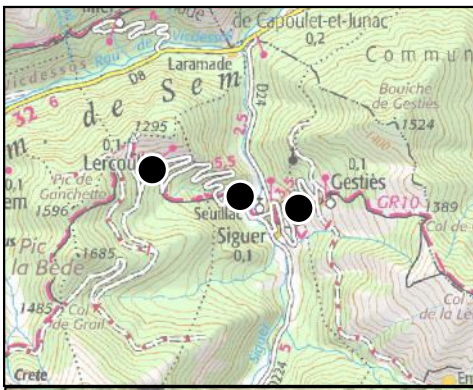
Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





**Nom : Seuillac 01**

**Commune et code commune : SIGUER ; 9295**

N° projet : 09295\_7

N° Patriarche :

X en L93 : 582012.5775912943

Y en L93 : 6186338.90872437

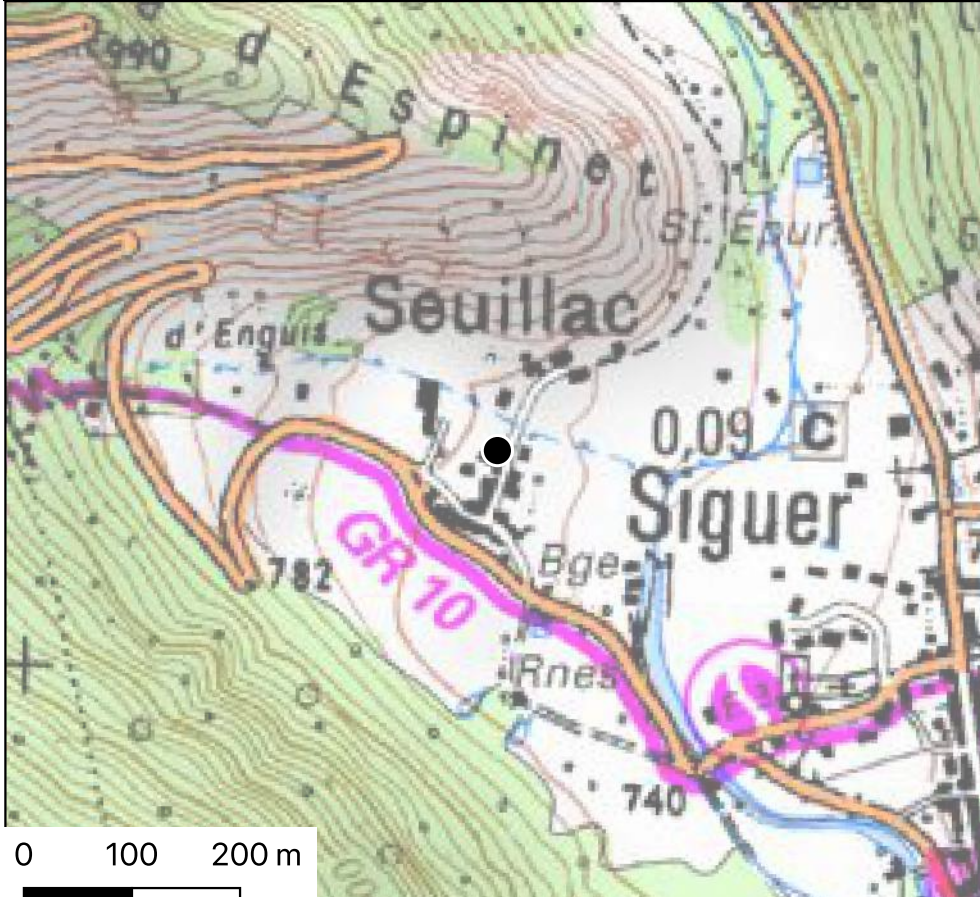
**Cadastre**

Section : OB

Date création : 27/11/2023

Numéro : 456 et 457 ; 464

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Jean Noel Lamiable

Informateur :

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation HABITAT:

Lisibilité : MAUVAISE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : DETRUIT

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

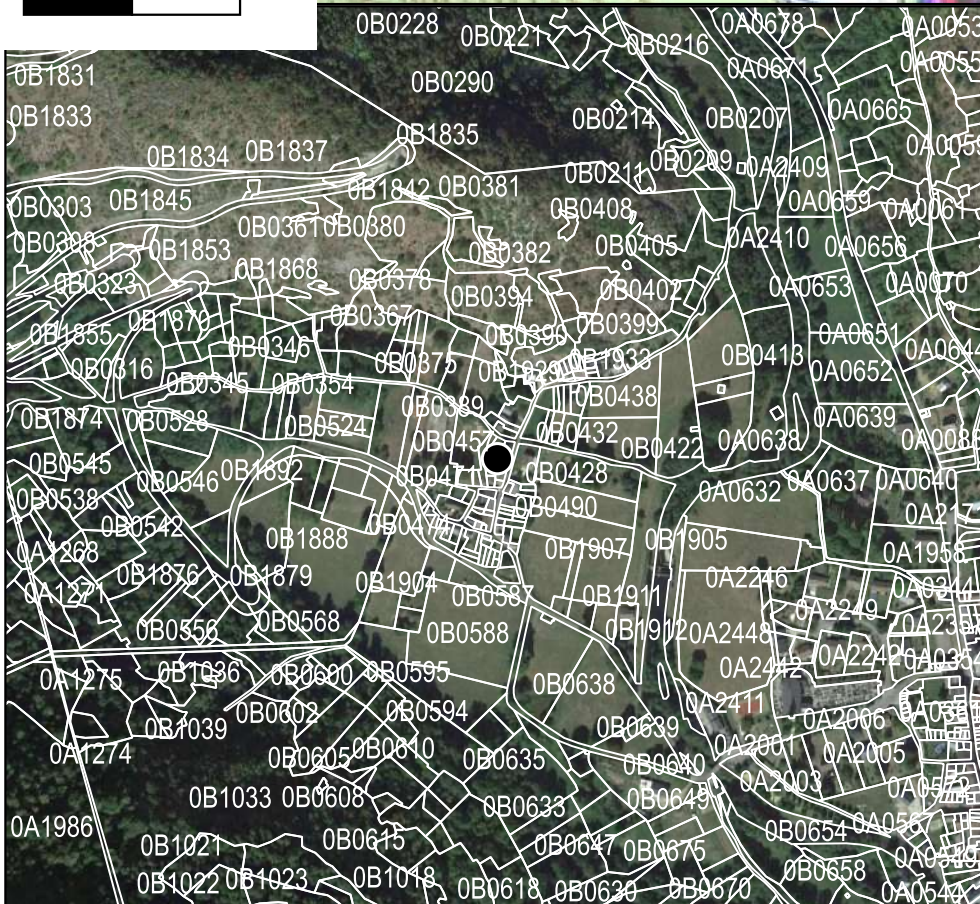
Analyse ICP : 00

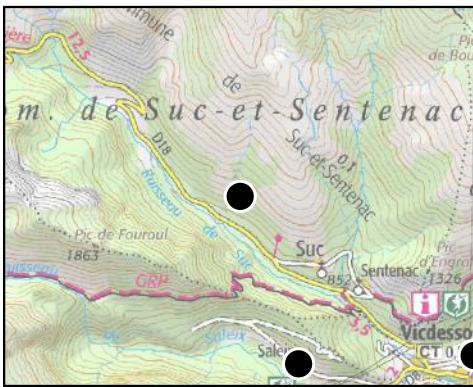
Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





**Nom : Camp du Dragon 01**  
**Commune et code commune : VAL DE SOS ; 9334**

N° projet : 09334\_15

N° Patriarche :

X en L93 : 574070.2291353239

Y en L93 : 6189063.2121733725

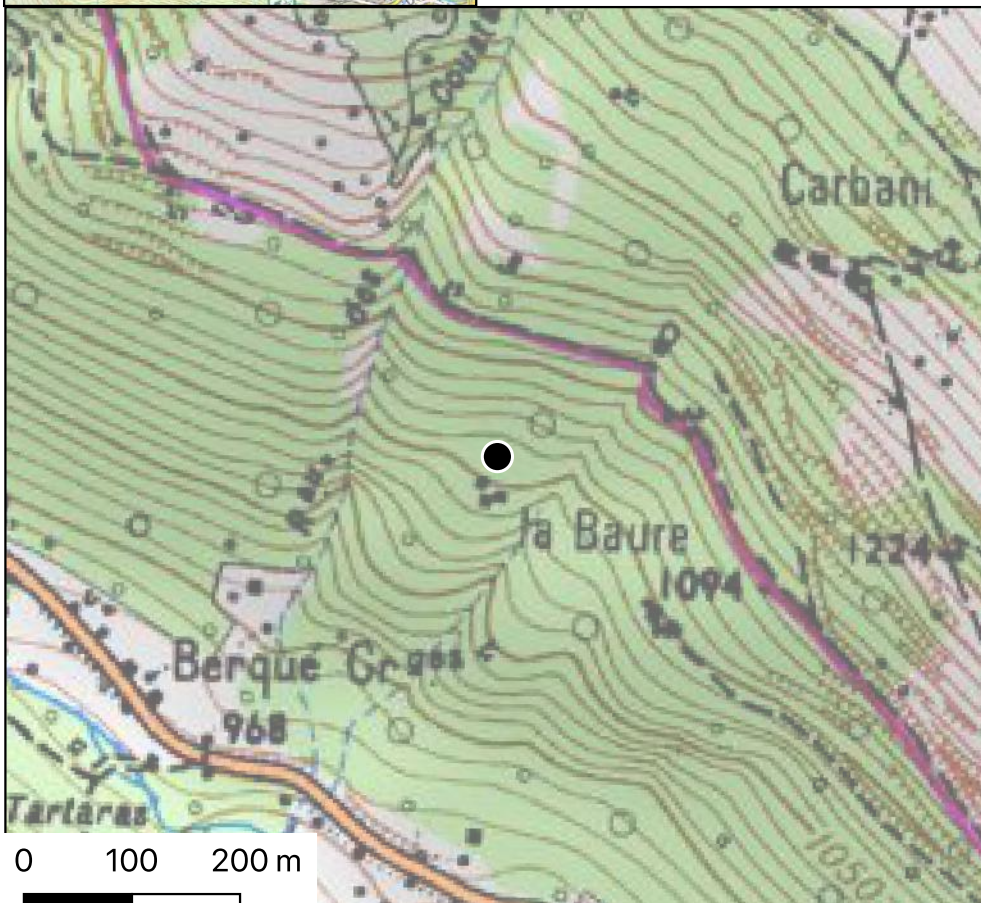
**Cadastre**

Section : OD

Numéro : 691 a 694

Date création : 27/11/2023

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : COURTE

Type datation : C142

Epoque : ANTIQUITE ROMAINE

Période : BAS-EMPIRE

Date inf : 132

Date sup : 336

Biblio :

Archives :

Inventeur : Jean Noel Lamiable

Informateur :

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation FORET:

Lisibilité : BONNE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : REMANIE

Vue en coupe :

Prélèvement :

Analyse pXRF : 0

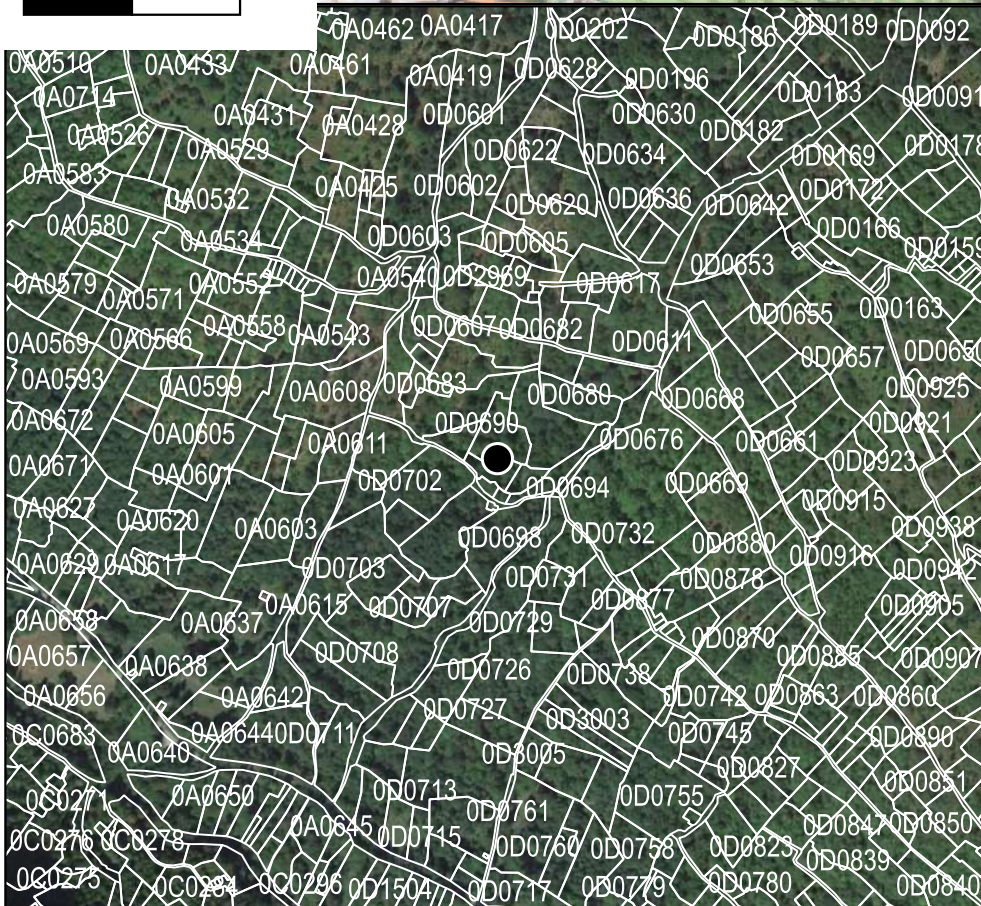
Analyse ICP : 00

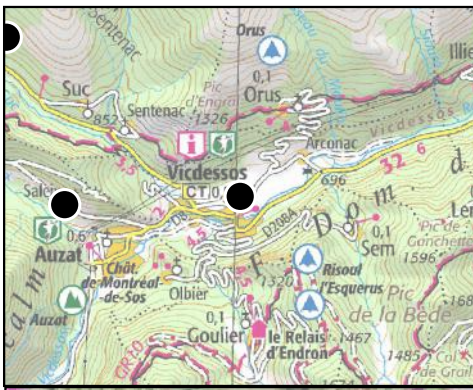
Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





**Nom : Maison Fred**

**Commune et code commune : VAL DE SOS ; 9334**

N° projet : 09334\_16

N° Patriarche :

X en L93 : 577167.409106319

Y en L93 : 6186955.964327163

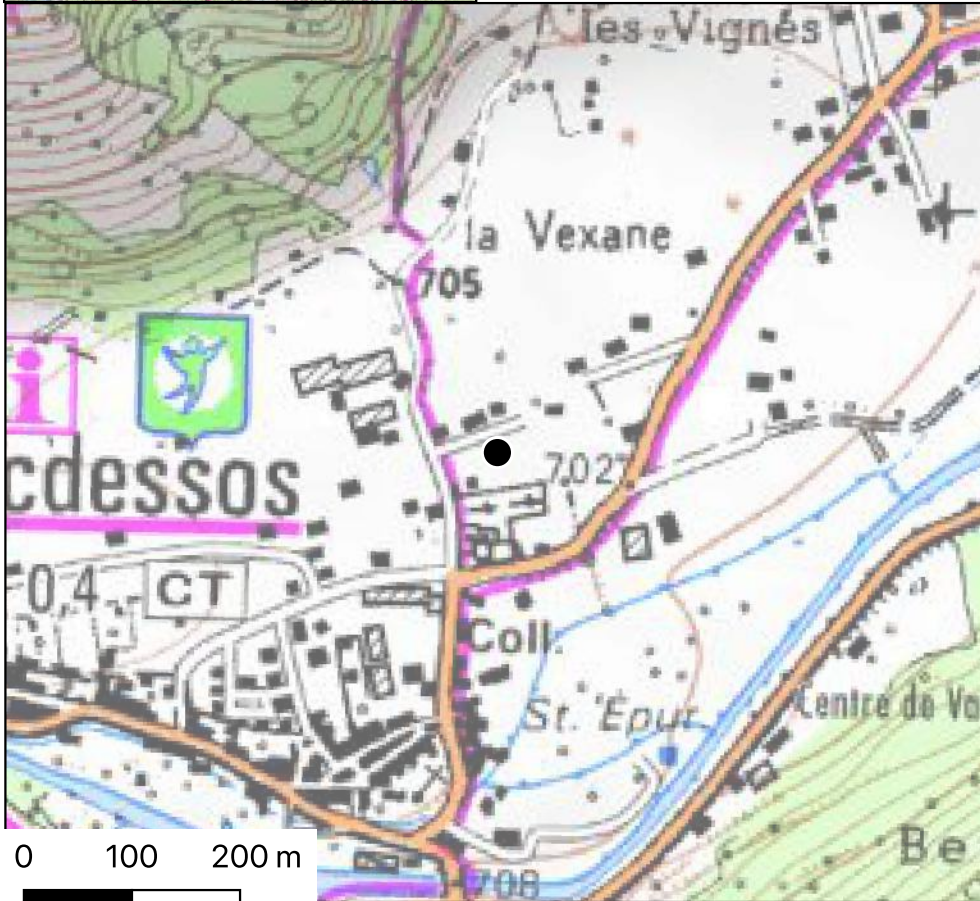
**Cadastre**

Section : OA

Date création : 27/11/2023

Numéro : 2349 a 2351

Date modification : 27/11/2023



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : IND.

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Jean Noel Lamiable

Informateur :

Equipe : Dissier Alexandre, Jean Noel Lamiable

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°) : 0

Commentaire :

Végétation HABITAT:

Lisibilité : MAUVAISE

Etat de conservation : MAUVAIS

Type de conservation : DETRUIT

Vue en coupe :

Prélèvement : LAPA Saclay

Analyse pXRF : 0

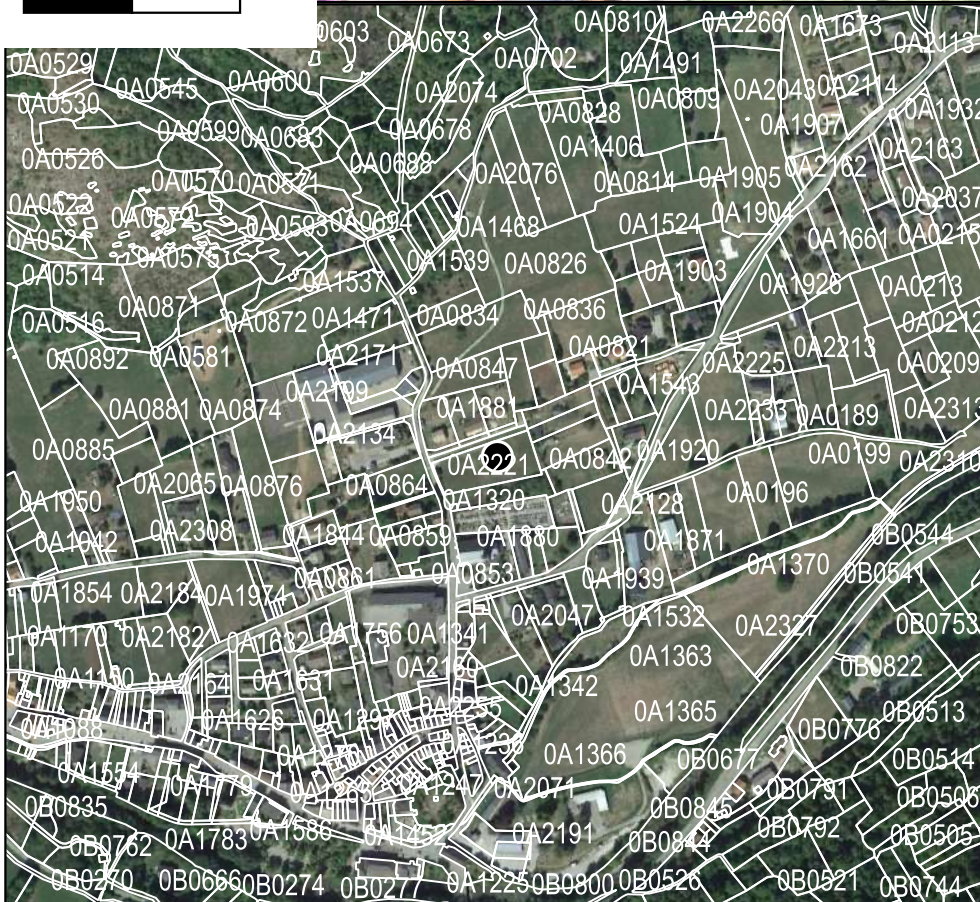
Analyse ICP : 00

Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :





**Nom : Cabre Morte 3**  
**Commune et code commune : PRATS-DE-MOLLO-LA-PRESTE ; 66150**

N° projet : 66150\_21

N° Patriarche :

X en L93 : 650712.1377321585

Y en L93 : 6149399.941710348

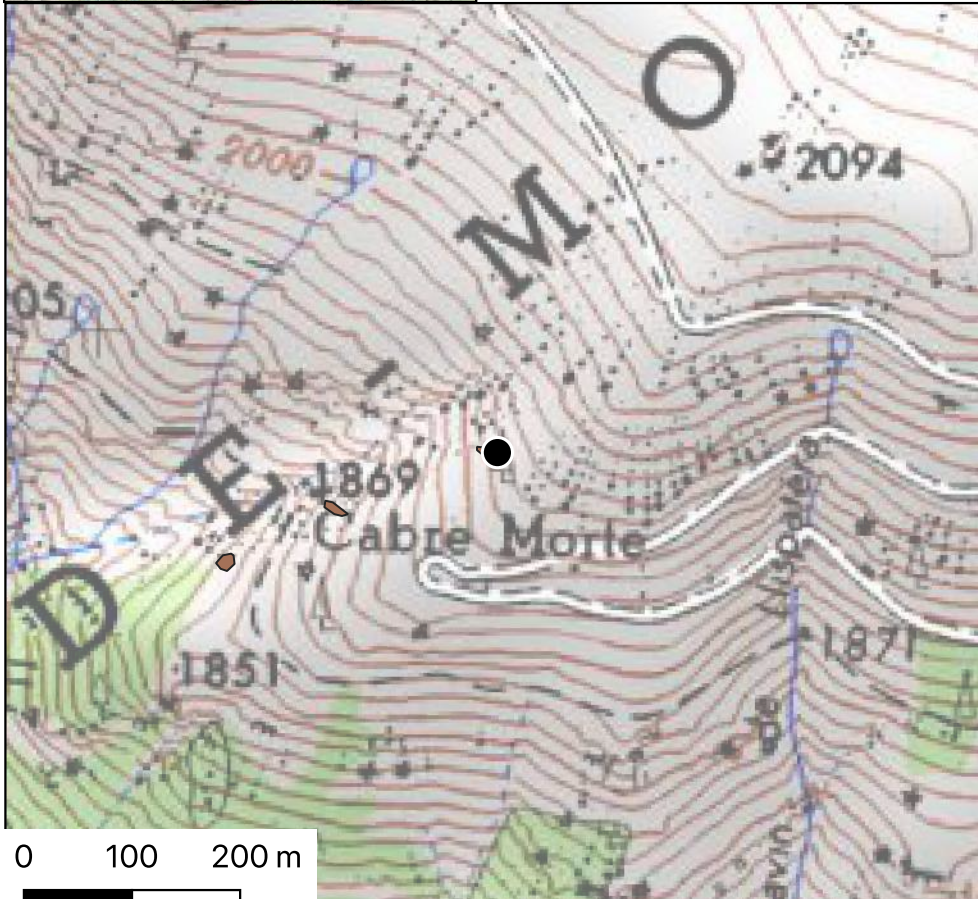
**Cadastre**

Section : OF

Date création : 12/04/2017

Numéro : 367

Date modification : 09/05/2017



Type d'activité :  
**REDUCTION**

Type d'occupation : COURTE

Type datation :

Epoque : IND.

Période : IND.

Date inf : 0

Date sup : 0

Biblio :

Archives :

Inventeur : Pagès Gaspard

Informateur :

Equipe : Sibylle Mania, Mach Jordi,  
Gaspard Pagès

Date enquête : 2023

Type de découverte : NOUVELLE

Surface (m2) : 0

Altitude (m) : 0

Pente MNT25 (°) : 0

Exposition MNT25 (°): 0

Commentaire :

Végétation PIERRIER:

Lisibilité : BONNE

Etat de conservation : IND.

Type de conservation : IND.

Vue en coupe :

Prélèvement : labo

Analyse pXRF : 0

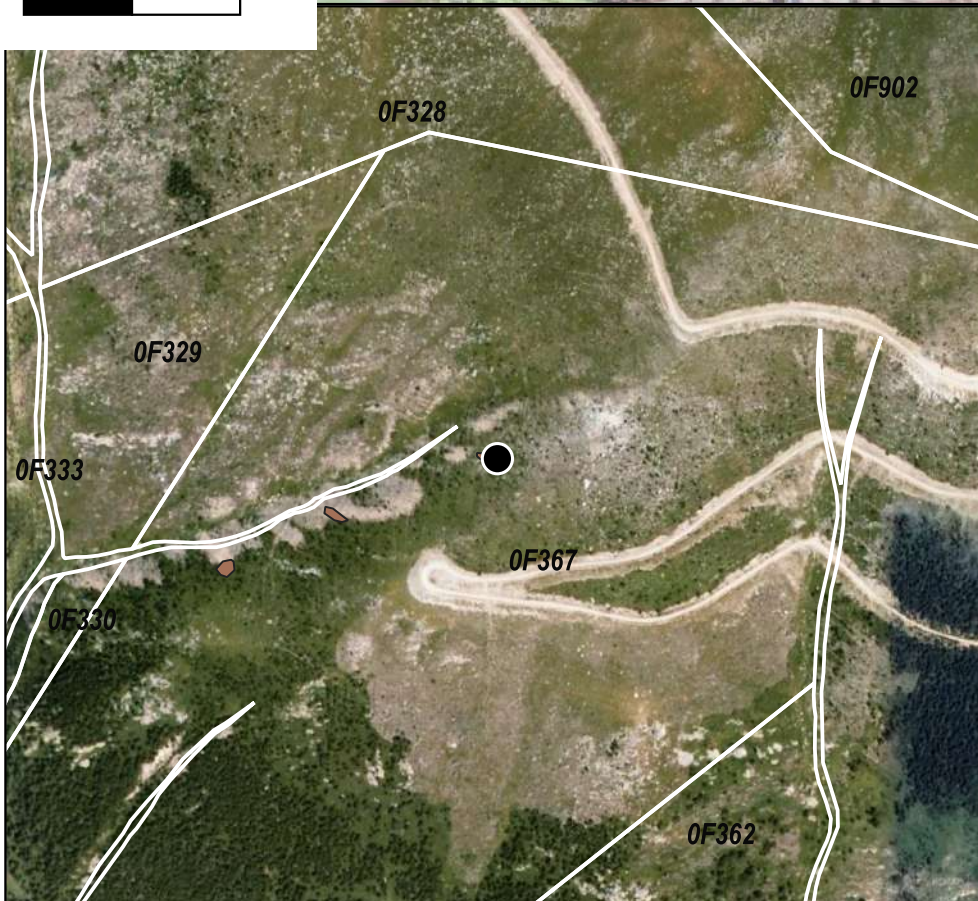
Analyse ICP : 00

Analyse ICP minéral : 0

Fouille :

Année sondage : 0

Sondage futur :



### 3. Notices complémentaires aux découvertes archéologiques

#### *Découverte d'un site métallurgique à Arbas (Haute-Garonne) :*

Les coordonnées du site sont les suivantes (Lambert 93 ; EPSG 2154) : X : 528850 ; Y : 6212460 ; Altitude : 422m. Les principaux vestiges se trouvent dans les parcelles 539 à 541, section 0B, Arbas (INSEE : 31011).

L'étude des techniques sidérurgiques anciennes constitue l'un des fils directeurs du PCR. Dans cette perspective, nous avons consacré une partie de nos efforts à la mise en évidence des vestiges matériels pouvant être associés à des ateliers qualifiés de '*fonde*' dans les sources écrites. Ce terme, employé pour désigner une poignée d'ateliers mentionnés dans des sources datées du XVI<sup>e</sup> s., a attiré l'attention de C. Verna et J. Cantelaube, qui ont d'ailleurs consacré un article à la question de la qualification des techniques sidérurgiques à cette époque (Cantelaube et Verna 2000). Plusieurs appellations apparaissent dans les textes, telles que '*forge à la Genevoise*', '*mouline ferrière à façon de Biscaye*' ou '*fonde*', sans qu'il soit possible de déterminer si ces appellations correspondent à des procédés techniques particuliers, se démarquant de la trajectoire générale des techniques sidérurgiques dans les Pyrénées centrales et orientales. Sur la base du dossier analysé par C. Verna et J. Cantelaube, nous avons en 2021 recherché l'emplacement du site qui bénéficiait du corpus d'archives le plus conséquent, à Villeneuve d'Olmes. Selon toute probabilité, ce site a été totalement détruit par l'aménagement d'un centre de traitement d'eaux usées. Nous avons donc profité de prospections menées en Couserans pour vérifier un autre indice, mentionné par R. Souriac (Souriac 1978, 210). Cet indice s'avérait particulièrement vague, l'auteur ne citant pas ses sources. Une enquête a donc été réalisée sur les plans cadastraux de la commune, qui ont révélé plusieurs toponymes pouvant être associés à la réduction du fer. L'un d'eux semblait mieux correspondre à un potentiel atelier du XVI<sup>e</sup> siècle : le '*Pratch de la mouline*', localisé à environ 600m au SSO du bourg d'Arbas. La prospection pédestre réalisée sur le site a révélé une anomalie topographique marquée par un monticule étendu d'environ 3 mètres de hauteur, orienté globalement NS. Une seconde anomalie, se présentant sous la forme d'un amas jouxtant le premier sur son flanc est, est orientée EO et se termine contre la berge du ruisseau d'Arbas.

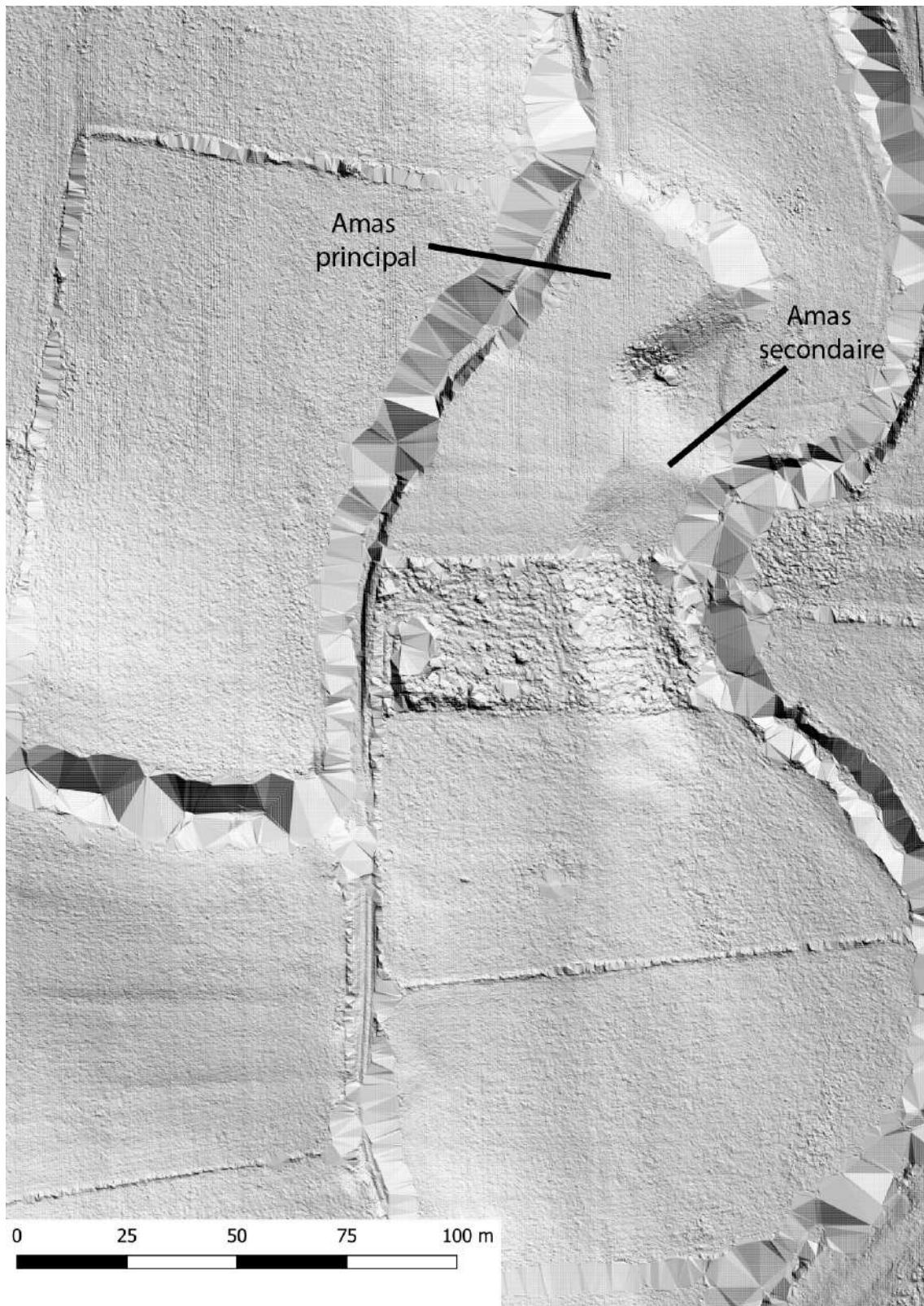


Figure 2 : Modèle numérique de terrain obtenu à partir du traitement du Lidar HD de l'IGN

Cette seconde anomalie, incisée par le ruisseau, révèle une coupe dans laquelle une accumulation de scories fayalitiques est visible (Figure 3). Le ramassage de surface sur l'amas principal a quant à lui permet de collecter des scories totalement vitreuses (Figure 4).



*Figure 3 : Scorie fayalitique collectée sur le site de Pratch de Moulino 01, à Arbas*



*Figure 4 : Scorie vitreuse collectée sur le site de Pratch de Moulino 01, à Arbas*

Il s'agit de la première occurrence de ce type de scorie à l'échelle des prospections que nous avons menées dans les deux départements. De plus, les ramassages de surface effectués montrent pour l'heure une répartition différentielle et exclusive des deux types de scories. Les fayalitiques seraient cantonnées dans l'amas secondaire, tandis que toutes les scories vitreuses observées proviennent de l'amas principal.

Des analyses chimiques par fluorescence X portable ont été réalisées sur les deux scories présentées ci-dessus. Les quantifications obtenues ne sont pas absolues, mais cette première approche permet toutefois de déterminer les principales caractéristiques chimiques des deux scories (Tableau 2).

Analyse	Scorie fayalitique - analyse 1	Scorie fayalitique - analyse 2	Scorie vitreuse - analyse 1	Scorie vitreuse - analyse 2
<b>Mg</b>	1.388	<LOD	1.354	0.97
<b>Mg Erreur</b>	0.769	1.254	0.432	0.418
<b>Al</b>	3.895	5.488	7.197	6.766
<b>Al Erreur</b>	0.218	0.232	0.192	0.184
<b>Si</b>	6.445	10.041	23.361	25.553
<b>Si Erreur</b>	0.117	0.129	0.173	0.183
<b>P</b>	0.248	0.354	<LOD	<LOD
<b>P Erreur</b>	0.02	0.02	0.037	0.038
<b>K</b>	0.527	1.226	3.366	3.193
<b>K Erreur</b>	0.049	0.061	0.068	0.064
<b>Ca</b>	1.57	1.399	5.136	4.784
<b>Ca Erreur</b>	0.112	0.099	0.125	0.116
<b>Ti</b>	0.151	0.153	0.503	0.451
<b>Ti Erreur</b>	0.02	0.017	0.019	0.017
<b>Mn</b>	0.812	0.869	2.103	1.842
<b>Mn Erreur</b>	0.042	0.033	0.039	0.037
<b>Fe</b>	<b>48.297</b>	<b>50.44</b>	<b>6.51</b>	<b>5.785</b>
<b>Fe Erreur</b>	0.789	0.642	0.066	0.062

Tableau 2 : Résultats des analyses par pXRF de deux scories prélevées sur le site de Pratch de Mouline 01

Les résultats révèlent des conditions de réduction très différentes. Tandis que la composition chimique en éléments majeurs de la scorie fayalitique correspond aux gammes de teneurs obtenues sur la plupart des scories étudiées dans le cadre du PCR, gammes de teneurs d'ailleurs classiques dans les conditions de la réduction directe des minerais de fer. Les teneurs de la scorie vitreuse correspondent quant à elles à la composition chimique de laitiers anciens, générés par la réduction des minerais de fer selon le procédé indirect, c'est-à-dire en phase liquide. La différence de teneurs en fer est particulièrement évocatrice : alors qu'elles sont d'environ 50%mass pour la scorie fayalitique, elles sont à peine d'environ 6%mass pour la scorie vitreuse. Concernant ces dernières données, des parallèles peuvent être établis avec des haut fourneaux médiévaux tels que ceux de Dürsteltal en Suisse (Tauber et Senn 2020).

Ces premières données paraissent prometteuses et montrent le grand potentiel de ce site du point de vue de l'histoire des techniques sidérurgiques dans les Pyrénées. D'après les quelques informations recueillies à ce jour, on pourrait se trouver là sur le site d'une mouline qui a pu connaître au cours de son fonctionnement des changements techniques majeurs, ayant conduit à des conditions opératoires beaucoup plus réductrices, rapprochant les caractéristiques chimiques des scories produites de celles produites par des hauts fourneaux. Il serait très

intéressant de poursuivre l'enquête sur ce site, afin de vérifier sa période de fonctionnement, et de tenter de localiser l'emplacement de l'atelier proprement dit. Dans une perspective à plus long terme, la fouille des structures métallurgiques apporterait certainement des informations essentielles à la compréhension des techniques mises en œuvre sur ce site, qui pourraient témoigner d'une initiative tout à fait particulière au vu de la trajectoire technique dominante qui marque les Pyrénées centrales et orientales.

### *Bibliographie*

- Cantelaube, J., et C. Verna. 2000. « Les forges à la génoise dans les Pyrénées ariégeoises au XVI<sup>e</sup> siècle : quel transfert d'innovation ? » In , édité par C. Cucini Tizzoni et M. Tizzoni, 152-63. Breno.
- Souriac, René. 1978. *Le comté de Comminges au milieu du XVI<sup>e</sup> siècle*. Toulouse: CNRS Editions.
- Tauber, Jürg, et Marianne Senn. 2020. *Eisenverhüttung Im Dursteltal: Ein Hochofen Des 13. Jahrhunderts in Langenbruck*. Schwabe Verlagsgruppe.  
<https://www.abebooks.fr/9783796542961/Eisenverhuttung-Dursteltal-Hochofen-Jahrhunderts-Langenbruck-3796542964/plp>.

## 2. Les 108 charbonnières découvertes en 2022 et 2023

fid	X L93	Y L93	inventeur
642	565325.8963683597	6188403.905100098	Pages G en 2022
644	565385.6369975031	6188348.133053361	Pages G en 2022
645	565384.2353267331	6188337.243134254	Pages G en 2022
646	565417.0898318805	6188228.672125552	Pages G en 2022
647	565454.0973085109	6188172.8224545345	Pages G en 2022
648	565446.1899900695	6188165.765606348	Pages G en 2022
649	565449.9053489331	6188130.364723165	Pages G en 2022
650	565482.6054576088	6188079.495080774	Pages G en 2022
651	565543.4693718341	6187956.83214475	Pages G en 2022
652	565541.017839967	6187893.066956409	Pages G en 2022
653	565405.8369659481	6188038.681645611	Pages G en 2022
654	565429.8671666798	6188122.7902996	Pages G en 2022
655	564622.7885273779	6188195.271694883	Pages G en 2022
656	564620.472050397	6188194.449189562	Pages G en 2022
657	563775.6327846659	6187448.454572693	Pages G en 2022
658	563672.7440312629	6187475.964814889	Pages G en 2022
659	563996.9664029919	6187515.158977658	Pages G en 2022
660	564082.0372984094	6187604.487695816	Pages G en 2022
661	564101.3124911678	6187579.606783663	Pages G en 2022
662	564136.3154498589	6187643.983994309	Pages G en 2022
663	564221.7136788319	6187903.069901722	Pages G en 2022
664	564262.9749803043	6187880.095160549	Pages G en 2022
665	571961.5918366751	6191577.980894962	Pages G en 2022
666	571753.1078646944	6191523.743532844	Pages G en 2022
667	592677.0238572517	6200553.013944867	Pages G en 2022
668	592685.6600673274	6200545.363185205	Pages G en 2022
669	602991.243835114	6187681.562828508	Pages G en 2022
670	603109.0675629198	6187843.692724439	Pages G en 2022
671	600692.5632323163	6198145.875122779	Pages G en 2022
672	600506.8359784909	6197935.41235823	Pages G en 2022
673	600523.5606579264	6197915.47587594	Pages G en 2022
674	600563.5320687963	6197886.260679814	Pages G en 2022
675	600589.1964533555	6197856.765477809	Pages G en 2022
676	600635.2679627143	6197868.34373062	Pages G en 2022
677	600677.9680893088	6197872.039902626	Pages G en 2022
678	600652.862096252	6197895.740617642	Pages G en 2022
679	600696.1595403459	6197867.596154226	Pages G en 2022
680	600704.2990061091	6197827.548348039	Pages G en 2022
681	600654.0157910573	6197729.0054896055	Pages G en 2022
682	600330.9223593373	6197359.486545079	Pages G en 2022
683	600406.3057066756	6196983.782889218	Pages G en 2022
684	600256.2826013031	6196905.011977593	Pages G en 2022
685	600070.0695364355	6196787.045826567	Pages G en 2022
686	661696.23806234	6152642.538819267	Jordi M. en 2022
687	661702.7282278644	6152653.289356472	Jordi M. en 2022
688	661707.4948521592	6152652.701800233	Jordi M. en 2022
689	661705.8303774293	6152649.046965999	Jordi M. en 2022
690	661706.8010784272	6152646.253142769	Jordi M. en 2022
691	661606.551637662	6152684.562945808	Jordi M. en 2022
692	661578.7964148638	6152698.965796887	Jordi M. en 2022
693	661540.3346611471	6152712.210532697	Jordi M. en 2022
694	661520.2040941396	6152692.188117557	Jordi M. en 2022
695	661347.2533505355	6152747.950220599	Jordi M. en 2022
696	661224.374929968	6152982.304272999	Jordi M. en 2022

697	661146.7549255154	6152988.446362008	Jordi M. en 2022
698	661158.8923056874	6152952.995748997	Jordi M. en 2022
699	660891.9258061022	6152875.158239589	Jordi M. en 2022
700	660769.4068876527	6152906.266980073	Jordi M. en 2022
701	660751.2912071021	6152920.727100741	Jordi M. en 2022
702	660770.9843910359	6152949.20729706	Jordi M. en 2022
703	660781.8497979994	6153044.254225316	Jordi M. en 2022
704	660774.589242353	6153083.350055763	Jordi M. en 2022
705	660733.3702889711	6153184.613746951	Jordi M. en 2022
706	660706.9471099195	6153241.728839687	Jordi M. en 2022
707	660590.1849552594	6153392.283819973	Jordi M. en 2022
708	660566.3736072197	6153390.320796864	Jordi M. en 2022Jordi M. en 2022
709	660587.8745451662	6153365.265457125	Jordi M. en 2022
710	660688.8671081201	6153247.069294553	Jordi M. en 2022
711	660700.3639233632	6153214.624327074	Jordi M. en 2022
712	660724.7903681586	6153127.476942006	Jordi M. en 2022
713	661099.282602783	6152761.998665141	Jordi M. en 2022
714	650631.5337913921	6147862.504068694	Jordi M. en 2022
715	650755.7419193984	6147894.714410408	Jordi M. en 2022
716	634122.5536124395	6153267.368334501	Pagès G et Jordi M.
717	634122.9734165128	6153267.923584697	Pagès G et Jordi M.
718	636225.6012091677	6152328.349146929	Pagès G et Jordi M.
719	635616.3990849268	6151503.397242156	Pagès G et Jordi M.
720	635552.7030780099	6151484.678317187	Pagès G et Jordi M.
721	635480.8436831326	6151332.858564735	Pagès G et Jordi M.
722	635421.3710212185	6151275.147607732	Pagès G et Jordi M.
723	634074.6794250308	6149981.747678764	Pagès G et Jordi M.
724	634041.769425875	6149912.877914642	Pagès G et Jordi M.
725	634000.1419207181	6149635.609674949	Pagès G et Jordi M.
726	633988.5643110201	6149598.677445684	Pagès G et Jordi M.
727	633956.3426904473	6149403.973481579	Pagès G et Jordi M.
728	636126.1953507016	6151784.634664337	Pagès G et Jordi M.
729	636317.7384872499	6151685.737458829	Pagès G et Jordi M.
730	636395.9661417382	6151682.752587361	Pagès G et Jordi M.
731	636447.0458923586	6151708.839277003	Pagès G et Jordi M.
732	636879.4210890979	6151784.619773578	Pagès G et Jordi M.
733	636929.2869679139	6151872.3611185625	Pagès G et Jordi M.
734	637313.3789292998	6152050.767261301	Pagès G et Jordi M.
735	637335.0027528566	6152072.249075073	Pagès G et Jordi M.
736	637681.5332671223	6152321.135112353	Pagès G et Jordi M.
737	637677.9932212371	6152329.953263958	Pagès G et Jordi M.
738	637570.2542325071	6152355.46497862	Pagès G et Jordi M.
739	636956.1050531425	6152701.484504469	Pagès G et Jordi M.
740	637252.4026507444	6152415.155280606	Pagès G et Jordi M.
741	637241.4297900588	6152482.121976909	Pagès G et Jordi M.
742	637252.6286473235	6152507.266213373	Pagès G et Jordi M.
743	637164.3149540507	6152471.406112354	Pagès G et Jordi M.
744	637066.7792431307	6152443.646671899	Pagès G et Jordi M.
745	636829.475818053	6152366.954640716	Pagès G et Jordi M.
746	633124.1869836836	6153118.250154235	Pagès G et Jordi M.
747	656652.8792304453	6140477.904158462	Pagès G et Jordi M.
748	634129.3158210305	6153258.209697528	Pagès G et Jordi M.
749	634543.7293433829	6153094.315047418	Pagès G et Jordi M.
750	634747.6268971801	6152972.263950176	Pagès G et Jordi M.

Tableau 3 : géoréférencement en Lambert 93 des charbonnières découvertes en 2022 et 2023.

## Section III : Synthèse géographique et chronologique des découvertes

En décembre 2023, à la fin du programme collectif de recherche trisannuel (2021 « Le FER en Ariège et dans les Pyrénées-Orientales » (FERAPO ; responsabilité scientifique : Gaspard Pagès et Alexandre Disser) 714 sites métallurgiques liés à l'exploitation du minerai de fer ont été inventoriés dans les départements de l'Ariège et dans les Pyrénées-Orientales (Figure 5). Ce programme de recherche a été réalisé dans l'objectif de renouveler les connaissances archéologiques liées aux activités anciennes d'extraction minière et de production primaire de fer (réduction des minerais) à l'échelle des départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales dans le cadre conjoint du programme FEDER FERMAPYR (2019-2022) « L'industrie du fer dans le massif des Pyrénées (du Canigou au Couserans/Antiquité-milieu XVIIe s.) » porté par le CNRS (direction Gaspard Pagès) en partenariat avec l'Université de Paris 8 (direction Catherine Verna) dans le cadre du Programme Opérationnel Interrégional Pyrénées — FEDER 2014 2020 financé par l'Union Européenne et de l'axe prioritaire 2.1 Construire, partager et diffuser un inventaire des patrimoines pyrénéens. Le PCR FERAPO est aussi dans la continuité des programmes « Le fer antique et médiéval du massif du Canigou et des Pyrénées-Orientales (66) » (dirigé par Gaspard Pagès entre 2014 et 2020) et « Mines et métallurgie du fer pour les périodes historiques dans le département de l'Ariège » (dirigé par Alexandre Disser entre 2017 et 2020). Aujourd'hui, nous en demandons le renouvellement triennal. À cela s'ajoutent aussi des sites républicains liés à l'exploitation du plomb argentifère (9 des 10 sites miniers liés à l'exploitation de la galène) et 2 sites archéologiques liés à l'exploitation du cuivre (Figure 5).

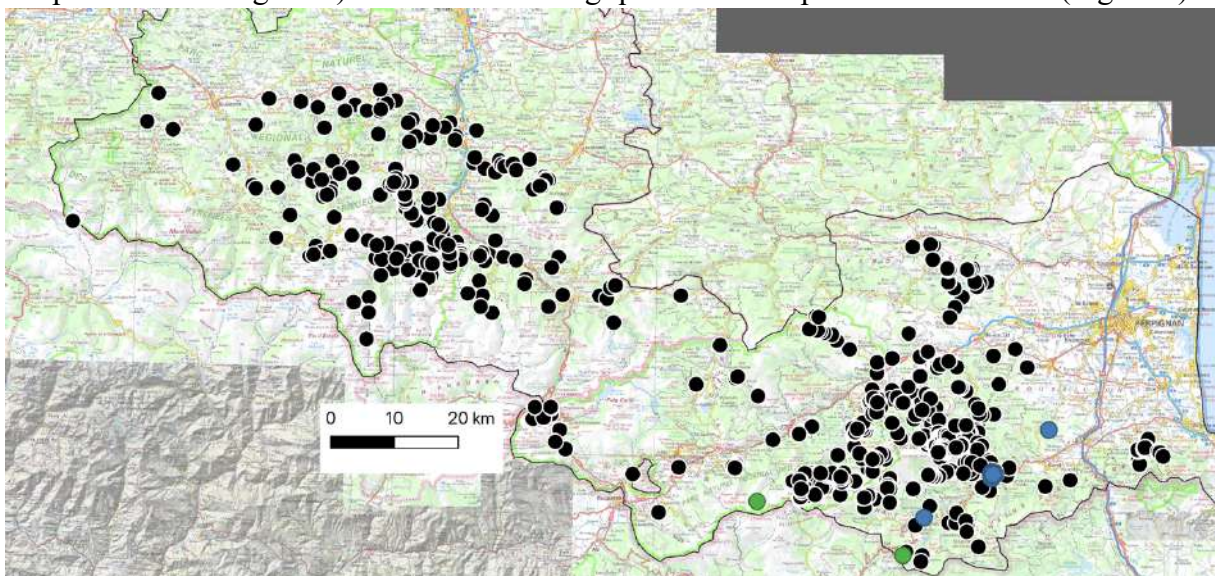


Figure 5 : Les 714 sites sidérurgiques (noir), les 10 sites miniers de galène (bleu) et les 2 sites miniers cuivreux (vert) inventoriés.

### 1. Les mines de fer

Dans ce lot de 714 sites, 149 se réfère à des activités d'extraction et de traitement du minerai. Les sites miniers remontant à l'Antiquité sont cependant peu nombreux (7 en noir, Figure 6), comme ceux dont l'exploitation débute au Moyen-Âge (14 en rouge, Figure 6). La grande majorité est des travaux modernes ou contemporains (54 en bleu, Figure 6). Les sites dont la datation est indéterminée (73 cercles noirs, Figure 6) sont bien souvent des galeries d'exploration ou de petites exploitations dont la chronologie n'est pas antérieure à la période moderne. Les mines se situent essentiellement dans la ceinture métallifère du massif du Canigou (66), autour du mon Rancié (09) et du massif du Pic des Trois Seigneurs (09). Ils sont

présents également, mais de manière moins importante, dans les Albères (66), le Fenouillèdes (66), les monts d'Olmes (09) et l'Arize (09). Tout ce volet de la recherche sur les sites miniers ferreux sera plus détaillé dans le prochain triennal FERAPO (2024-2026).

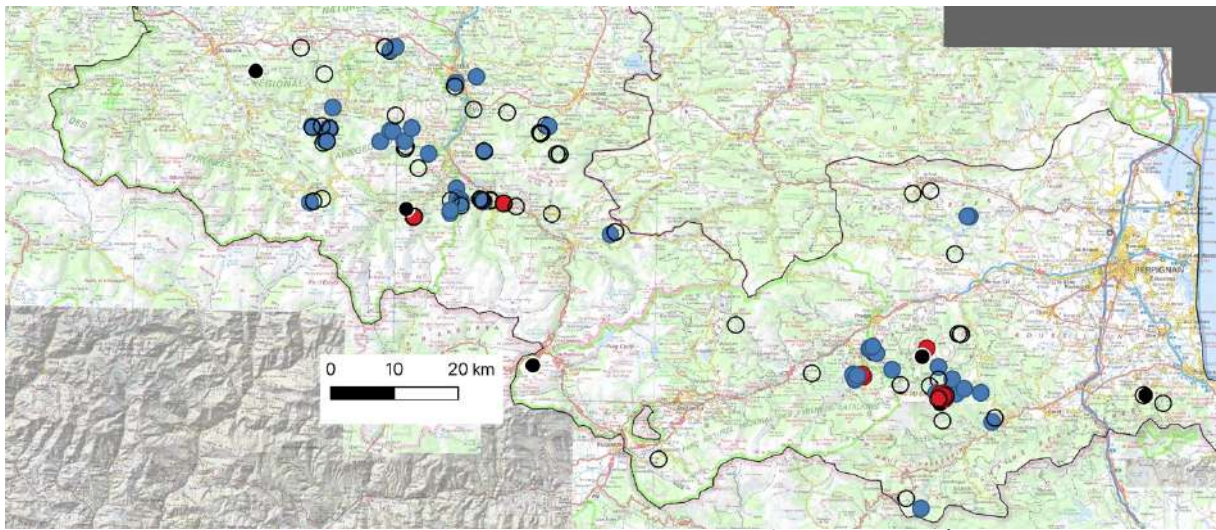


Figure 6 : les sites miniers ferreux qui remonte à l'Antiquité (noir), au Moyen-Âge (rouge) et à l'Époque moderne (bleu).

## 2. Les établissements sidérurgiques hydrauliques (postérieurs à la 2<sup>e</sup> moitié du XIII<sup>e</sup> s.)

Dans ce lot de 714 sites, 537 sont des sites de réduction du minerai utilisant le processus de réduction direct. 28 autres sites sont des vestiges en rapport avec la métallurgie tels que les fours à griller moderne et contemporain ou les descargues, ces espaces d'entrepôt du minerai de fer à ciel ouvert qui ponctuent les chemins d'acheminement du minerai depuis la mine jusqu'aux sites de réduction spécialement à partir du Moyen-Âge central.

Dans les 537 sites de réduction du minerai, 108 sont des établissements sidérurgiques mobilisant la force hydraulique pour mouvoir le marteau et/ou activer la ventilation forcée du bas foyer ou du fourneau (Figure 7). Ces sites hydrauliques sont pour la plupart datés par les documentations archivistiques (87 sites) et par les travaux réalisés par Catherine Verna et Jean Cantelaube (Figure 10). 9 sites sont aussi datés par la typologie des installations. Pour ces derniers, il s'agit donc d'une datation large, peu précise qui remonte à l'époque moderne ou contemporaine.

Tous ces sites sont évidemment installés en bord de cours d'eau. Leur présence est plus importante en Ariège, mais il semble que cela soit un effet lié à la source (Figure 7). Dans les Pyrénées-Orientales les épisodes orageux destructeurs de crue sont nombreux et parfois gigantesques. Pour mémoire et exemple, il suffit de mesurer l'importance de l'aiguat (déluge en catalan) de 1940. Ces déluges et ces crues des cours d'eau ont totalement effacé les vestiges archéologiques de nombreux établissements sidérurgiques installés en bord de cours d'eau pour utiliser cette énergie. Ce cas de figure semble moins présent en Ariège sans pour autant être inexistant évidemment. La discussion concernant les cours d'eau privilégiés et les zones géographiques préférées pour l'installation de ce type d'établissement seront détaillées dans le prochain triennal du PCR (2024-2026) sur la base de la documentation ici présentée.

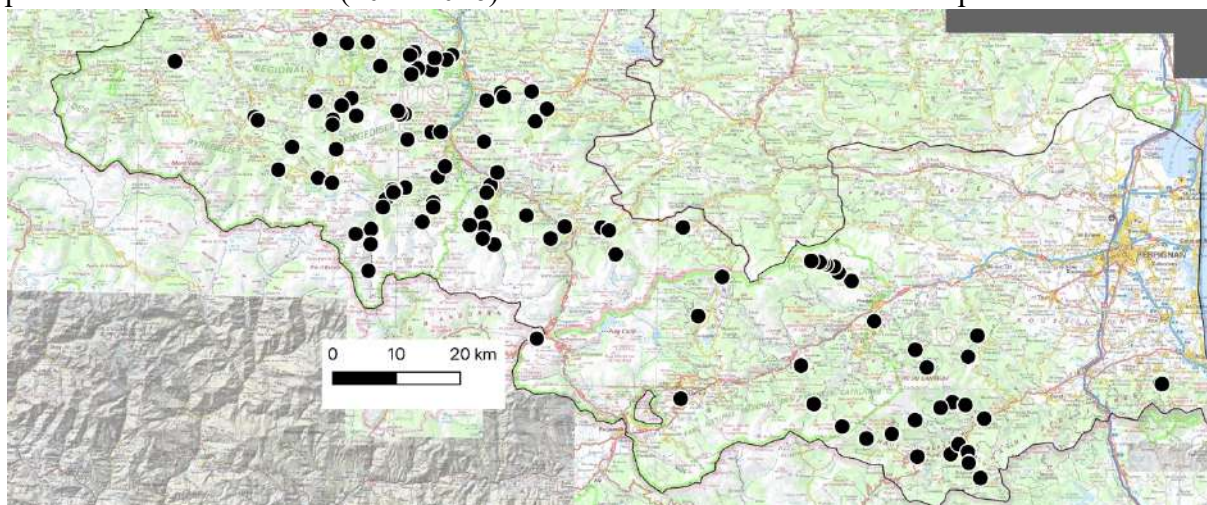


Figure 7 : les 108 sites utilisant la force hydraulique inventoriés dans le programme.

Cependant, 7 sites ont bénéficié de datation C14 sur charbon de bois pour préciser leur chronologie (Figure 8, Figure 9). Nous n'intégrons pas ici les données C14 de la fouille programmée Castel-Minier (Aulus-Les-Bains, 09) qui sont pourtant bien présentes. En revanche, les données chronologiques de ce site 09029\_2 (1250-1580) sont bien intégrées au modèle et à la base générale.

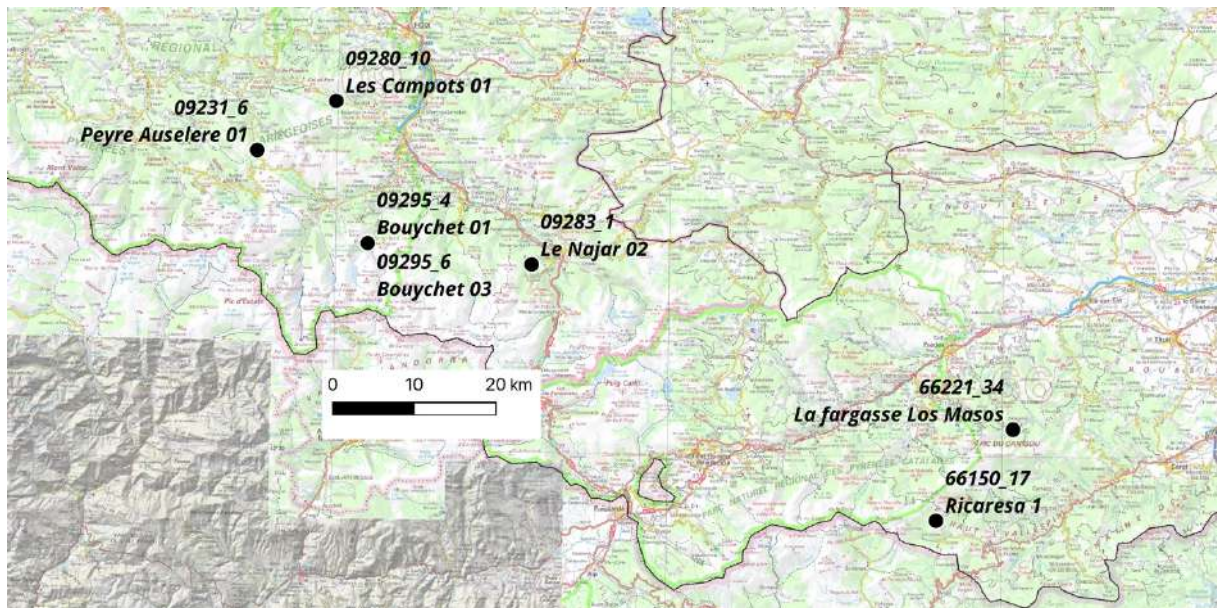


Figure 8 : les sites hydrauliques pour lesquels des datations C14 sur charbon de bois ont été réalisées.

Voici les dates C14 brutes et calibrées des sites hydrauliques avec le code de traitement OxCal (Figure 9).

```

R_Date("66221_34_Poz#2-150218",714,27);
R_Date("66221_34_Poz#2-150219",710,27);
R_Date("66150_17_CIRAM-9107", 632,28);
R_Date("09280_10_Poz#2-150080",545,28);
R_Date("09283_1_Sd1_CIRAM-5302 ",627,26);
R_Date("09283_1_Sd2_CIRAM-5303 ",381,26);
R_Combine("09295_4")
{
  R_Date("09295_4_Poz#2-150083",273,27);
  R_Date("09295_4_Poz#2-150084",421,28);
};
R_Date("09295_6_Poz#2-150086",267,27);
  
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 66221_34_Poz#2-150218	1275	1295	1263	1383
R_Date 66221_34_Poz#2-150219	1275	1297	1266	1384
R_Date 66150_17_CIRAM-9107	1300	1392	1292	1397
R_Date 09280_10_Poz#2-150080	1328	1425	1321	1434
R_Date 09283_1_Sd1_CIRAM-5302	1301	1393	1296	1398
R_Date 09283_1_Sd2_CIRAM-5303	1456	1617	1447	1631
R_Combine 09295_4	1490	1630	1475	1635
R_Date 09295_6_Poz#2-150086	1529	1661	1520	1798

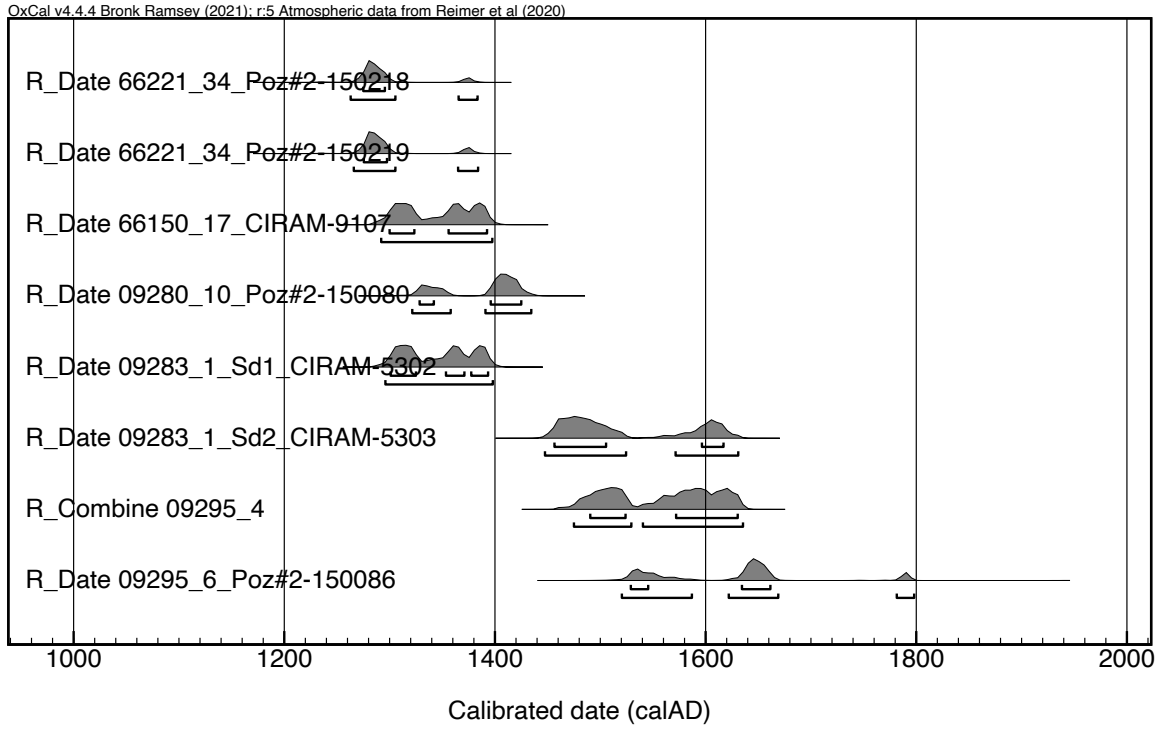


Figure 9 : les dates C14 brutes et calibrées des sites hydrauliques avec le code de traitement OxCal

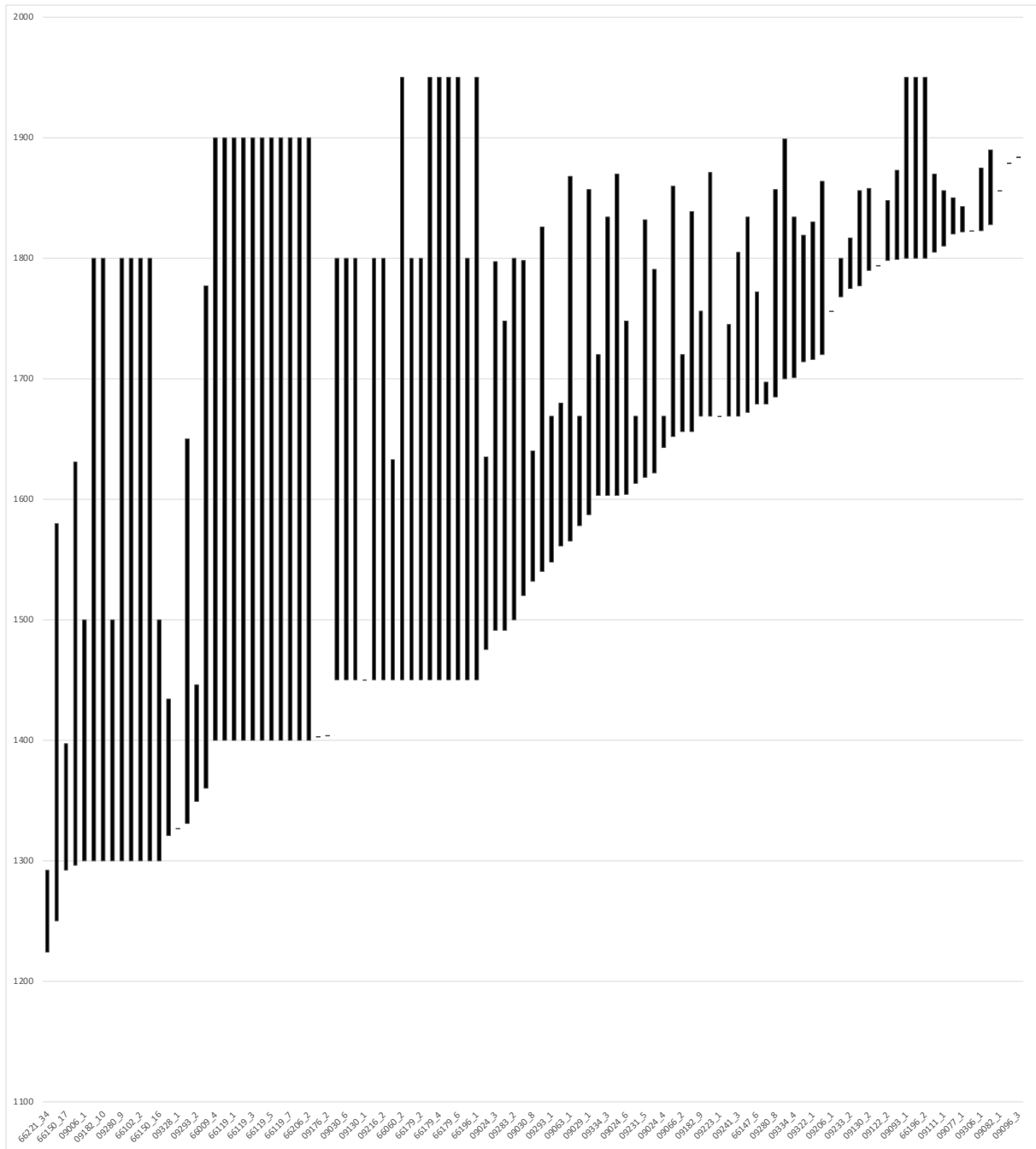


Figure 10 : les 108 sites utilisant la force hydraulique et leur datation

Plusieurs enseignements doivent être notés grâce à ces résultats. Les données acquises renouvellent fortement la documentation archéologique des sites où l'utilisation de la force hydraulique est précoce dans le Moyen Âge (Figure 9 et Figure 10). Il est très bien connu le cas d'Aulus-les-Bains, grâce aux fouilles programmées de Florian Téreygeol, mais il est désormais possible de mentionner d'autres sites hydrauliques sensiblement de la même époque. Il y a les sites Le Najar 02 (09283\_1) et Les Campots 01 (09280\_10) en Ariège. Il y a aussi désormais des sites localisés et conservés qui semblent utiliser la force hydraulique dès la deuxième moitié du XIIIe s. dans les Pyrénées-Orientales. Ce sont les sites de La Fargasse Los Masos (66221\_34) et la Ricaresa 1(66150\_17). La mise en place des techniques métallurgiques hydrauliques dans la deuxième moitié du XIIIe s. est reconnue dans les textes, notamment grâce aux travaux de Catherine Verna. On peut désormais y associer une liste de sites dans les 2

départements qui permettra de mieux comprendre la mise en place de cette innovation technique. À noter que le site de la Ricaresa 1 est également mentionné et renseigné dans les archives pour des dates qui remontent au début du XIV<sup>e</sup> s. Cela corrobore la datation C14 et fait de ce site un établissement à privilégier pour les études archéologiques futures avec une dimension interdisciplinaire forte (archéologie, histoire, archéométrie).

### 3. Les espaces sidérurgiques de réduction directe en bas fourneau

Dans le lot de 714 sites inventoriés, 537 sont des sites de réduction du minerai utilisant le processus de réduction directe dont 108 également sont des établissements sidérurgiques. 416 sont donc des sites de réduction directs n'utilisant pas la force hydraulique. Ce sont des sites de réduction en bas fourneau. Dans ces 416 sites (Figure 11), 306 ne disposent pas d'éléments de datation. 110 sont en revanche datés.

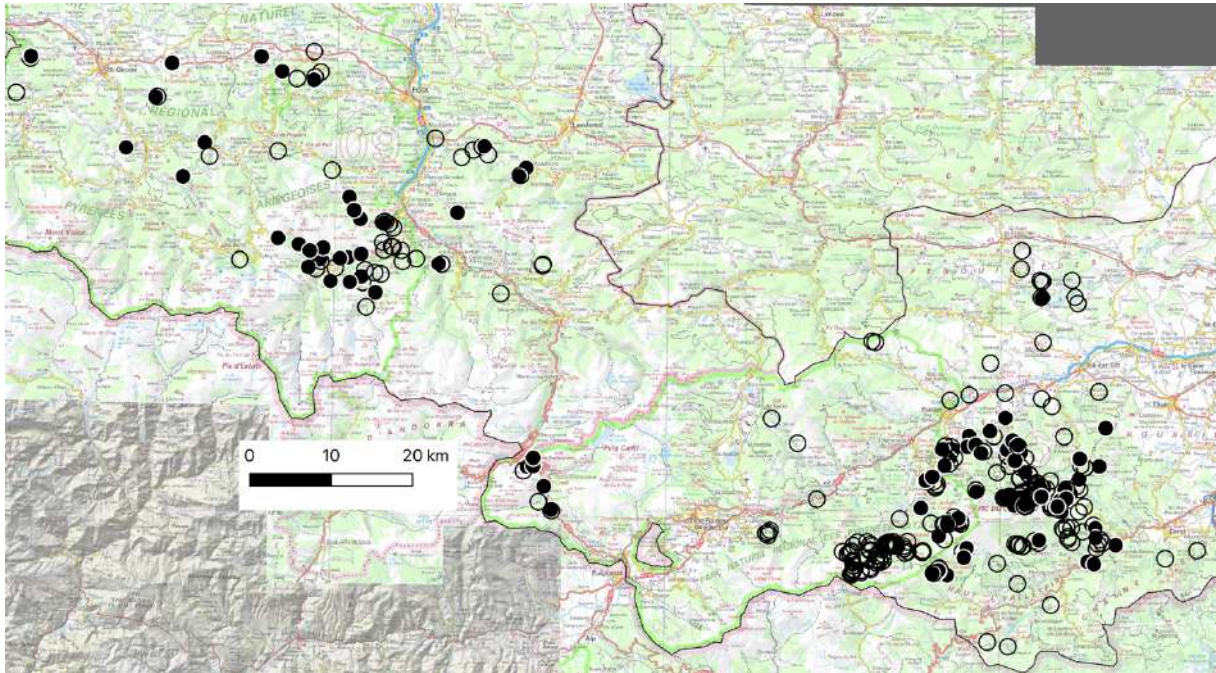


Figure 11 : les 416 sites de réduction directe non hydrauliques datés (110 ronds noirs pleins) et non datés (306).

D'après la Figure 11, on mesure que la répartition de ces sites est assez concentrée dans le massif du Canigou et dans les massifs autour du Rancié et de la vallée du Vicdessos. Un autre ensemble se dégage autour du Puymorens à la frontière entre les départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales. Ces sites se trouvent aussi dans le Couserans, dans le massif d'Arize et dans les Monts d'Olmes/Barthélémy côté Ariège. Dans les Pyrénées-Orientales, ces sites se situent également, mais de manière plus parsemée, dans le Fenouillèdes et les Albères. D'autres se situent aussi en Cerdagne dans la vallée du Planès.

Ces ensembles géographiques peuvent être encore plus précisés notamment dans le massif du Canigou et plus largement dans le département des Pyrénées-Orientales grâce à la localisation des sites (Figure 12).

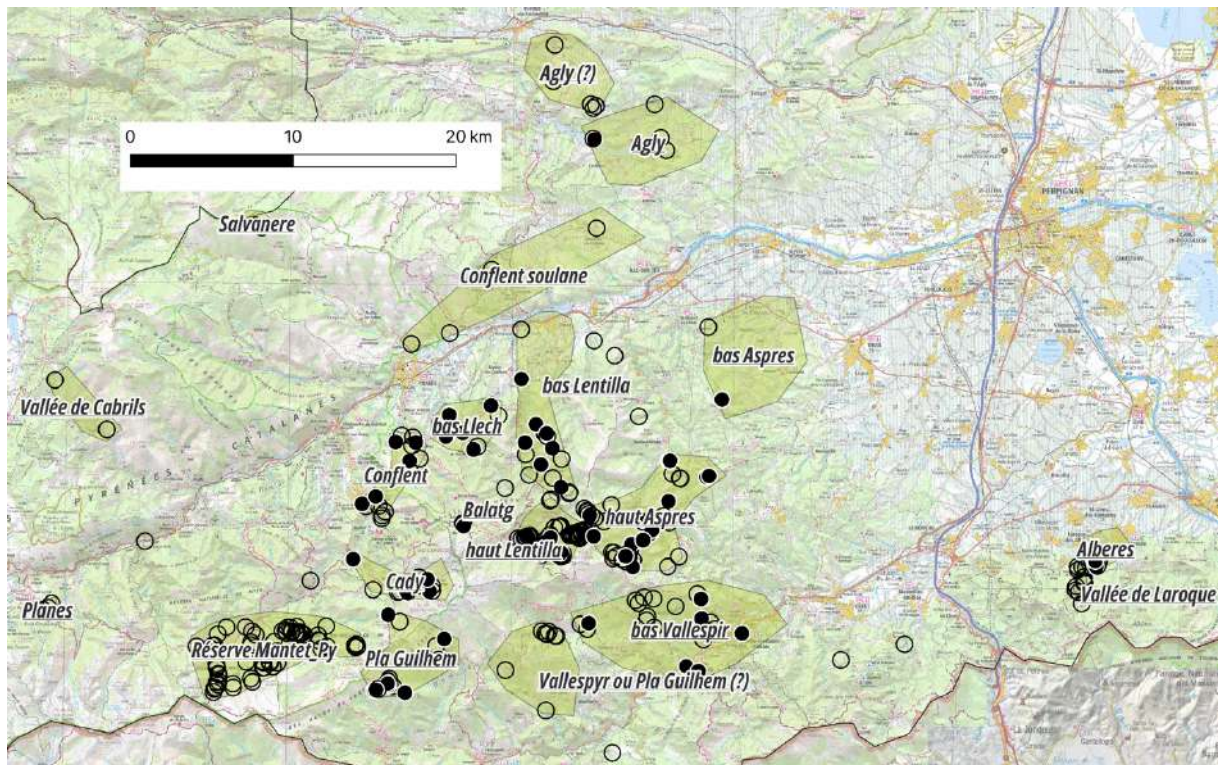


Figure 12 : les espaces sidérurgiques des Pyrénées-Orientales (sans le Puymorens) qui sont définis grâce à la répartition des sites de réduction directe non hydrauliques

Il est possible de distinguer 21 espaces ou zones sidérurgiques distinctes dans les Pyrénées-Orientales. Il y a évidemment la zone du Puymorens qui n'est pas sur la Figure 12 et 18 autres zones correctement définies. 2 zones encore à définir. Ce sont des zones indépendantes ou des zones tampons. C'est la zone Vallespir ou Pla Guilhem (?) et Agly (?). La question sera tranchée dans le prochain triennal du PCR FERAPO (2024-2026). 5 petites zones sans sites datés se dégagent. Il s'agit des zones de Planès, vallée de Cabrils, Salvànere, Conflent soulane, Vallée de Laroque. Une très grosse zone métallurgique est présente dans la réserve de Mantet-Py. Aucune datation n'est connue ici. Il faudra impérativement remédier à ce problème de datation dans cet espace au cours du triennal 2024-2026 FERAPO. Ainsi, en plus de la zone du Puymorens hors de la Figure 12, 12 autres espaces sidérurgiques peuvent être distingués avec des sites dont la chronologie est connue ou en partie connue : Agly, Albères, bas-Aspres, haut-Aspres, bas-Lentilla, haut-Lentilla, bas-Llech, Conflent, Balatg, Cady, Pla-Guillem, Bas-Vallespir (Figure 12). La chronologie de chaque espace est discutée dans les pages suivantes.

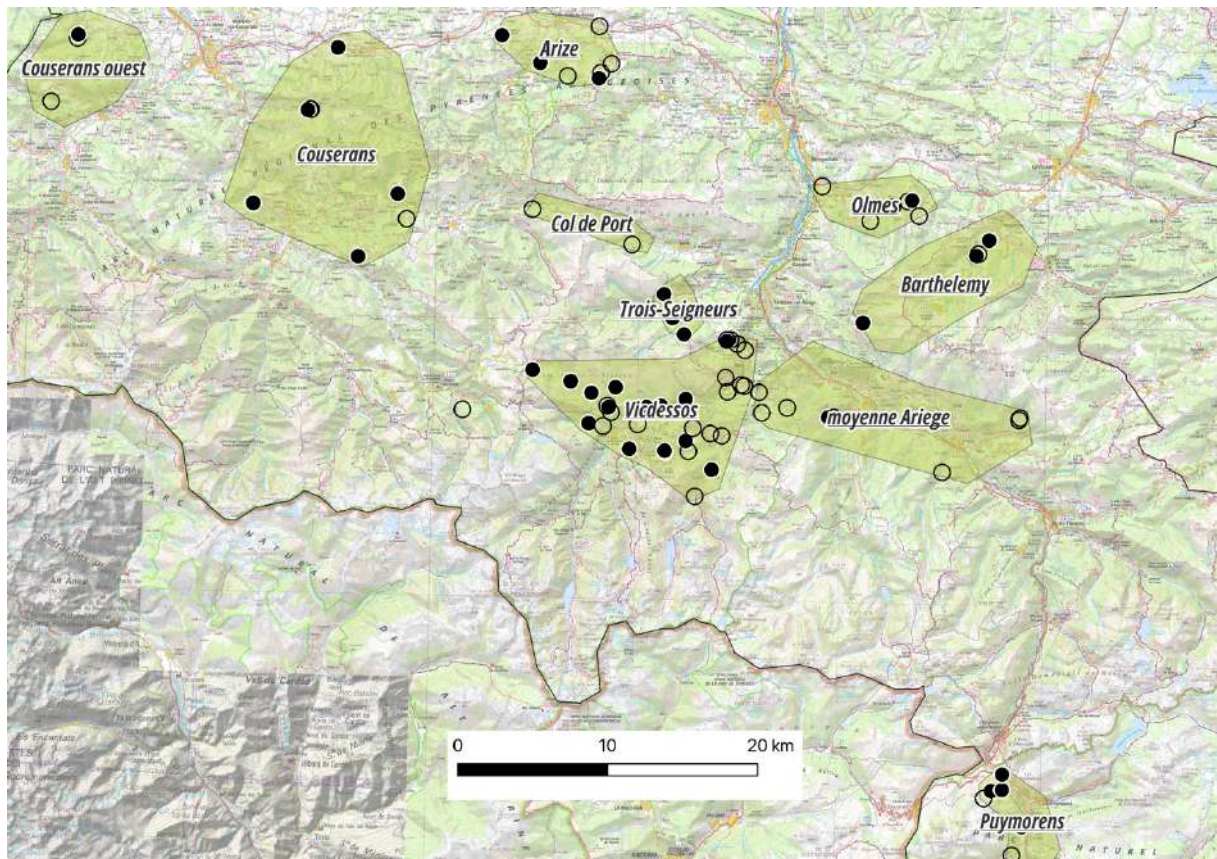


Figure 13 : les espaces sidérurgiques d'Ariège (avec le Puymorens qui est dans les Pyrénées-Orientales) qui sont définis grâce à la répartition des sites de réduction directe non hydrauliques.

Dans le département de l'Ariège, il est possible de faire le même exercice pour définir des zones de production sidérurgique (Figure 13). Ainsi, 9 zones apparaissent. D'ouest en est : le Couserans ouest, le Couserans, l'Arize, Col de Port, Trois Seigneurs, Vicdessos, Olmes (Mont d'), Barthélemy et moyenne Ariège. Toutes sauf le col de Port possèdent des sites dont la chronologie est connue, mais certains espaces requièrent la datation de nouveaux sites étant donné que pour l'instant une seule datation s'y réfère. C'est le cas de 3 des 9 espaces : Couserans ouest, Olmes, Barthélemy et moyenne Ariège.

#### *La chronologie des espaces sidérurgiques de réduction directe en bas fourneau*

Les chronologies sont établies sur la base des données C14 produites dans le cadre des programmes FERMAPYR et FERAPO, mais reprennent aussi les données chronologiques établies auparavant dans le cadre d'autres opérations archéologiques ou de publications.

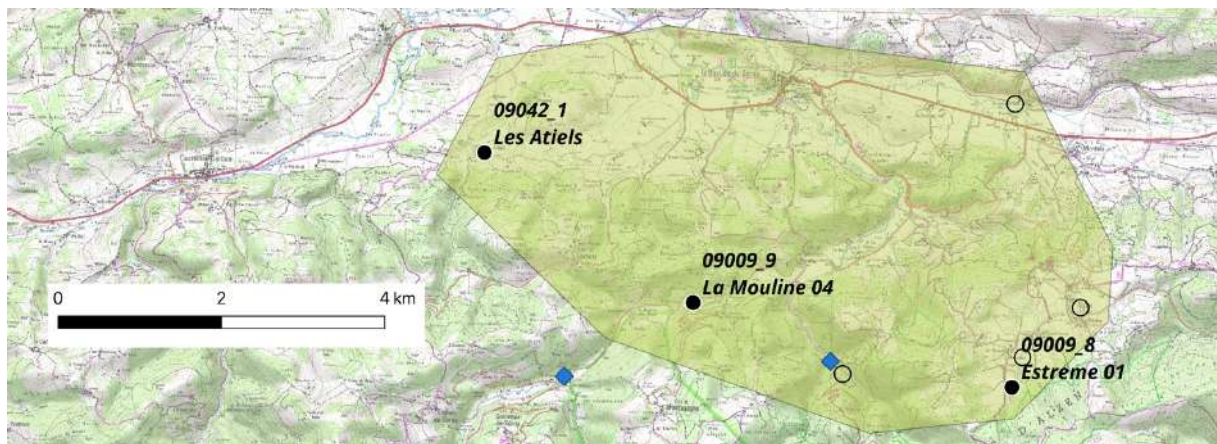
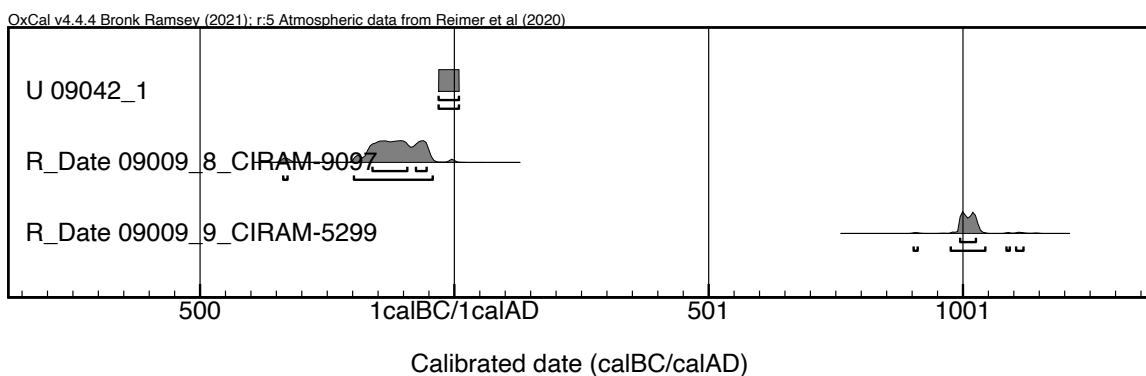
Les données sont présentées par secteur. Une carte représente le secteur avec en noir les sites dont la datation est discutée. Pour ces sites sont mentionnés le numéro-projet (code commune+n°) et le nom du site. Ensuite pour chaque espace, les dates C14 brutes et calibrées des sites avec le code de traitement OxCal sont listées. Les bornes chronologiques des occupations sidérurgiques établies par les travaux antérieurs sont aussi présentées ici, mais sous la forme de bornes chronologiques inférieures et supérieures. Sur la carte sont aussi localisés les sites hydrauliques inventoriés dans le projet (losange bleu). Ainsi, il est possible de voir si le secteur est concerné par l'implantation d'établissements mobilisant l'utilisation de cette énergie.

Ariège

Arize

```
Date("09042_1",(U(-30,10)));  
R_Date("09009_8_CIRAM-9097", 2103, 30);  
R_Date("09009_9_CIRAM-5299",1027,26);
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
U 09042_1	-32	10	-32	10
R_Date 09009_8_CIRAM-9097	-162	-55	-337	-43
R_Date 09009_9_CIRAM-5299	995	1026	904	1120

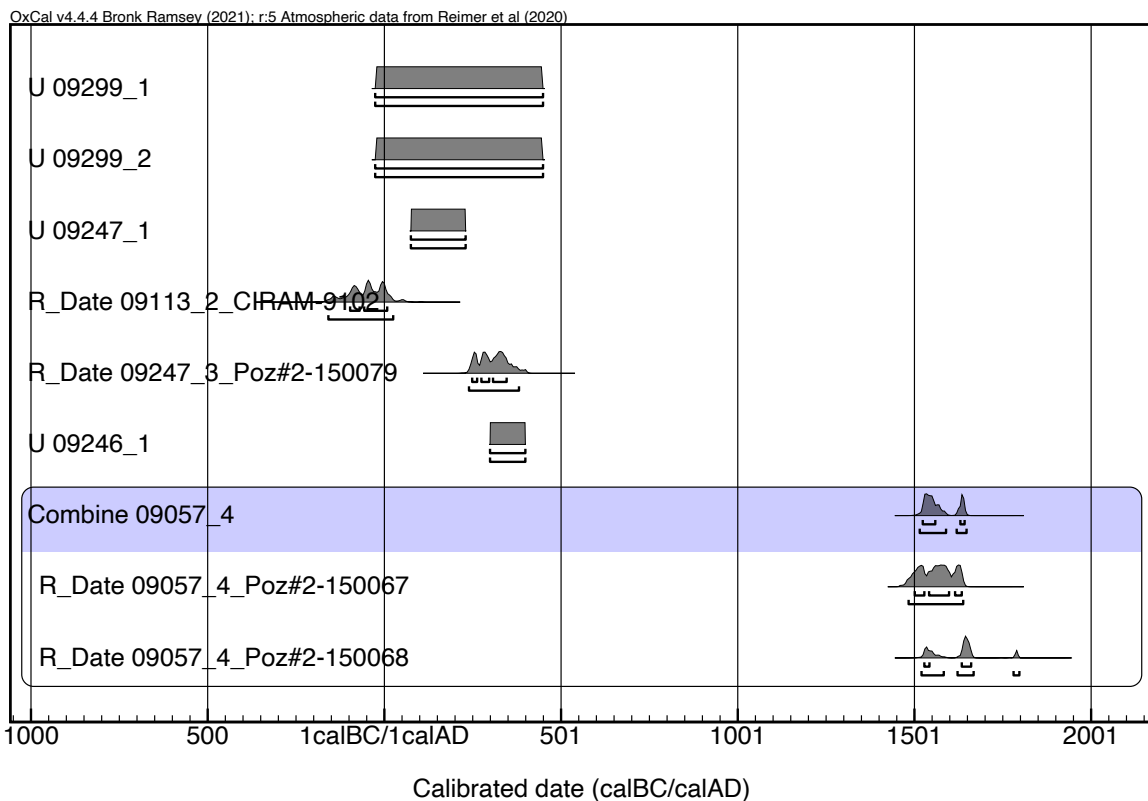


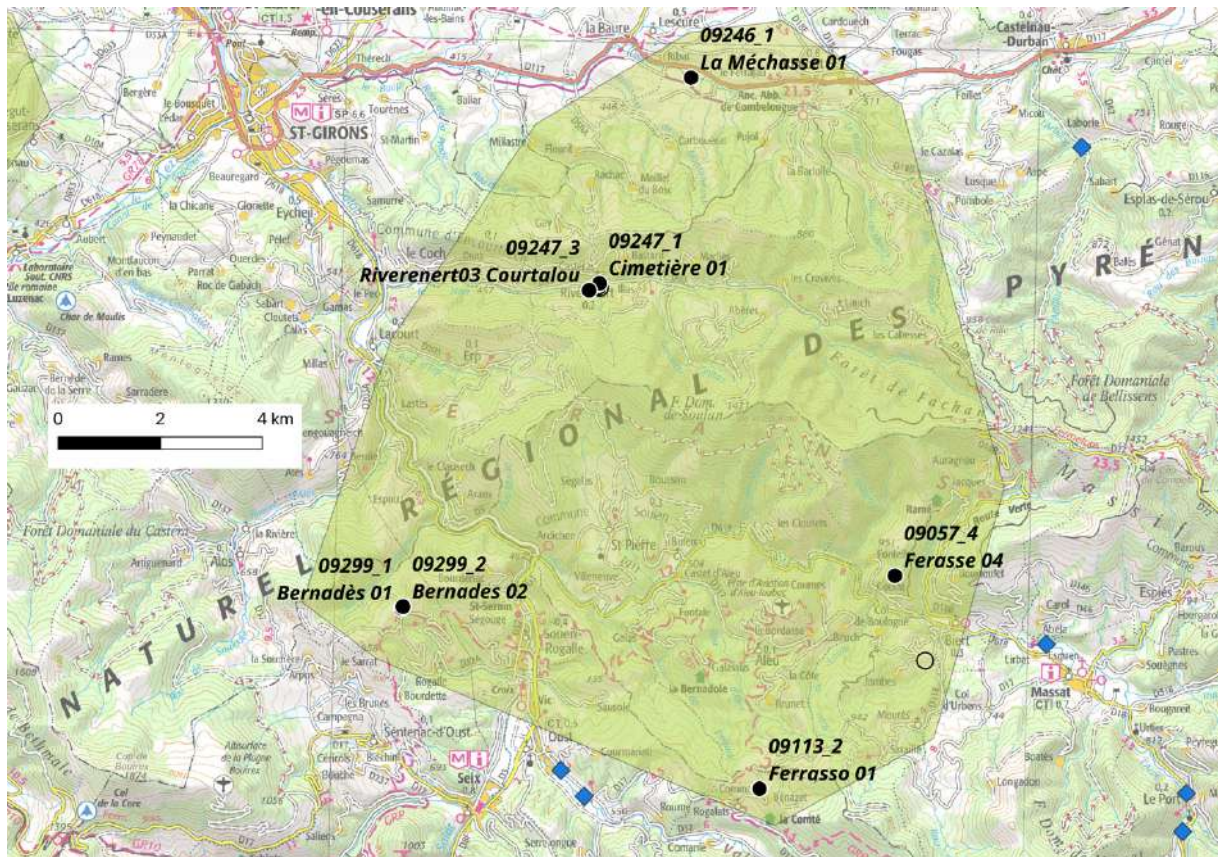
L'Arize est un massif qui constitue les contreforts septentrionaux des Pyrénées directement à l'ouest de la plaine de la rivière Ariège. Cette zone est bien connue depuis les travaux d'Emmanuel Meunier pour l'exploitation du cuivre dès le IV<sup>e</sup> s. av. J.-C. Aujourd'hui, il apparaît que l'Arize est la zone la plus précoce exploitée en Ariège pour le fer. L'interaction entre métallurgie du cuivre et du fer devra ici être étudiée plus précisément dans la suite du programme FERAPO. C'est là un aspect majeur à développer. À noter que cette installation précoce de la sidérurgie dans la zone ne semble pas se développer au Haut-Empire. Les installations semblent uniquement concerner l'époque républicaine - peut-être la période gauloise, mais cela doit être vérifié). Cette métallurgie du fer directe non hydraulique semble être à nouveau mise en place au plein cœur du Moyen-Âge et rester active plus tard avec l'utilisation de la force hydraulique.

Couserans

```
Date("09299_1", (U(-25,450)));
Date("09299_2", (U(-25,450)));
Date("09247_1", (U(76,231)));
R_Date("09113_2_CIRAM-9102", 2050,30);
R_Date("09247_3_Poz#2-150079", 1750,26);
Date("09246_1", (U(300,400)));
Combine("09057_4"){R_Date("09057_4_Poz#2-150067", 331,25);
R_Date("09057_4_Poz#2-150068", 267,26);
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
U 09299 1	-27	450	-27	450
U 09299 2	-27	450	-27	450
U 09247 1	76	231	76	231
R Date 09113 2 CIRAM-9102	-98	9	-159	26
R Date 09247 3 Poz#2-150079	249	347	240	382
U 09246 1	300	400	300	400
Combine 09057 4	1524	1643	1516	1648





Le Couserans était connu pour abriter des établissements sidérurgiques romains, notamment grâce aux travaux de Claude Dubois à Riverenert. Des datations sur 2 nouveaux sites viennent confirmer cet état de fait. Il existe une métallurgie du fer primaire essentiellement dans le Haut-Empire dans le Couserans. Des indices semblent faire remonter cette industrie à la période républicaine, mais cela devra être confirmé. Il semble que la métallurgie du fer antique dans le Couserans se place dans la suite de celle développée dans l'Arize, juste à l'est. Cette métallurgie ne semble pas persister à partir du Bas-Empire. L'utilisation de la force hydraulique n'est ici pas inventoriée, mais cela et plus un effet de source probablement. On note l'existence d'un site de réduction directe tardif sur le site de la Ferrasse 04 dans la vallée de Massat. C'est là un cas de figure de persistance des techniques anciennes au XVIe s. alors que la métallurgie hydraulique est déjà bien en place. Ce qui paraît surprenant est que le site est important. Cette persistance de la métallurgie avec des techniques anciennes n'est donc pas anecdotique. C'est un cas de figure qui devra être encore discuté.

Vicdessos

```

R_Date("09334_10_CIRAM-5304",1902,28);
R_Date("09334_15_CIRAM-9100", 1810, 29);
R_Combine("09162_1")
{
R_Date("09162_1_ARC514",1690,50);
R_Date("09162_1_ARC1375",1715,40);
R_Date("09162_1_ARC1702",1720,40);
R_Date("09162_1_ARC1701",1830,40);
};
R_Date("09334_14_Poz#2-150090",1761,30);
R_Combine("09334_7")
{
R_Date("09334_7_CIRAM-5305",1771,27);
R_Date("09334_7_CIRAM-5306",1695,27);
};
R_Date("09334_11_Poz#2-150087",1683,30);
R_Date("09030_5_CIRAM-5298",1662,27);
R_Combine("09334_13")
{
R_Date("09334_13_Poz#2-150088",1648,30);
R_Date("09334_13_Poz#2-150089",1671,27);
};
R_Combine("09222_1")
{
R_Date("09222_1_Poz#2-150073",1238,28);
R_Date("09222_1_Poz#2-150074",1233,28);
};
R_Date("09334_8_Poz-134994",1150,30);
R_Date("09222_2_Poz#2-150076",1149,29);
R_Date("09143_1_CIRAM-5300",961,26);

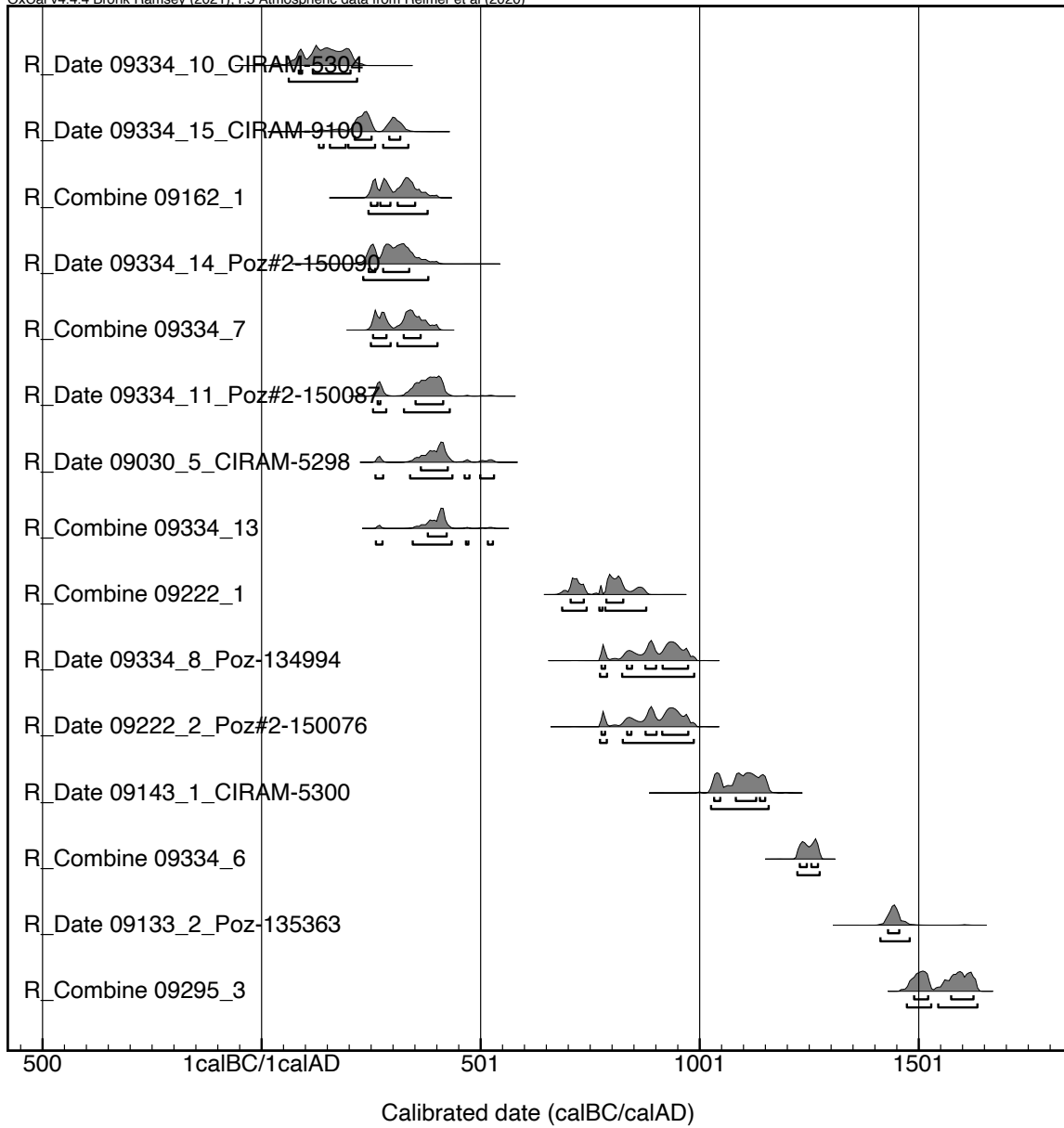
R_Combine("09334_6")
{
R_Date("09334_6_Poz#2-150091",755,28);
R_Date("09334_6_Poz#2-150216",813,27);
};
R_Date("09133_2_Poz-135363",450,30);};
R_Combine("09295_3")
{
R_Date("09295_3_Poz#2-150081",283,27);
R_Date("09295_3_Poz#2-150082",401,25);
};

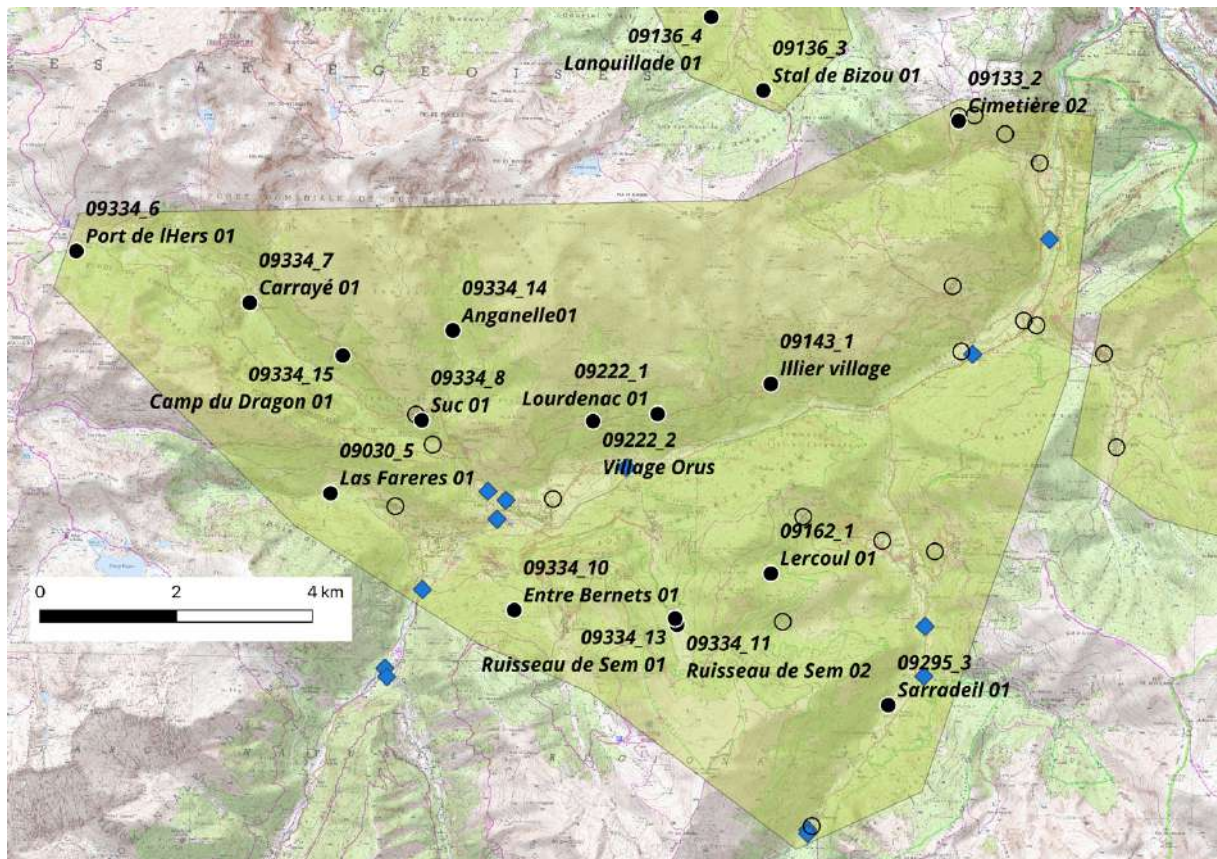
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 09334_10_CIRAM-5304	86	204	63	219
R_Date 09334_15_CIRAM-9100	213	317	132	336
R_Combine 09162_1	250	351	245	380

R Date 09334 14 Poz#2-150090	245	338	233	381
R Combine 09334 7	255	364	250	402
R Date 09334 11 Poz#2-150087	266	415	255	430
R Date 09030 5 CIRAM-5298	364	426	261	531
R Combine 09334 13	380	423	262	529
R Combine 09222 1	706	826	687	879
R Date 09334 8 Poz-134994	777	974	773	988
R Date 09222 2 Poz#2-150076	777	975	773	987
R Date 09143 1 CIRAM-5300	1034	1150	1027	1158
R Combine 09334 6	1229	1271	1224	1275
R Date 09133 2 Poz-135363	1431	1456	1413	1480
R Combine 09295 3	1490	1626	1474	1635

OxCal v4.4.4 Bronk Ramsey (2021); r:5 Atmospheric data from Reimer et al (2020)





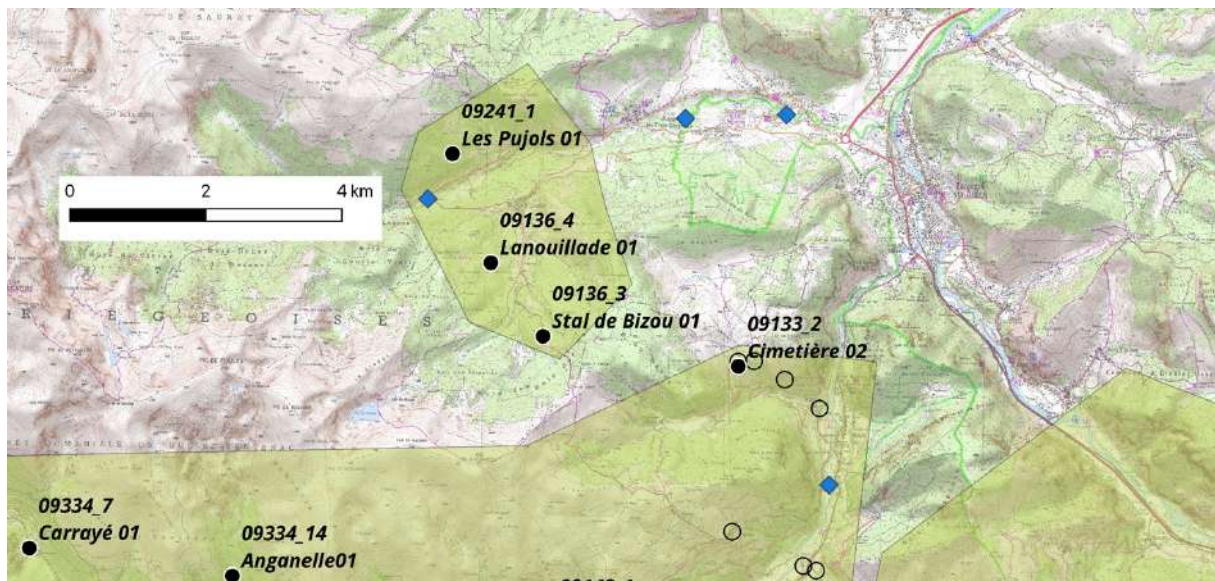
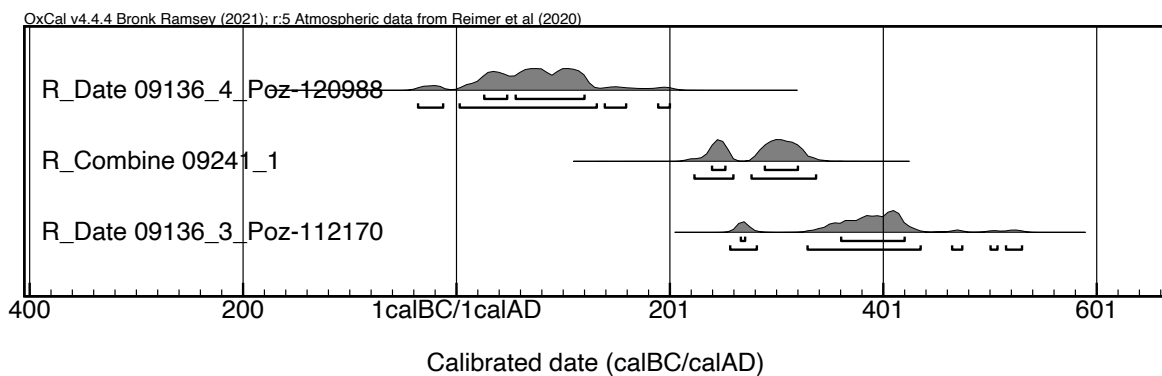
Le Vicdessos est l'espace sidérurgique le plus fourni en Ariège. Il intègre la mine principale d'Ariège du Rancié. Ici la métallurgie semble débuter à la fin du Haut-Empire et surtout au Bas-Empire. Les chronologies d'exploitation sont donc postérieures au secteur de l'Arize et du Couserans. 8 des 15 sites datés appartiennent à cette phase du Bas-Empire. La période wisigothique ne semble pas représentée dans le Vicdessos. En revanche, la période carolingienne l'est de manière significative avec 3 sites. Le XI et le XIIe sont également par un site chacun. Peut-on parler de continuité dans la production de fer dans le Vicdessos depuis l'époque carolingienne ? La question devra être débattue, mais des arguments peuvent confirmer cette hypothèse. En revanche, le hiatus wisigothique est lui bien présent. Dans le secteur, l'utilisation de la force hydraulique à partir du XIVe siècle est bien attestée par les textes et l'archéologie. La persistance de la réduction directe classique en bas fourneau également par deux sites. Parfois ces sites se côtoient même comme dans la vallée du Siguer au sud-est de ce secteur métallurgique.

### Trois Seigneurs

```

R_Date("09136_4_Poz-120988",1950,30);
R_Combine("09241_1")
{
  R_Date("09241_1_Poz#2-150077",1839,29);
  R_Date("09241_1_Poz#2-150078",1727,30);
};
R_Date("09136_3_Poz-112170",1670,30);
  
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R Date 09136 4 Poz-120988	27	121	-37	201
R Combine 09241 1	240	321	224	338
R Date 09136 3 Poz-112170	267	421	257	531

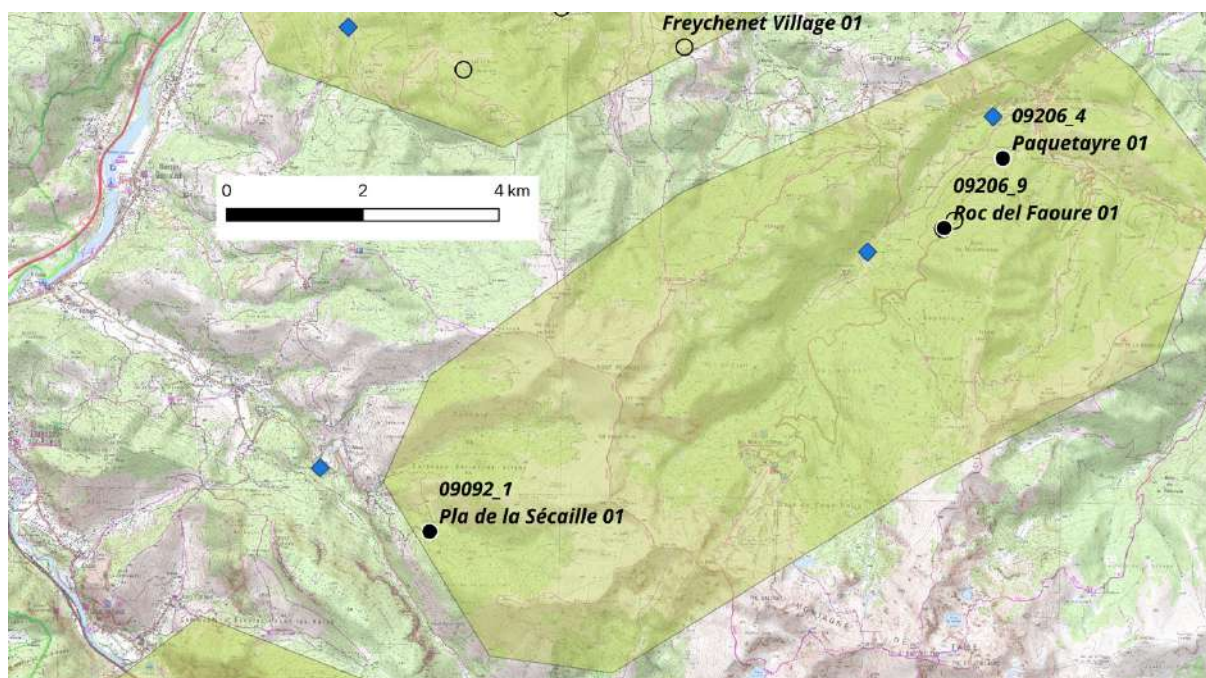
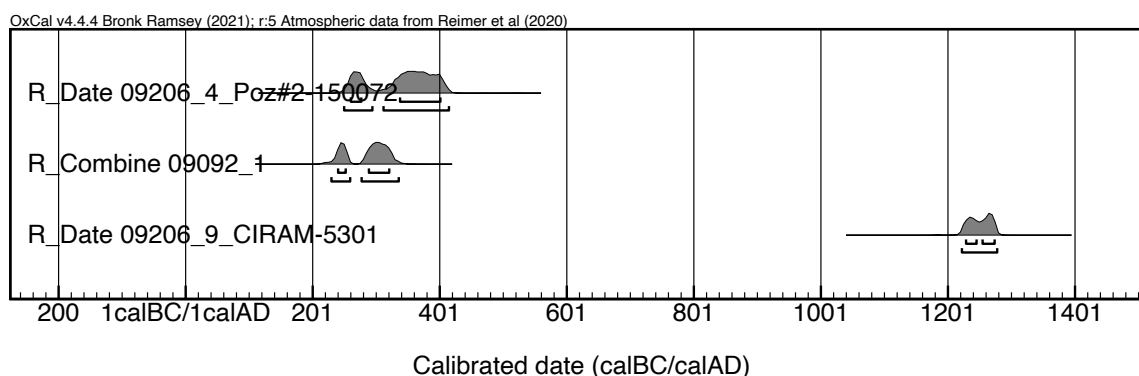


Le secteur des Trois Seigneurs suit sensiblement la même trajectoire chronologique que le Vicdessos qu'il jouxte au sud pour la période antique. Il apparaît que la métallurgie s'y développe spécialement durant le Bas-Empire. Cette phase semble cependant ici clairement prendre racine dans une métallurgie du Haut-Empire peut-être peu étendue, mais certaine. Il faut attendre l'installation d'établissements hydraulique pour voir la métallurgie se redévelopper dans la zone. Le secteur des Trois Seigneurs est donc pour l'Antiquité dépendant de l'évolution du secteur du Vicdessos beaucoup plus important par ailleurs, bien qu'il ait pu avoir une phase plus précoce.

## Barthélémy

```
R_Date("09206_4_Poz#2-150072",1713,30);
R_Combine("09092_1")
{
  R_Date("09092_1_Poz#2-150069",1722,29);
  R_Date("09092_1_Poz-151055",1830,25);
};
R_Date("09206_9_CIRAM-5301",779,26);
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 09206_4_Poz#2-150072	261	402	250	415
R_Combine 09092_1	241	321	230	336
R_Date 09206_9_CIRAM-5301	1229	1274	1223	1278



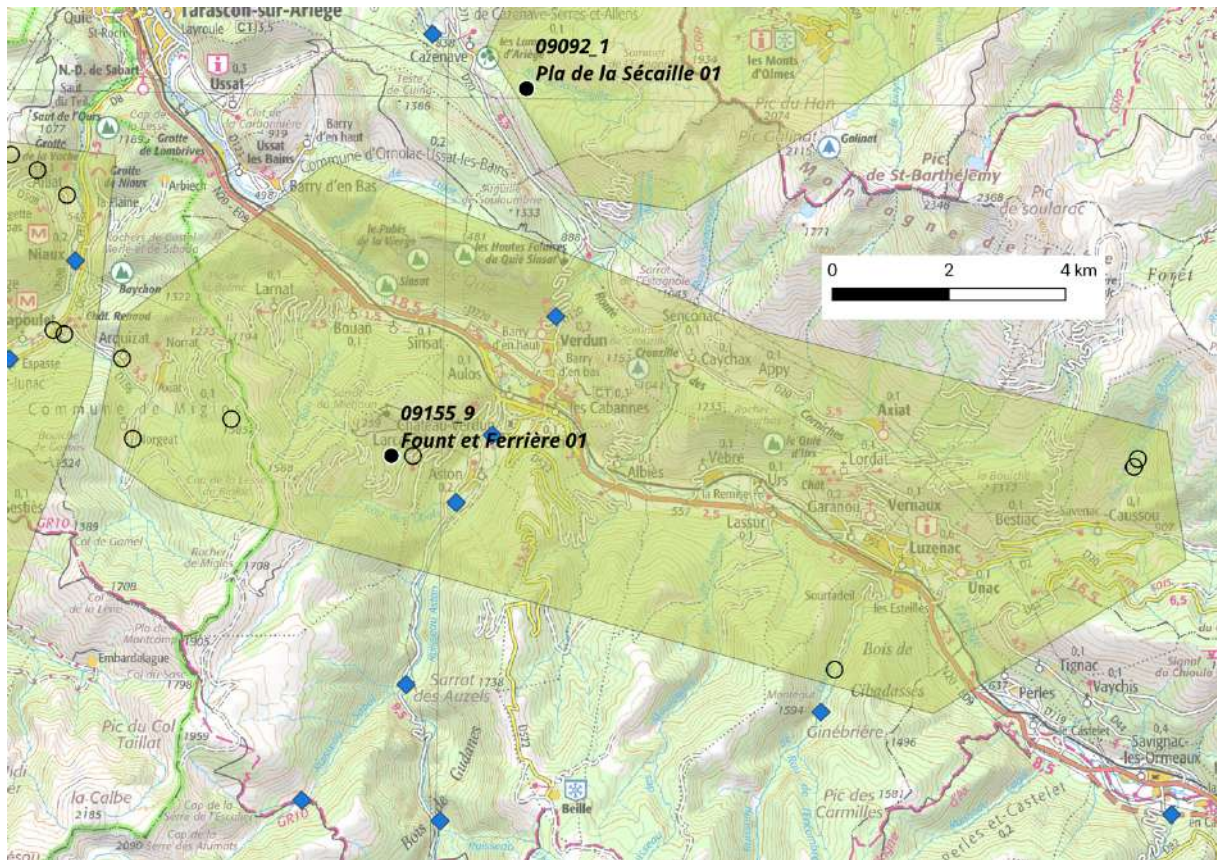
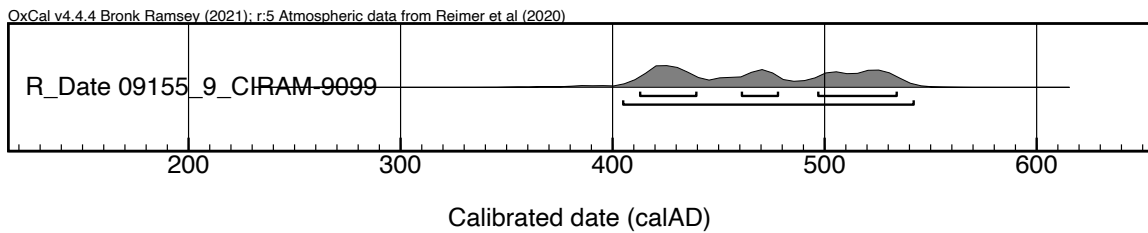
Le secteur du Barthélémy possède un cadre chronologique métallurgique sensiblement identique à celui des Trois Seigneurs et du Vicdessos. La métallurgie directe est surtout effective dans la zone au Bas-Empire. Elle existe aussi au XIII<sup>e</sup> siècle sur des établissements

de réduction directe classique. La zone connaît par ailleurs ensuite la mise en place d'établissement hydraulique.

Moyenne Ariège

R\_Date("09155\_9\_CIRAM-9099", 1623, 29);

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 09155_9_CIRAM-9099	413	534	405	542

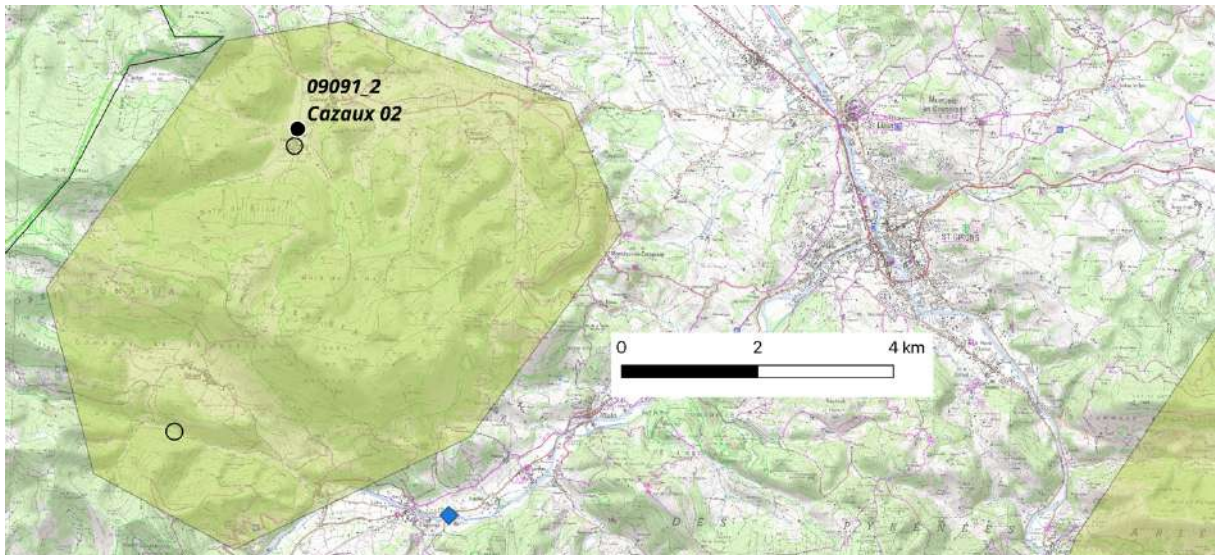
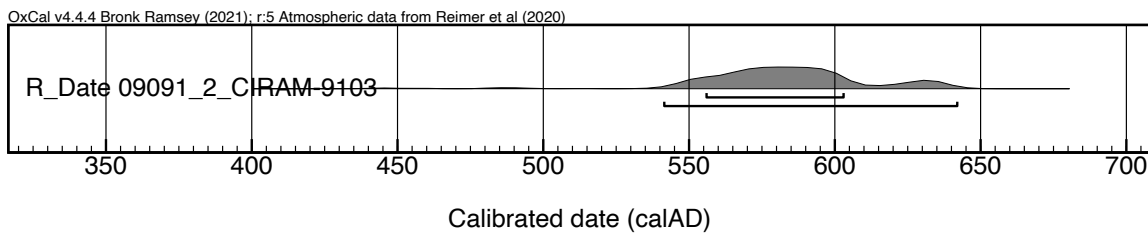


La moyenne Ariège est un secteur où la métallurgie se met en place à l'époque wisigothique contrairement aux autres secteurs qu'elle jouxte comme notamment le Vicdessos et le Saint Barthélémy. C'est donc ici le seul endroit en Ariège où la métallurgie wisigothique se développe si on exclut le secteur du Couserans ouest, très éloigné au confins occidental du département de l'Ariège. Il s'agit donc d'un cas de figure qui sort de la normale ici. La métallurgie hydraulique est en revanche bien présente dans le secteur comme d'ailleurs dans toutes l'Ariège. Ce secteur suit donc une trajectoire plus commune à partir du bas Moyen-Âge.

*Couserans ouest*

```
R_Date("09091_2_CIRAM-9103", 1496,29);
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 09091_2 CIRAM-9103	556	603	541	642

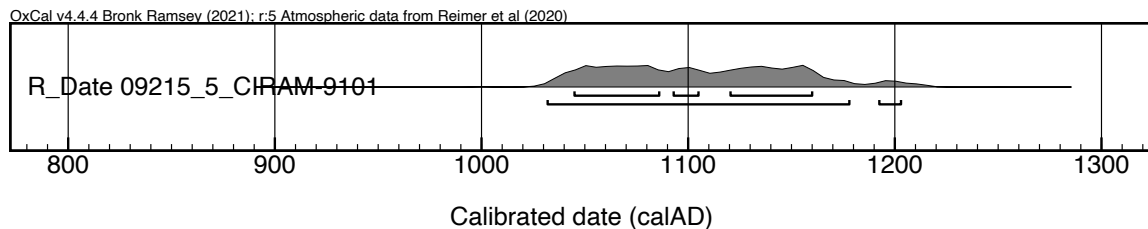


Le secteur du Couserans est au confins occidental du département de l'Ariège sur les piémonts des Pyrénées. D'aucuns diraient que ce n'est déjà plus l'Ariège ! Il s'agit d'un petit secteur qui a la spécificité d'être représenté par une exploitation wisigothique, comme l'est le secteur de la moyenne Ariège, beaucoup plus à l'est. Il compte donc parmi les secteurs remarquables pour la période wisigothique.

## Olmes

R\_Date("09215\_5\_CIRAM-9101", 930, 30);

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 09215_5_CIRAM-9101	1045	1160	1032	1203



Le secteur des Monts d'Olmes se situe entre la rivière Ariège et le Barthélémy dans un secteur de piémont. L'activité métallurgique s'y développe à partir du Moyen Âge central ou de la fin de la période carolingienne et devient importante dans le bas Moyen Âge avec l'utilisation de la force hydraulique.

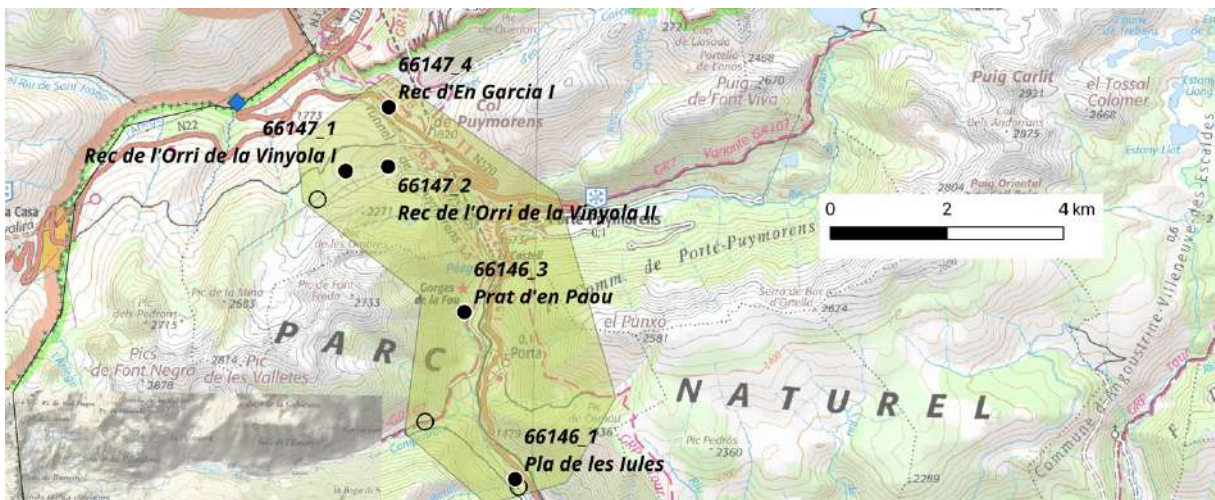
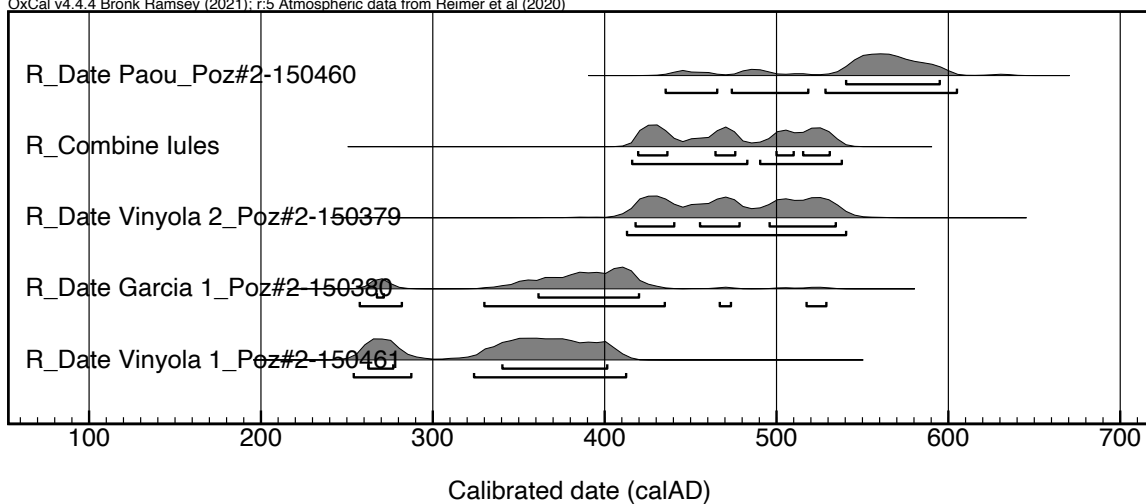
Entre Ariège et Pyrénées Orientale, le secteur du Puymorens

```

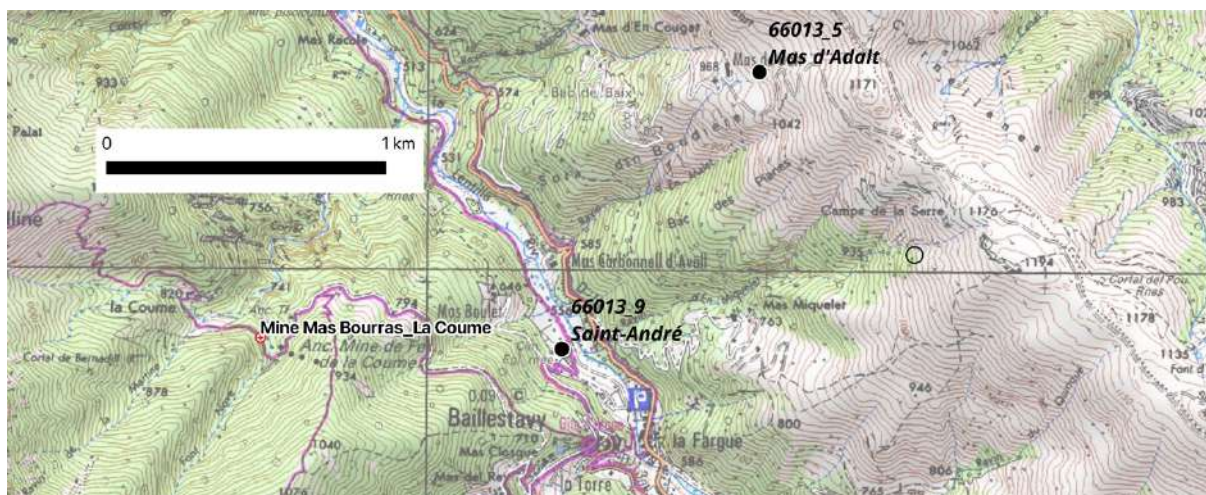
R_Date("Paou_Poz#2-150460",1525,28);
R_Combine("Iules")
{
  R_Date("Iules_Lyon-13945 (SacA 48952)",1635,30);
  R_Date("Iules_Lyon-13946 (SacA 48953)",1615,30);
  R_Date("Iules_Lyon-13947 (SacA 48954)",1590,30);
};
R_Date("Vinyola 2_Poz#2-150379",1613,28);
R_Date("Garcia 1_Poz#2-150380",1671,28);
R_Date("Vinyola 1_Poz#2-150461",1712,25);
    
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date Paou_Poz#2-150460	540	595	435	605
R_Combine Iules	419	531	416	538
R_Date Vinyola 2_Poz#2-150379	418	534	413	540
R_Date Garcia 1_Poz#2-150380	267	420	257	529
R_Date Vinyola 1_Poz#2-150461	262	401	254	412

OxCal v4.4.4 Bronk Ramsey (2021); r:5 Atmospheric data from Reimer et al (2020)



Le secteur du Puymorens est spécialement isolé. Il est éloigné des secteurs métallurgiques Ariégeois et de ceux des Pyrénées-Orientales. Il est aussi isolé par son altitude. C'est un des secteurs les plus montagnards, entre 1500 et 2100 m d'altitude. Il a aussi comme spécificité de connaître une exploitation wisigothique assez nette qui prend peut-être racine dans la fin du Bas-Empire romain. Ensuite il faut attendre le XVIIe s. et la mise en place tardive de forge hydraulique dans la zone pour y voir des métallurgistes à nouveau opérer.



La moyenne vallée de la Lentilla dans le secteur Bas Lentilla sur la commune de Baillestavy est pour l’instant la plus ancienne zone métallurgique du sud de la Gaule et de la région Occitanie avec le site des Érables à Combaillaux<sup>1</sup>. De par l’importance de ces données, une discussion sur la question est spécialement nécessaire ici. 4 datations C14 sont donc discutées. Elles proviennent de 2 contextes différents, mais complémentaires (extraction et réduction). 1 datation C14 a été réalisée dans le cadre du présent programme en 2016 à partir des données d’un sondage réalisé en 2015 sur le site 66013\_5 Mas d’Adalt (Baillestavy). 2 autres dates ont été réalisées cette année sur des charbons de bois prélevés directement dans deux scories de four de four de ce même site. On discutera aussi d’une date C14 réalisée auparavant de l’autre côté de la vallée de la Lentilla, sur l’autre versant, dans une des mines de la Coume. Cette datation a été effectuée dans le cadre des travaux de Gabriel Munteanu et de ses sondages (2005-2007) dans la galerie G2 de la mine de Mas Bourras<sup>2</sup>.

R\_Date("66013\_5\_CIRAM-9104",2207,29);  
en 2023

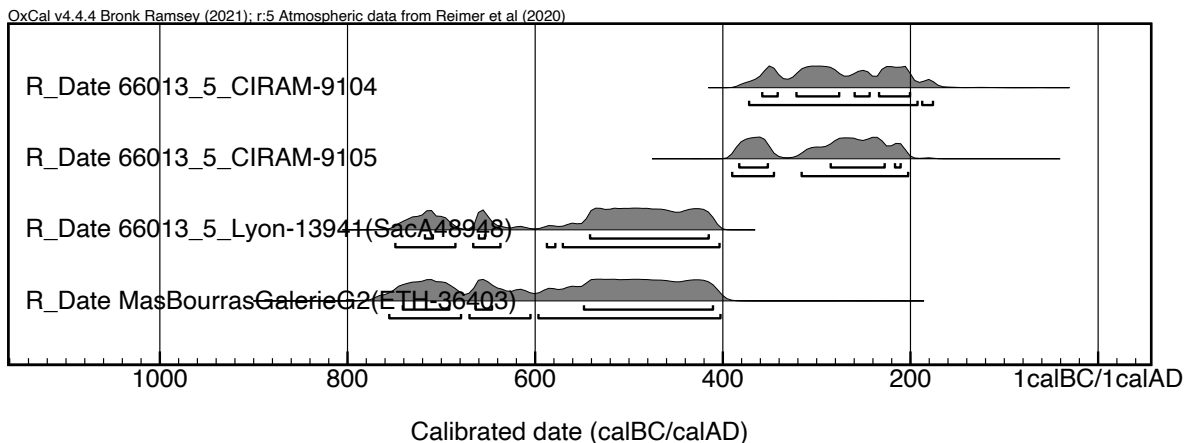
dans scorie 1 Adalt

<sup>1</sup> Consulter la référence suivante pour le site de Combaillaux : **Sanchez G., Pagès G., R. Roue R., 2023** : « Enfin un site de production du fer chez les Gaulois du Midi : premier aperçu de l’atelier de réduction des Érables à Combaillaux (Hérault, France) », in Valdés L., Cocolani V., Hiriart E. (eds) *Actes du 45eme colloque international de l’AFEAF L’Europe des matières premières au 1er Millénaire av. n. è. Exploitation, transformation, diffusion*, Gijón (Espagne, 2021), éd de l’AFEAF (collection Afeaf n°5), Paris, p. 289-293.

<sup>2</sup> Pour plus d’informations sur le contexte du sondage de la mine du Mas Bourras, consulter **Munteanu G., Tămaş C., Cauuet B., Mut G. 2017** : Vestiges de l’exploitation du fer aux époques pré romaine et romaine dans le district minier de Baillestavy (Pyrénées-Orientales, France), in Olesti i Vila O., Oller Guzmán J., Morera Camprudí J. (dir.), *ArqueoPyrenae « L’explotació dels recursos naturals al Pirineu oriental en època antiga »*, Acta di primer colloqui (Blovir, 2015), Barcelone, Universitat Autònoma de Barcelona (coll. Treballs d’Arqueologia), p. 263-285.

R_Date("66013_5_CIRAM-9105",2245,30); en 2023	dans scorie 2 Adalt
R_Date("66013_5_Lyon-13941(SacA48948)",2430,30);	sondage 2015 Adalt en 2016
R_DATE("MasBourrasG2(ETH-36403)",2435,50); Bourras	sondage mine Mas

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 66013 5 CIRAM-9104	-359	-201	-373	-177
R_Date 66013 5 CIRAM-9105	-383	-211	-391	-203
R_Date 66013 5 Lyon-13941(SacA48948)	-718	-416	-750	-404
R_Date MasBourrasGalerieG2(ETH-36403)	-742	-411	-756	-403



Pour résumer ces datations métallurgiques anciennes, 2 dates se situent entre le VIIIe s. et le Ve s. av. J.-C. Ce sont des échantillons qui proviennent du sondage du Mas d'Adalt et du sondage dans la galerie G2 de la mine de Mas Bourras. 2 autres dates entre les IVe et le IIIe s. av. J. -C. Elles proviennent chacune de 2 scories du Mas d'Adalt. Il n'y a pas de chevauchement des dates sauf à considérer la calibration des dates à 99,7 % de probabilité. On peut ainsi estimer qu'il existe une métallurgie du fer primaire autour des Ve-IVe s. av. J.-C. dans la vallée de la Lentilla sur la commune actuelle de Baillestavy.

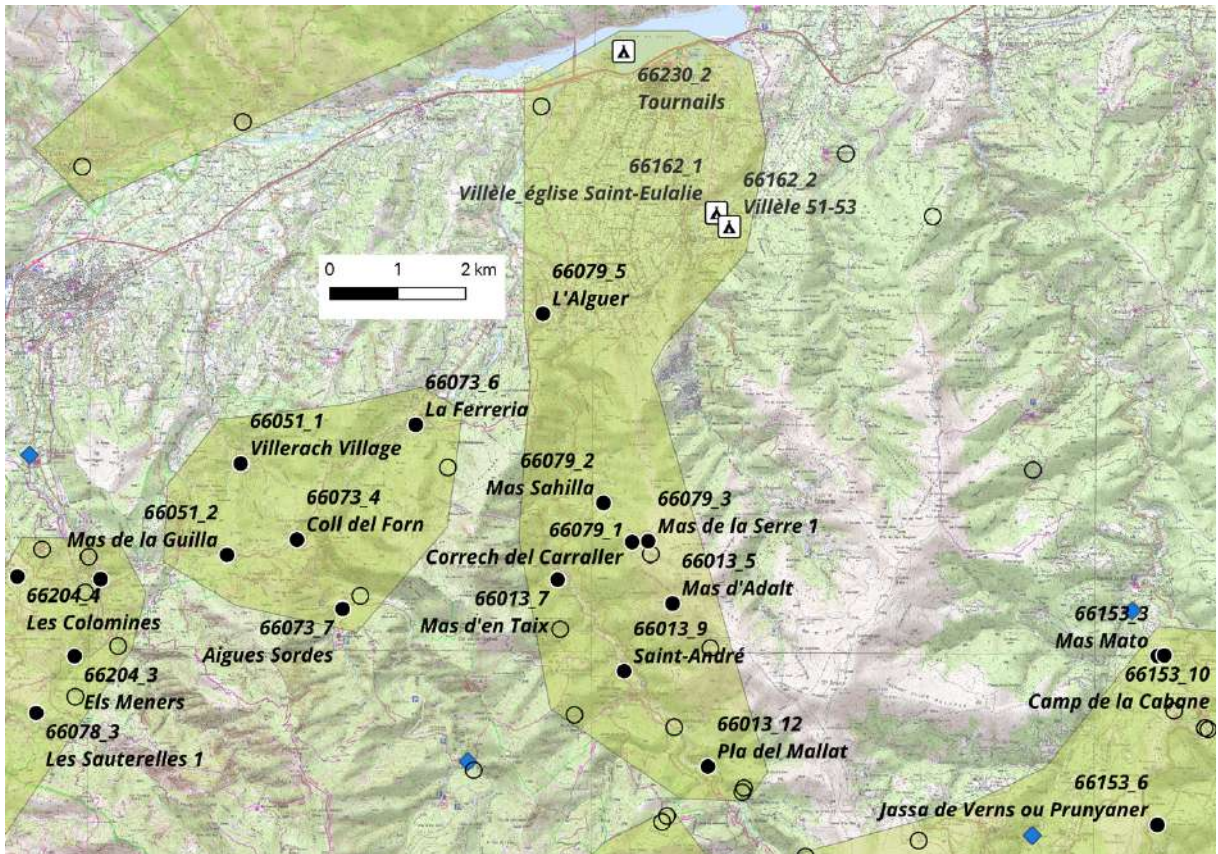
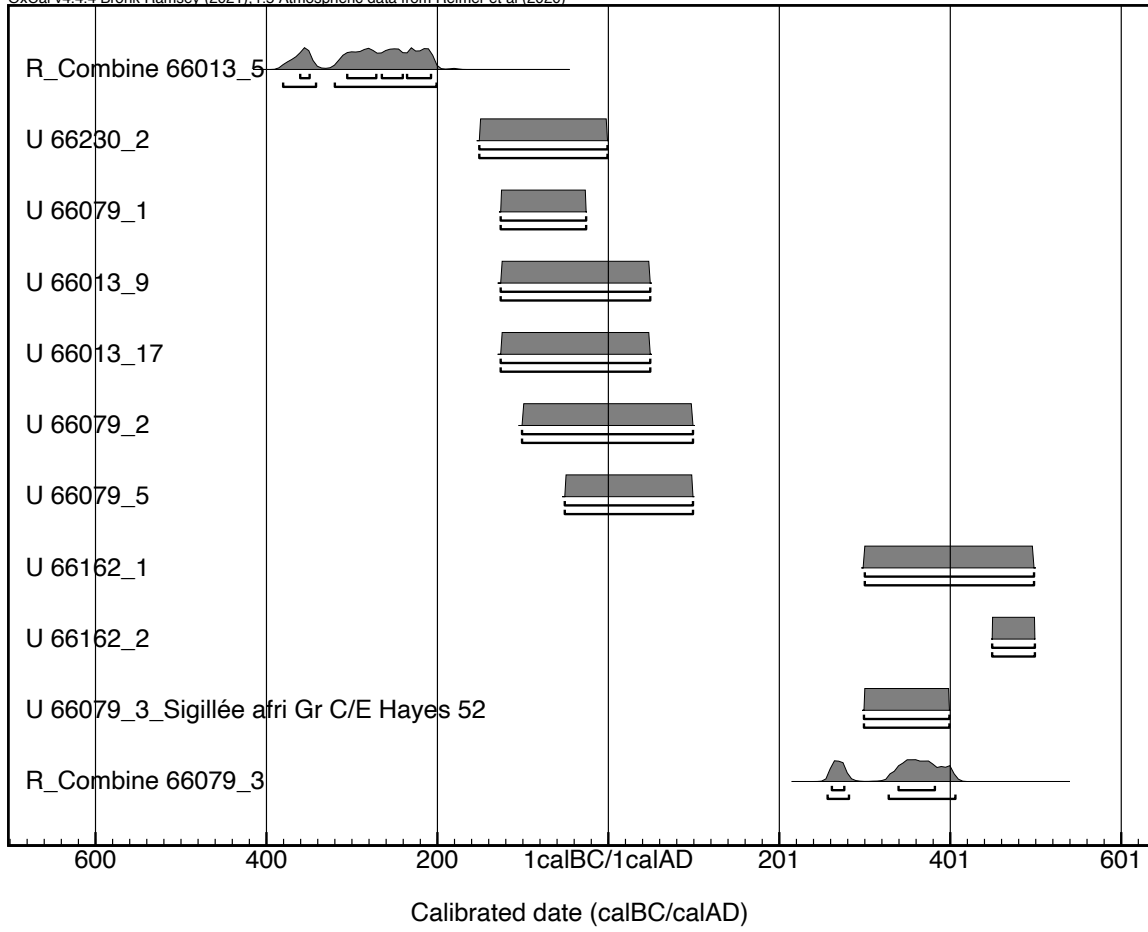
	from 99.7	to 99.7
R_Date 66013 5 CIRAM-9104	-391	-120
R_Date 66013 5 CIRAM-9105	-398	-177
R_Date 66013 5 Lyon-13941(SacA48948)	-758	-400
R_Date MasBourrasGalerieG2(ETH-36403)	-778	-392

```

R_Combine("66013_5"){R_Date("66013_5_CIRAM-9104",2207,29);
R_Date("66013_5_CIRAM-9105",2245,30)};
Date("66230_2",(U(-150,0)));
Date("66079_1",(U(-125,-25)));
Date("66013_9",(U(-125,50)));
Date("66013_17",(U(-125,50)));
Date("66079_2",(U(-100,100)));
Date("66079_5",(U(-50,100)));
Date("66162_1",(U(301,499)));
Date("66162_2",(U(450,500)));
Date("66079_3_Sigillée afri Gr C/E Hayes 52",(U(300,400)));
R_Combine("66079_3")
{
R_Date("66079_3_Lyon-12799 (SacA 44847)",1705,30);
R_Date("66079_3_Lyon-12798 (SacA 44846)",1710,30);
R_Date("66079_3_Lyon-12797 (SacA 44845)",1725,30);
};

```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Combine 66013_5	-361	-208	-381	-202
U 66230_2	-152	-1	-152	-1
U 66079_1	-127	-27	-127	-27
U 66013_9	-127	50	-127	50
U 66013_17	-127	50	-127	50
U 66079_2	-102	100	-102	100
U 66079_5	-52	100	-52	100
U 66162_1	301	499	301	499
U 66162_2	450	500	450	500
U 66079_3_Sigillée afri Gr C/E Hayes 52	300	400	300	400
R_Combine 66079_3	262	383	257	407

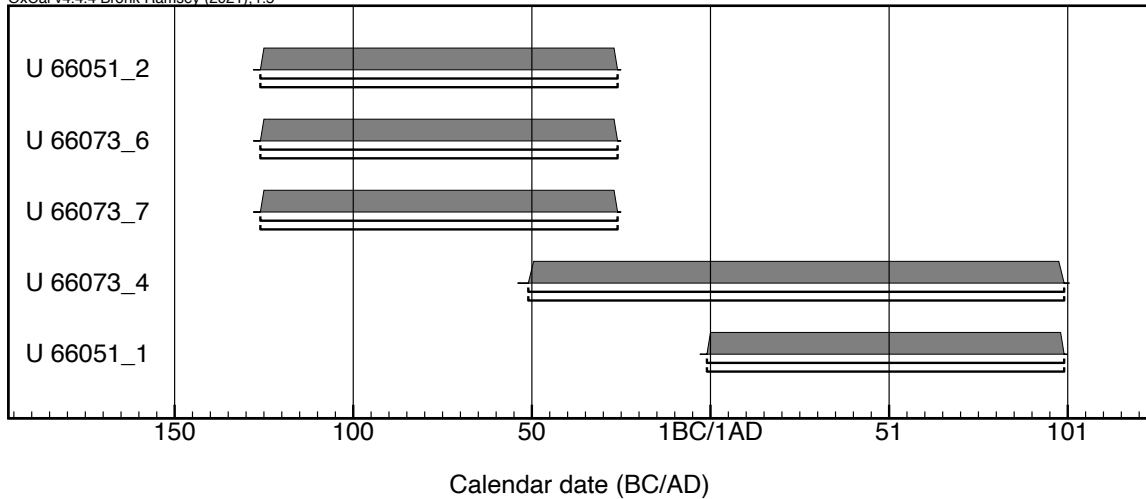


Le secteur du Bas Lentilla est donc une des deux espaces (avec les garrigues nord montpelliéraines à côté du village de Combaillaux-site les Érables) où il existe des vestiges de sidérurgie primaire gauloise dans ce qui est aujourd'hui la région Occitanie. À Baillestavy, dans le secteur du Bas-Lentilla, cette métallurgie gauloise semble se dérouler autour de la charnière entre le Ve et le IVe s. av. J.-C. Elle est mentionnée notamment par le site du Mas d'Adalt 66013\_5. Existe-t-il une continuité ou du moins une pérennité de la sidérurgie primaire entre le monde gaulois et le monde romain dans la zone, cela n'est pas encore établi ? Ce qui apparaît en revanche assez clair c'est la présence d'une métallurgie romaine dès le début - peut-être aussi d'ailleurs juste avant - la création de la transalpine en 125 av. J.-C. Cette métallurgie romaine est massive et très importante. C'est véritablement une industrie. Cette métallurgie romaine dans le bas de la vallée de la Lentilla se concentre spécialement autour de la commune de Baillestavy et périclité entre les années 50 et 100, après environ 200 ans de production que l'on peut qualifier de gigantesque d'après les volumes de scories retrouvées. Cette discussion sur les volumes de fer produit sera précisée dans le prochain triennal du PCR FERAPO entre 2024 et 2026. Durant le Bas-Empire la zone connaît à nouveau une phase de production plus modeste, mais bien réelle. À noter que cette zone sidérurgique est connue pour une pénétration des activités métallurgiques dans l'habitat dans la plaine de la Têt. Cette situation peu commune reste mal cernée et doit être éclaircie dans le prochain triennal du PCR FERAPO entre 2024 et 2026.

## Bas Llech

	from 95.4	to 95.4
U 66051_2	-127	-27
U 66073_6	-127	-27
U 66073_7	-127	-27
U 66073_4	-52	100
U 66051_1	-1	100

OxCal v4.4.4 Bronk Ramsey (2021); r:5



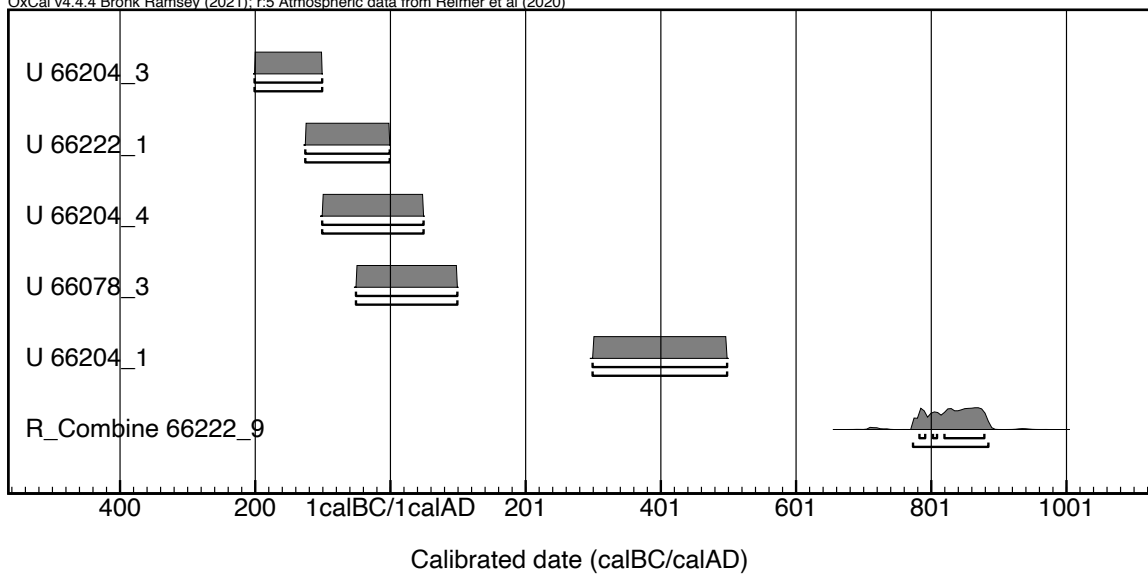
Le secteur du Bas Llech est très proche du secteur du Bas Lentilla. Il suit la même trajectoire pour ce qui est de la période romaine précoce. Les installations métallurgiques semblent spécialement actives durant la République romaine à partir de la création de la Transalpine, mais l'activité périclité ici au tournant du Ier s.

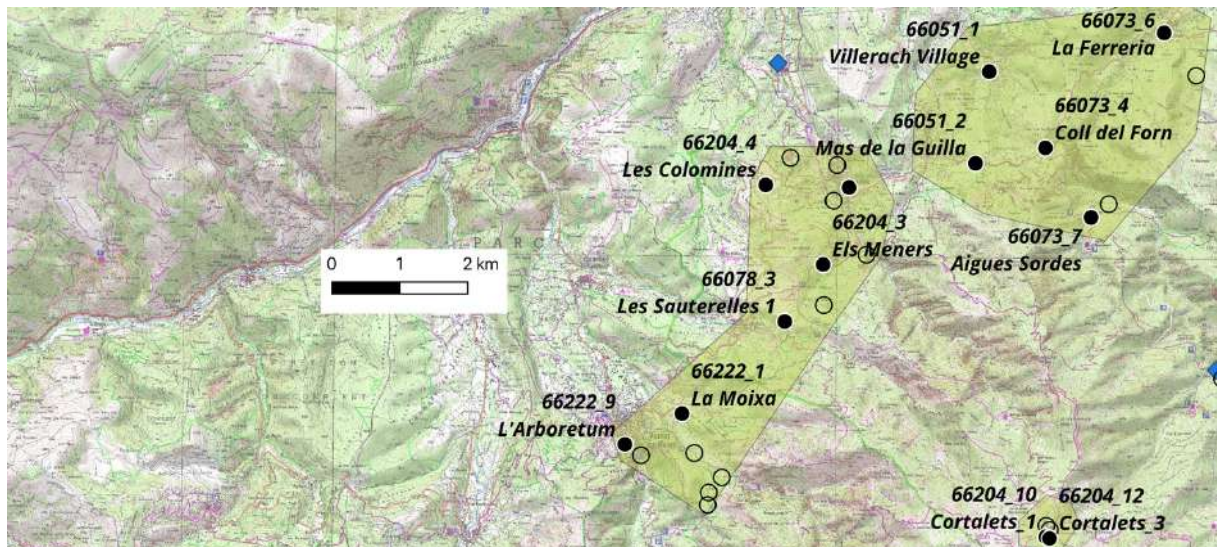
```

Date("66204_3",(U(-200,-100)));
Date("66222_1",(U(-125,0)));
Date("66204_4",(U(-100,50)));
Date("66078_3",(U(-50,100)));
Date("66204_1",(U(300,499)));
R_Combine("66222_9")
{
R_Date("66222_9_CIRAM-9096",1236,30);
R_Date("66222_9_CIRAM-5309",1173,27);
};
    
```

	from_68.3	to_68.3	from_95.4	to_95.4
U 66204_3	-202	-102	-202	-102
U 66222_1	-127	-2	-127	-2
U 66204_4	-102	50	-102	50
U 66078_3	-52	100	-52	100
U 66204_1	300	499	300	499
R_Combine 66222_9	783	879	774	885

OxCal v4.4.4 Bronk Ramsey (2021); r:5 Atmospheric data from Reimer et al (2020)





La zone sidérurgique du Conflent directement à l'ouest de celle du Bas Llech et donc du Bas Lentilla suit un développement chronologique équivalent à ces 2 autres espaces et surtout à celui du Bas Lentilla. En effet l'activité est ici importante durant la République romaine dès 125 avant notre ère. Il existe aussi comme dans le Bas Lentilla des indices qui pourrait suggérer que la sidérurgie extractive est déjà en place au début du II<sup>e</sup> s. av. J. C. dans un contexte gaulois fortement romanisé. Cette question sera traitée dans le prochain triennal du PCR FERAPO (2024-2026). Comme dans le secteur du Bas Lentilla, cette métallurgie romaine périclité au tournant du I<sup>er</sup> s. Comme dans le secteur du Bas Lentilla à nouveau, l'activité reprend un peu au Bas-Empire. À noter qu'une activité carolingienne relativement importante est mise en place à côté de la rivière Cady. À noter que nous sommes ici à proximité de Saint-Michel de Cuxa et de Saint-Martin du Canigou. Faut-il y voir une relation ? Cela devra être discuté également dans le prochain triennal.

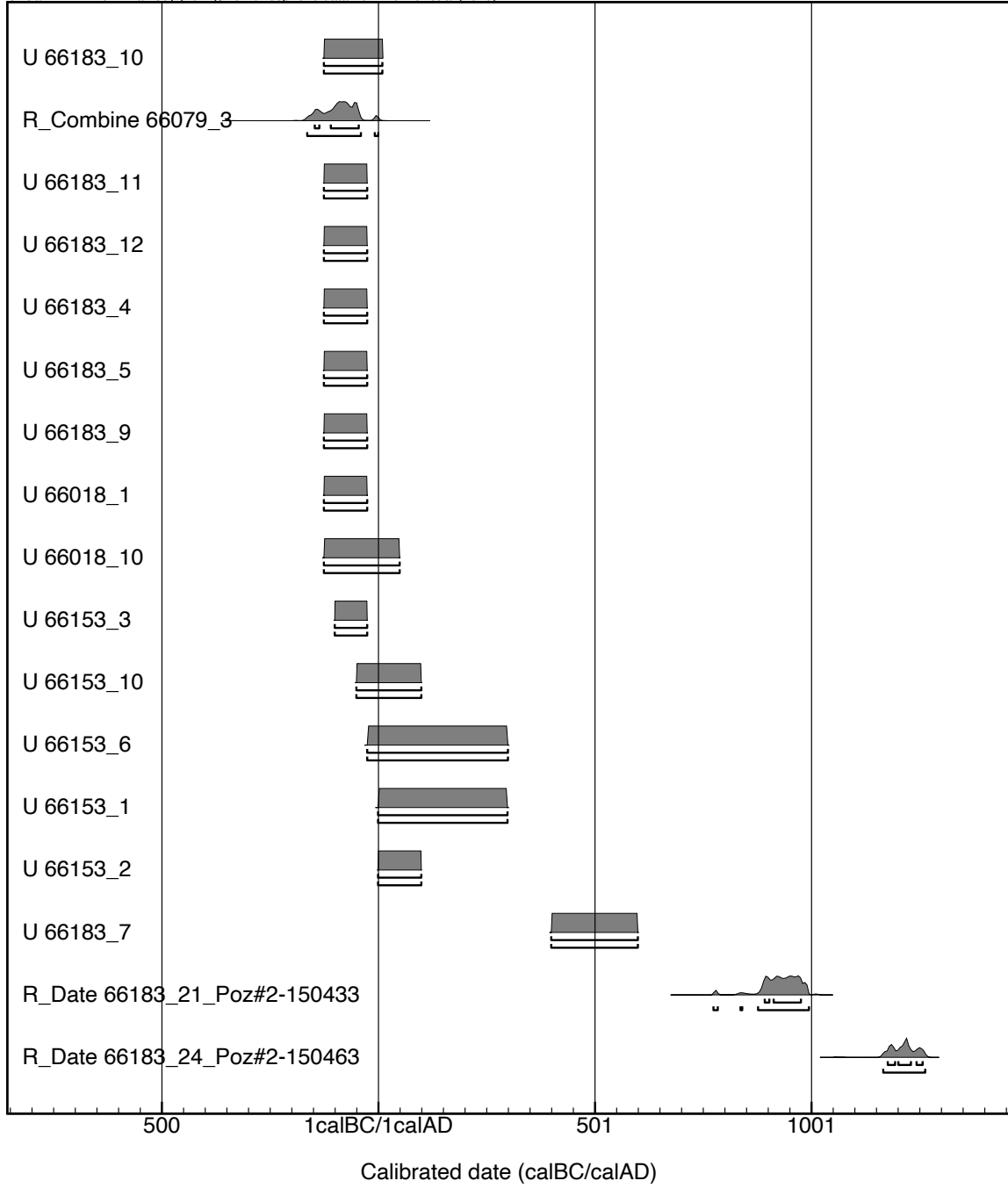
Haut Aspres

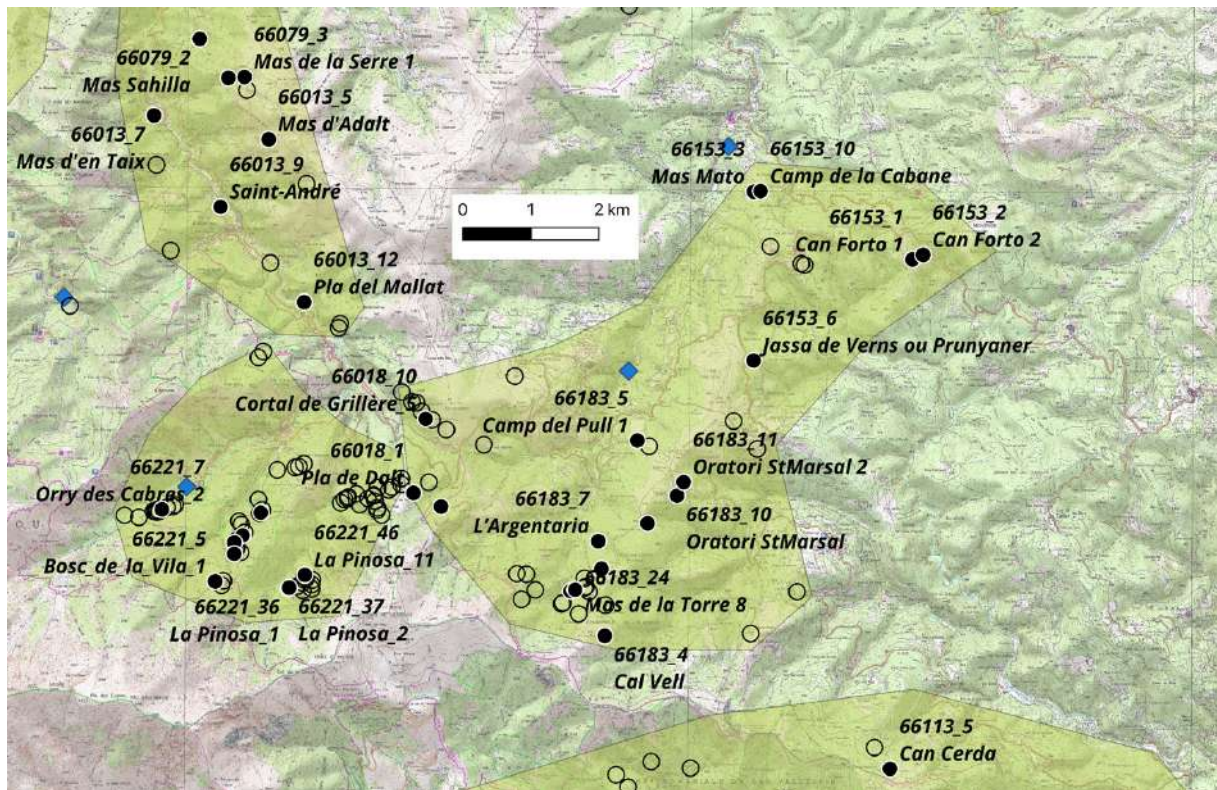
```

Date("66183_10",(U(-125,10)));
R_Combine("66079_3")
{
R_Date("66183_10_Poz#2-150383",2077,29);
R_Date("66183_10_Poz#2-150462",2081,29);
};
Date("66183_11",(U(-125,-25)));
Date("66183_12",(U(-125,-25)));
Date("66183_4",(U(-125,-25)));
Date("66183_5",(U(-125,-25)));
Date("66183_9",(U(-125,-25)));
Date("66018_1",(U(-125,-25)));
Date("66018_10",(U(-125,50)));
Date("66153_3",(U(-100,-25)));
Date("66153_10",(U(-50,100)));
Date("66153_6",(U(-25,300)));
Date("66153_1",(U(0,299)));
Date("66153_2",(U(0,100)));
Date("66183_7",(U(400,600)));
R_Date("66183_21_Poz#2-150433",1123,28);
R_Date("66183_24_Poz#2-150463",840,25);

```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
U 66183 10	-127	10	-127	10
R_Combine 66079 3	-148	-46	-165	-1
U 66183 11	-127	-27	-127	-27
U 66183 12	-127	-27	-127	-27
U 66183 4	-127	-27	-127	-27
U 66183 5	-127	-27	-127	-27
U 66183 9	-127	-27	-127	-27
U 66018 1	-127	-27	-127	-27
U 66018 10	-127	50	-127	50
U 66153 3	-102	-27	-102	-27
U 66153 10	-52	100	-52	100
U 66153 6	-27	300	-27	300
U 66153 1	-1	299	-1	299
U 66153 2	-1	100	-1	100
U 66183 7	400	600	400	600
R Date 66183 21 Poz#2-150433	893	976	774	995
R Date 66183 24 Poz#2-150463	1177	1257	1166	1263

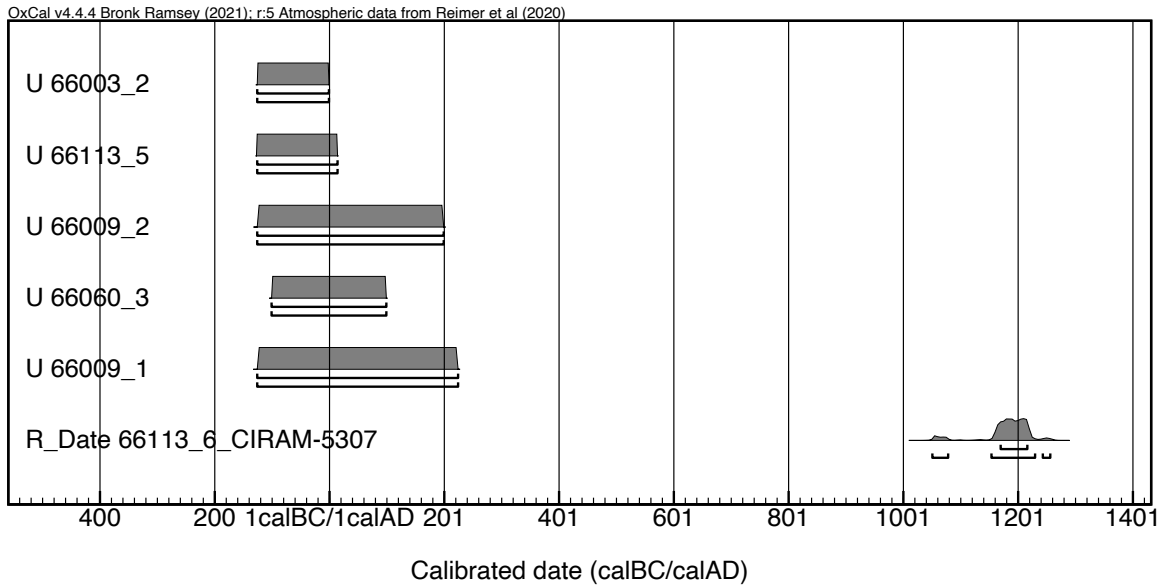




Le secteur du Haut-Aspres est un secteur sidérurgique très important en nombre et en volume de site. Il se situe directement à proximité de la mine de Batère (Corsavy), directement à l'ouest de celle-ci. L'exploitation sidérurgique de la zone se concentre spécialement au cours de la période républicaine depuis la création de la Transalpine en 125 av. J.-C. jusqu'au Ier s. ap. J.-C. Quelques sites semblent résister et perdurent durant le Haut-Empire. Si ce secteur ressemble au secteur de Bas Lentilla, Bas Llech et Conflent, il s'en distingue donc par la persistance d'une métallurgie au Haut-Empire. Des vestiges rares montrent également que la sidérurgie primaire est active dans la zone aux époques wisigothique puis carolingienne et encore au Moyen Âge avant l'utilisation de la force hydraulique qui est également bien attestée dans la zone. Il s'agit donc d'un secteur majeur, notamment pour la période romaine.

```
Date("66003_2",(U(-125,0)));
Date("66113_5",(U(-125,15)));
Date("66009_2",(U(-125,200)));
Date("66060_3",(U(-100,100)));
Date("66009_1",(U(-125,225)));
R_Date("66113_6_CIRAM-5307",867,26);
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
U 66003_2	-127	-27	-127	-27
U 66113_5	-127	15	-127	15
U 66009_2	-127	200	-127	200
U 66060_3	-102	100	-102	100
U 66009_1	-127	225	-127	225
R_Date 66113_6_CIRAM-5307	1170	1217	1051	1257

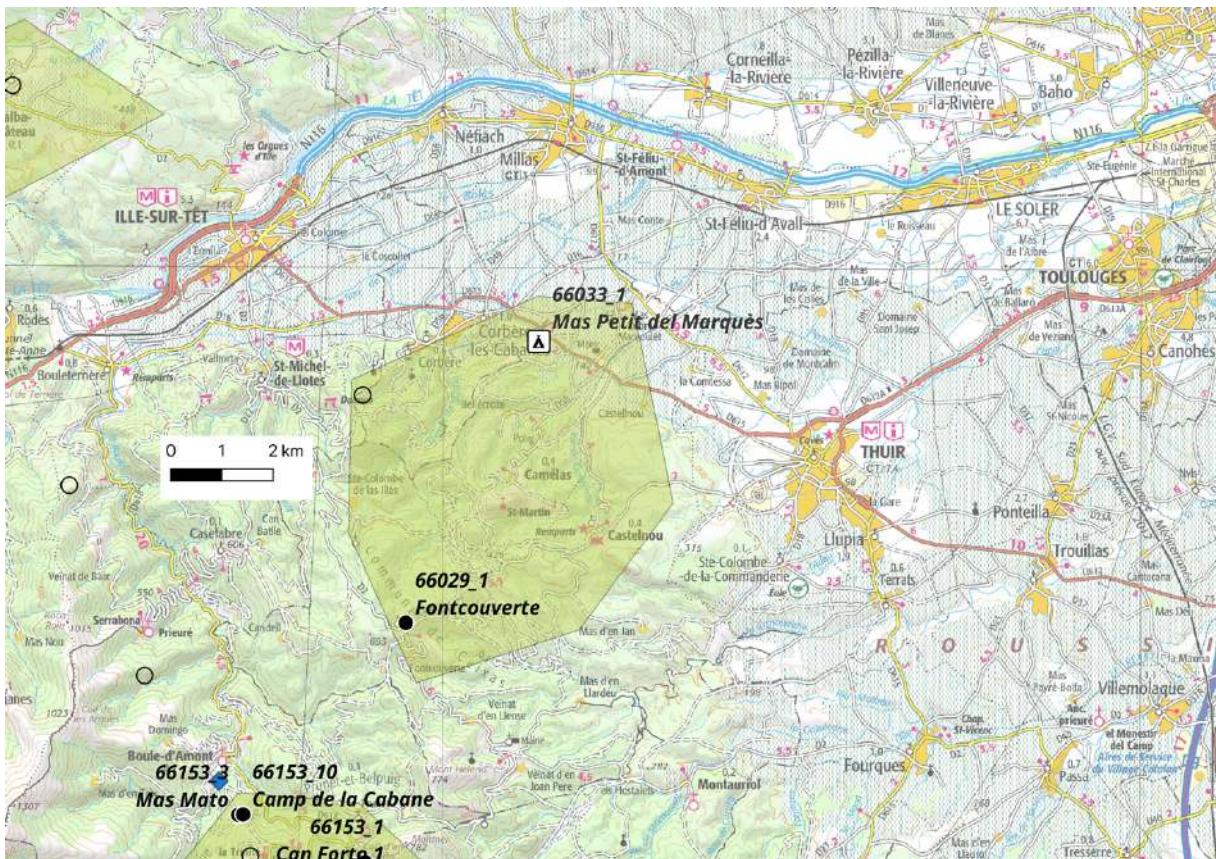
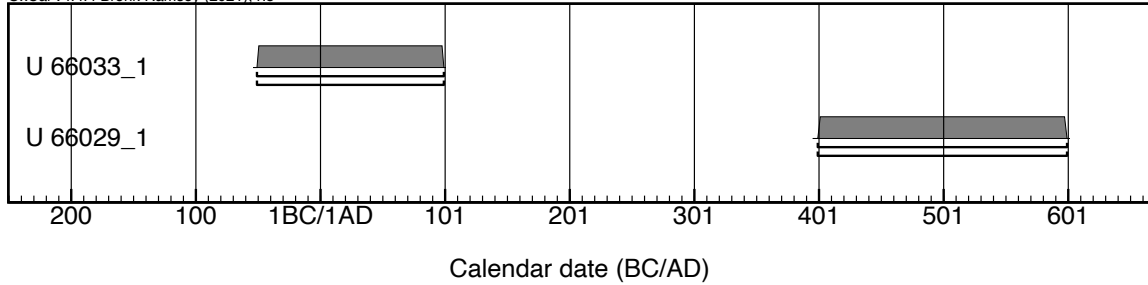




## Bas Aspres

	from 95.4	to 95.4
U 66033 1	-52	100
U 66029 1	400	600

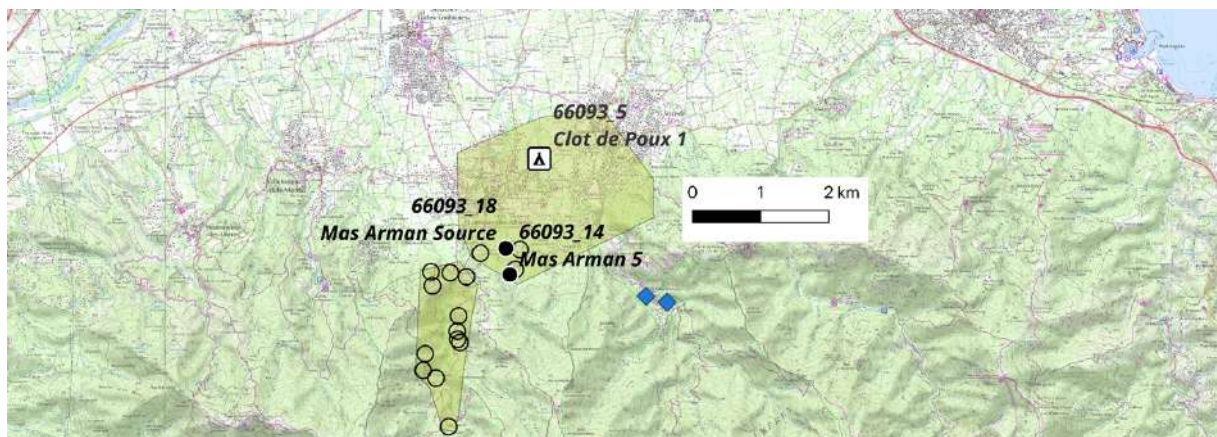
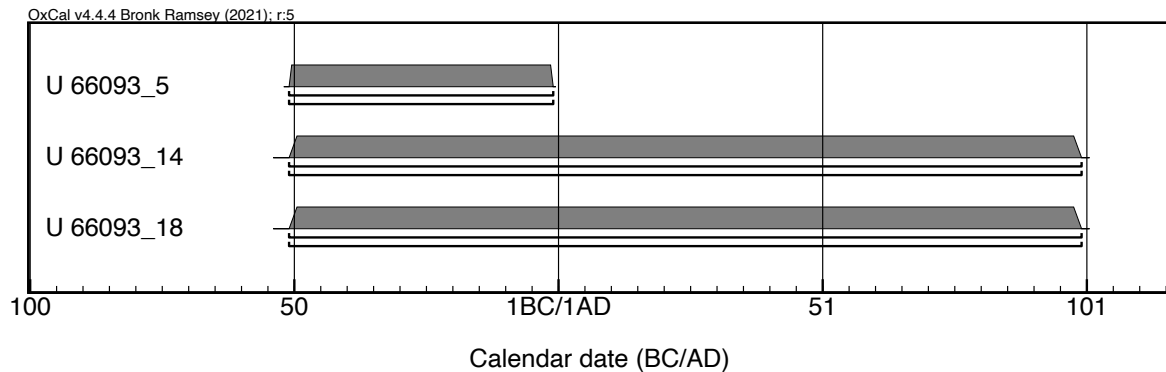
OxCal v4.4.4 Bronk Ramsey (2021); r:5



Le Bas Aspres est un secteur périphérique et peu important qui connaît un développement métallurgique durant la période républicaine comme les autres sites antiques des Pyrénées-Orientales. Cependant, l'activité semble aussi s'y développer à la fin de l'Empire et au début de l'époque wisigothique.

## Albères

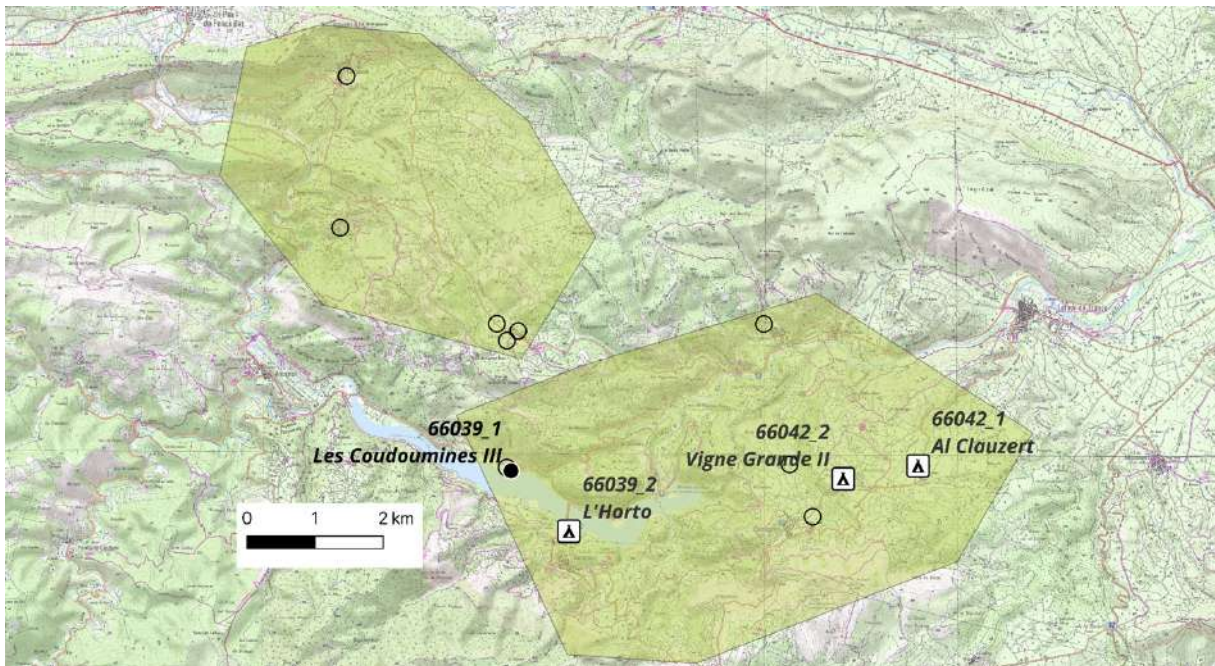
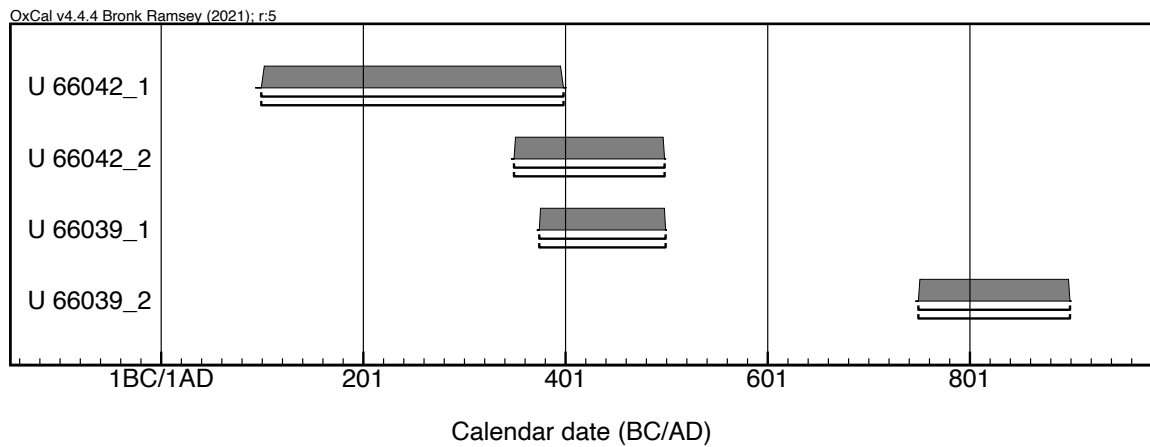
	from 95.4	to 95.4
U 66093_5	-52	-2
U 66093_14	-52	100
U 66093_18	-52	100



Les Albères forme un petit secteur indépendant de ceux localisés dans le massif du Canigou. Il se situe sur le versant septentrional du massif des Albères. L'exploitation antique semble concentrée sur la fin de l'époque républicaine et le début du Haut-Empire. Cependant, de nombreux sites notamment dans la vallée de Laroque sont identifiés. Plus petits, sans matériel céramique, ils sont d'une autre typologie qui témoigne d'une autre phase sidérurgique qu'il faudra impérativement dater au cours du PCRFERAPO 2024-2026

## Agly

	from 95.4	to 95.4
U 66042_1	100	399
U 66042_2	350	499
U 66039_1	375	500
U 66039_2	750	900



L'Agly est un petit secteur métallurgique indépendant au nord du département des Pyrénées-Orientales. Il est connu pour son fonctionnement au Bas-Empire et au tout début de l'époque wisigothique. La métallurgie est ici pratiquement tout le temps intégrée à l'habitat. Cette situation de la métallurgie à proximité de l'habitat se retrouve à l'époque carolingienne. À noter que cette sidérurgie primaire reste de petite envergure et n'atteint pas les dimensions de celles du massif du Canigou ou des Albères.

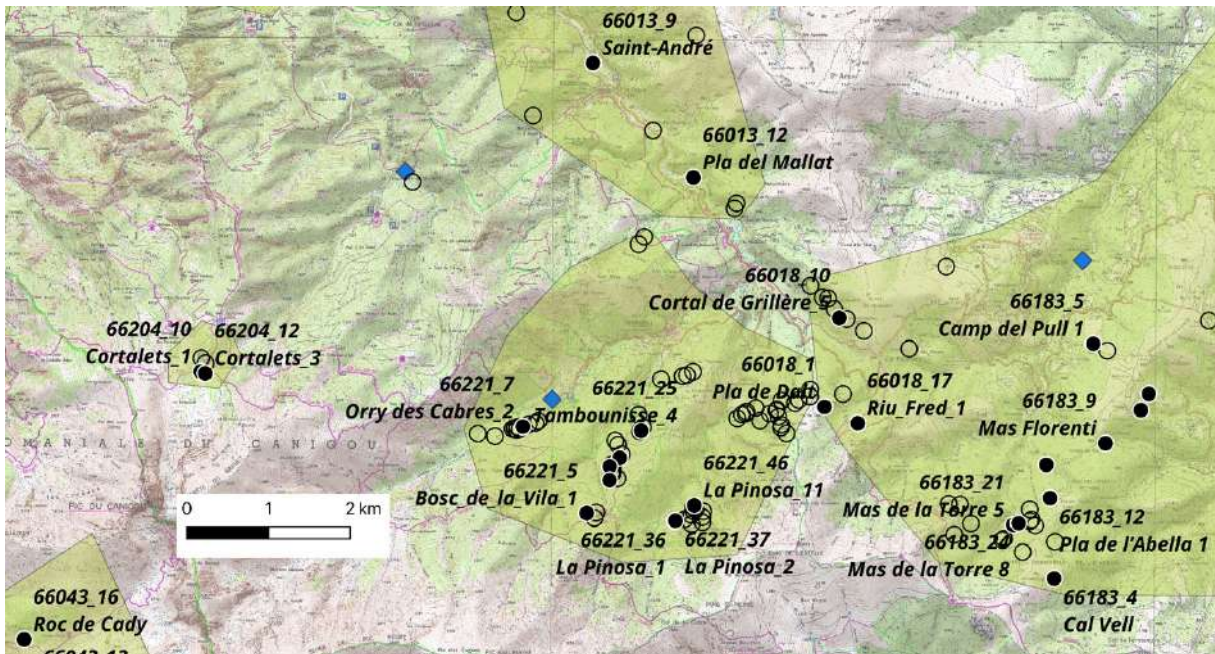
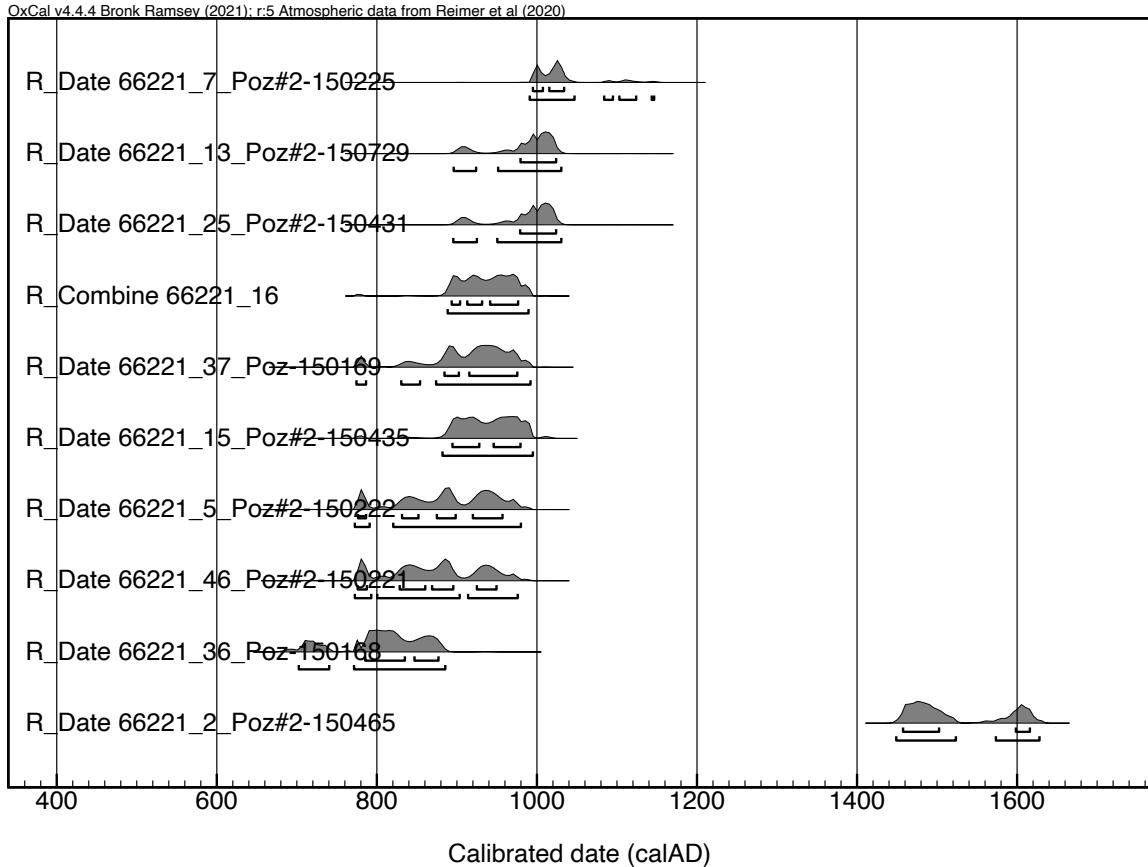
Haut Lentilla

```

R_Date("66221_7_Poz#2-150225",1012,23);
R_Date("66221_13_Poz#2-150729",1057,27);
R_Date("66221_25_Poz#2-150431",1058,27);
R_Combine("66221_16")
{
  R_Date("66221_16_Poz#2-150436",1150,28);
  R_Date("66221_16_Poz#2-150437",1092,28);
};
R_Date("66221_37_Poz-150169",1139,27);
R_Date("66221_15_Poz#2-150435",1114,27);
R_Date("66221_5_Poz#2-150222",1156,28);
R_Date("66221_46_Poz#2-150221",1164,28);
R_Date("66221_36_Poz-150168",1222,25);
R_Date("66221_2_Poz#2-150465",380,24);

```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 66221 7 Poz#2-150225	995	1034	991	1146
R_Date 66221 13 Poz#2-150729	979	1024	896	1030
R_Date 66221 25 Poz#2-150431	979	1024	895	1030
R_Combine 66221 16	893	976	888	989
R_Date 66221 37 Poz-150169	884	975	774	992
R_Date 66221 15 Poz#2-150435	894	979	882	995
R_Date 66221 5 Poz#2-150222	776	957	772	980
R_Date 66221 46 Poz#2-150221	776	949	772	976
R_Date 66221 36 Poz-150168	785	877	702	885
R_Date 66221 2 Poz#2-150465	1457	1616	1449	1628



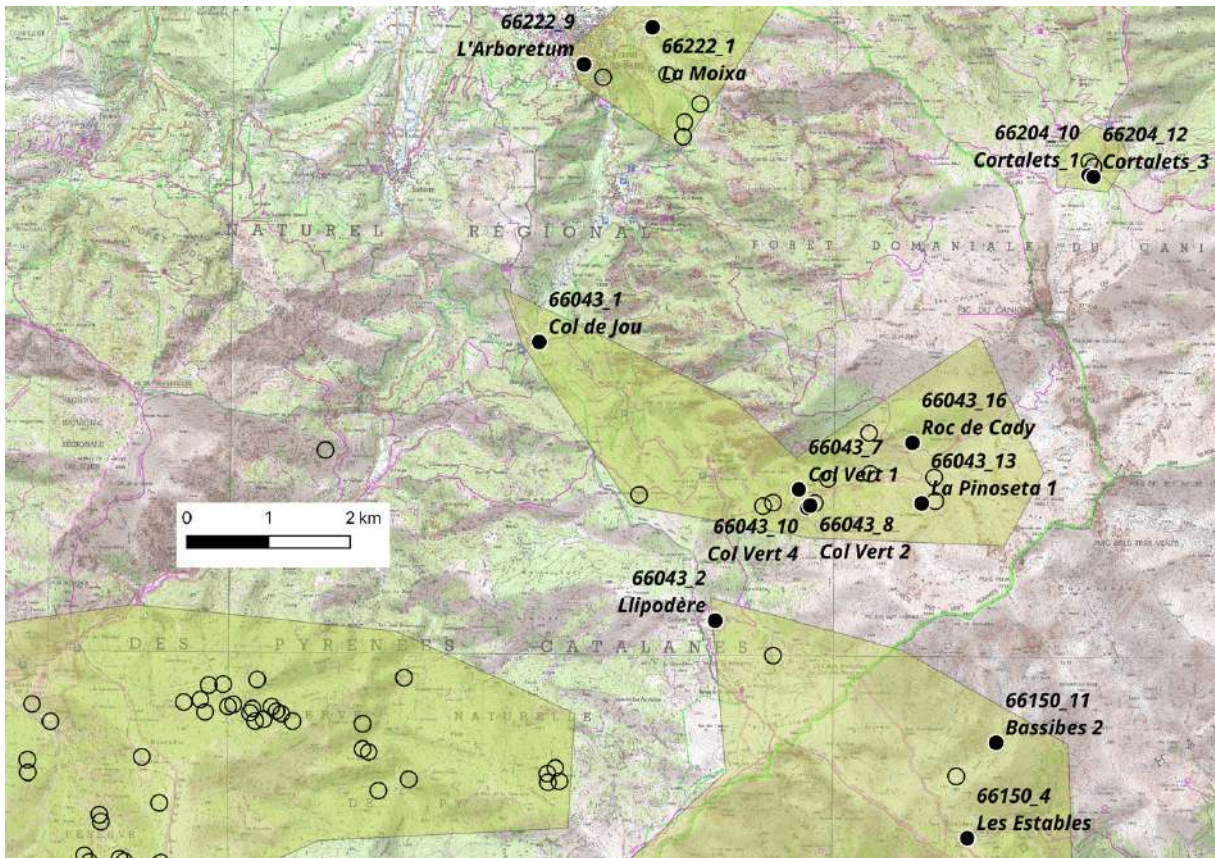
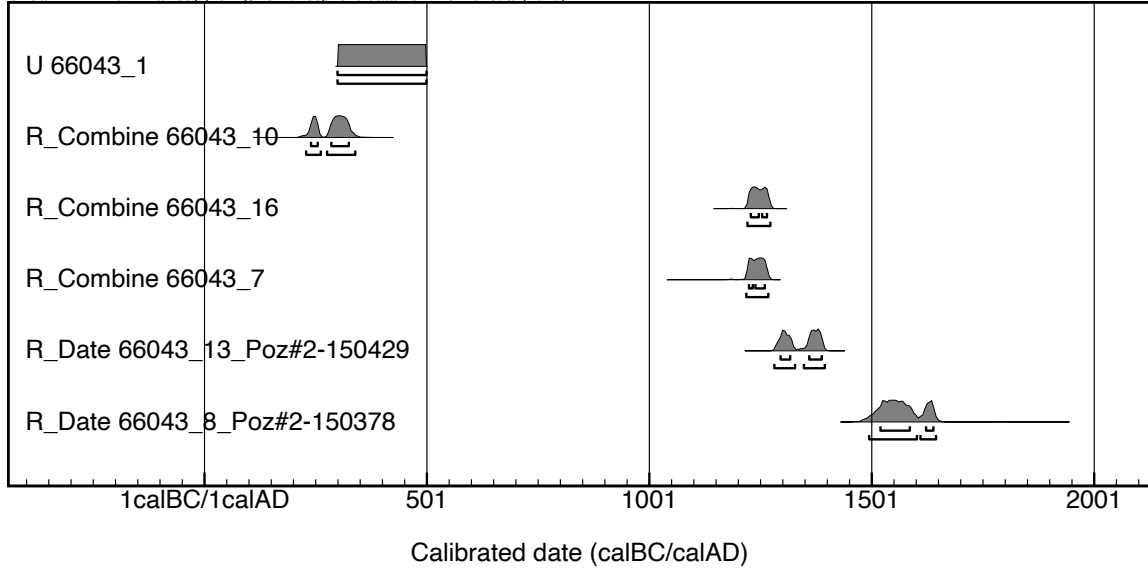
Le secteur Haut Lentilla se trouve au-dessus du secteur Bas Lentilla, dans la même vallée, sur la commune de Valmanya. Il intègre la mine bien connue de la Pinouse qui est le pendant septentrional de la mine de Batère. Ce secteur métallurgique est très homogène. La métallurgie s’y développe de manière massive à l’époque carolingienne. En cela, il se distingue de tous les autres secteurs. La métallurgie hydraulique s’y développe aussi notamment dans le site de La Fargasse Los Masos (66221\_34), traité plus haut à propos des datations C14 sur les

établissements hydrauliques. Une date C14 pourrait montrer la persistance d'une métallurgie directe en bas fourneau à l'époque moderne, mais cette donnée demande à être confirmée. En effet, la zone est couverte de charbonnière probablement moderne qui a pu entraîner des pollutions importantes et par conséquent la mesure de dates C14 remaniées.

*Cady*

```
Date("66043_1",(U(400,600)));
R_Combine("66043_10")
{
R_Date("66043_10_Poz#2-150310",1838,29);
R_Date("66043_10_Poz#2-150464",1727,28);
};
R_Combine("66043_16")
{
R_Date("66043_16_Poz#2-150457",864,27);
R_Date("66043_16_Poz#2-150459",725,27);
};
R_Combine("66043_7")
{
R_Date("66043_7_Poz#2-150307",797,25);
R_Date("66043_7_Poz#2-150308",818,25);
};
R_Date("66043_13_Poz#2-150429",649,27);
R_Date("66043_8_Poz#2-150378",313,26);
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
U 66043 1	300	500	300	500
R Combine 66043 10	240	325	229	340
R Combine 66043 16	1229	1265	1221	1273
R Combine 66043 7	1225	1260	1219	1268
R Date 66043 13 Poz#2-150429	1296	1388	1282	1395
R Date 66043 8 Poz#2-150378	1520	1639	1495	1645

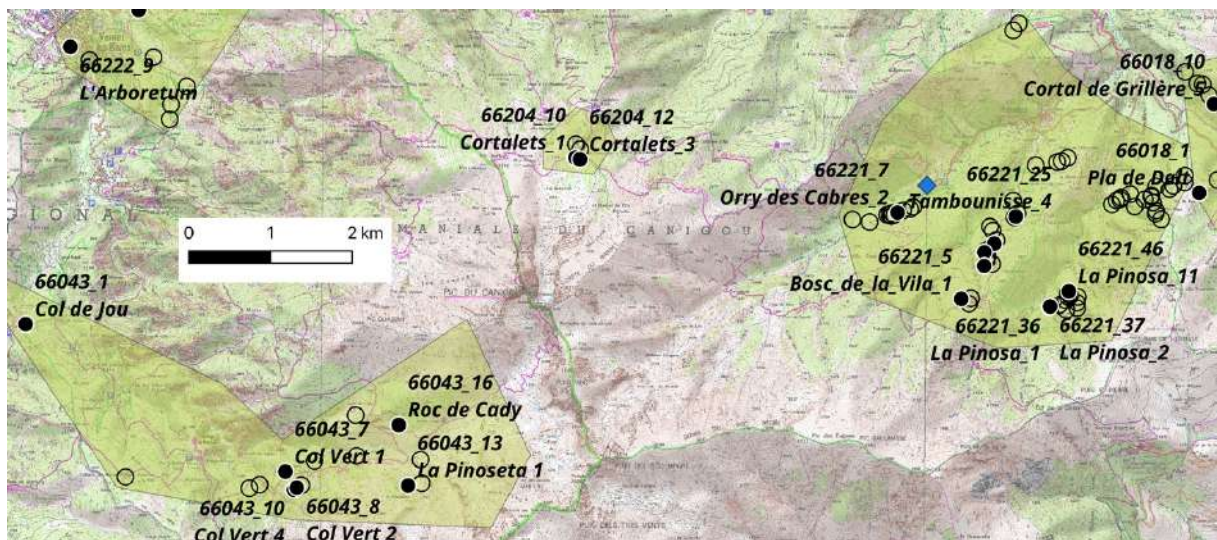
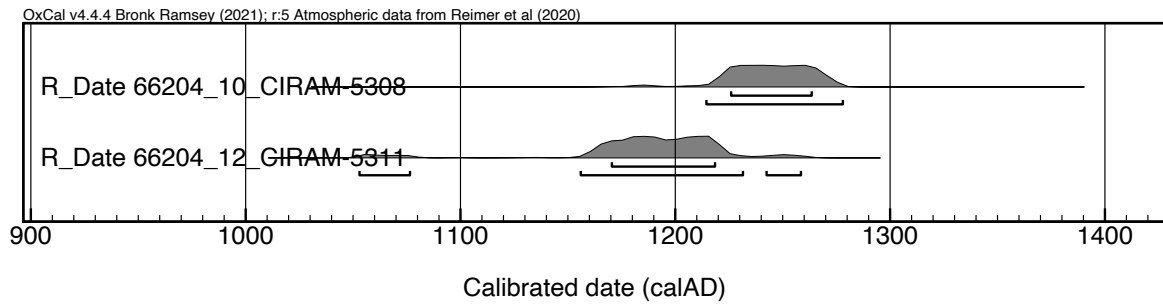


La haute vallée du Cady connaît un développement métallurgique modeste, mais certain qui se cristallise autour de 2 époques : Le Bas-Empire dans une moindre mesure et le Moyen Âge central avant la mise en place de la métallurgie utilisant la force hydraulique. La datation moderne reste à confirmer. Comme dans le Haut Lentilla, ici aussi il existe de nombreuses charbonnières modernes qui ont pu occasionner des pollutions de charbon.

Baltag

```
R_Date("66204_10_CIRAM-5308",800,27);
R_Date("66204_12_CIRAM-5311",863,26);
```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Date 66204 10 CIRAM-5308	1226	1263	1214	1278
R_Date 66204 12 CIRAM-5311	1170	1218	1053	1258



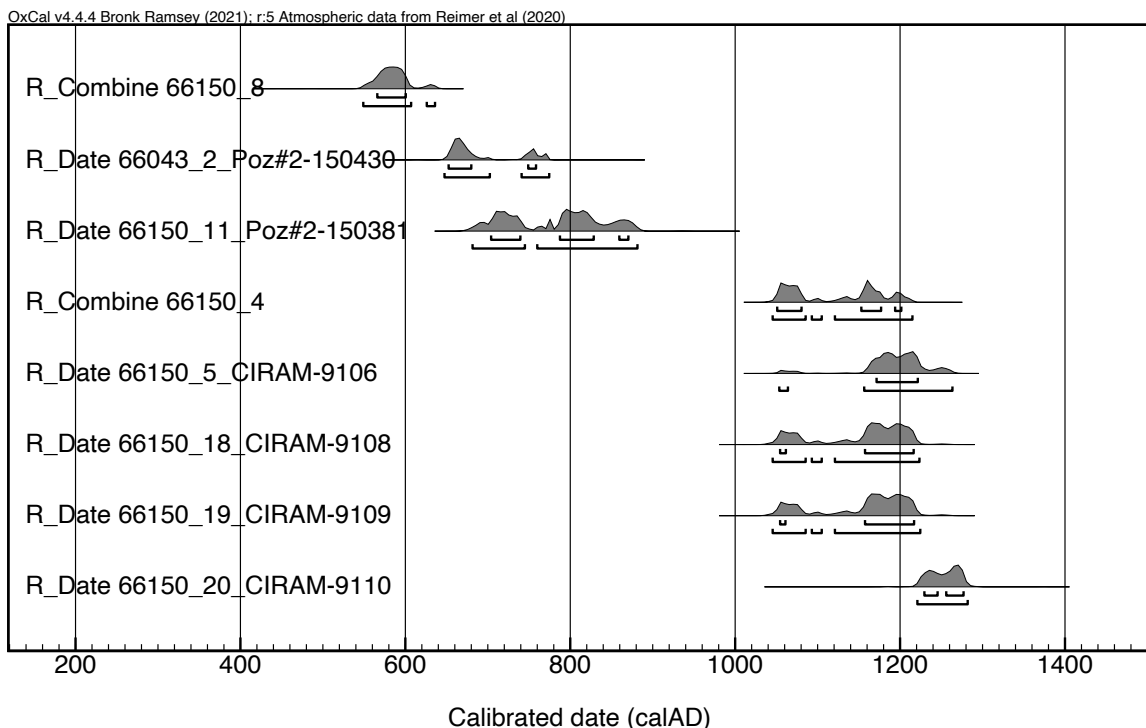
Baltag est un petit secteur relativement homogène qui connaît un fonctionnement resserré dans le Moyen Âge central avant l'utilisation de la force hydraulique, entre les années 1150 et 1250.

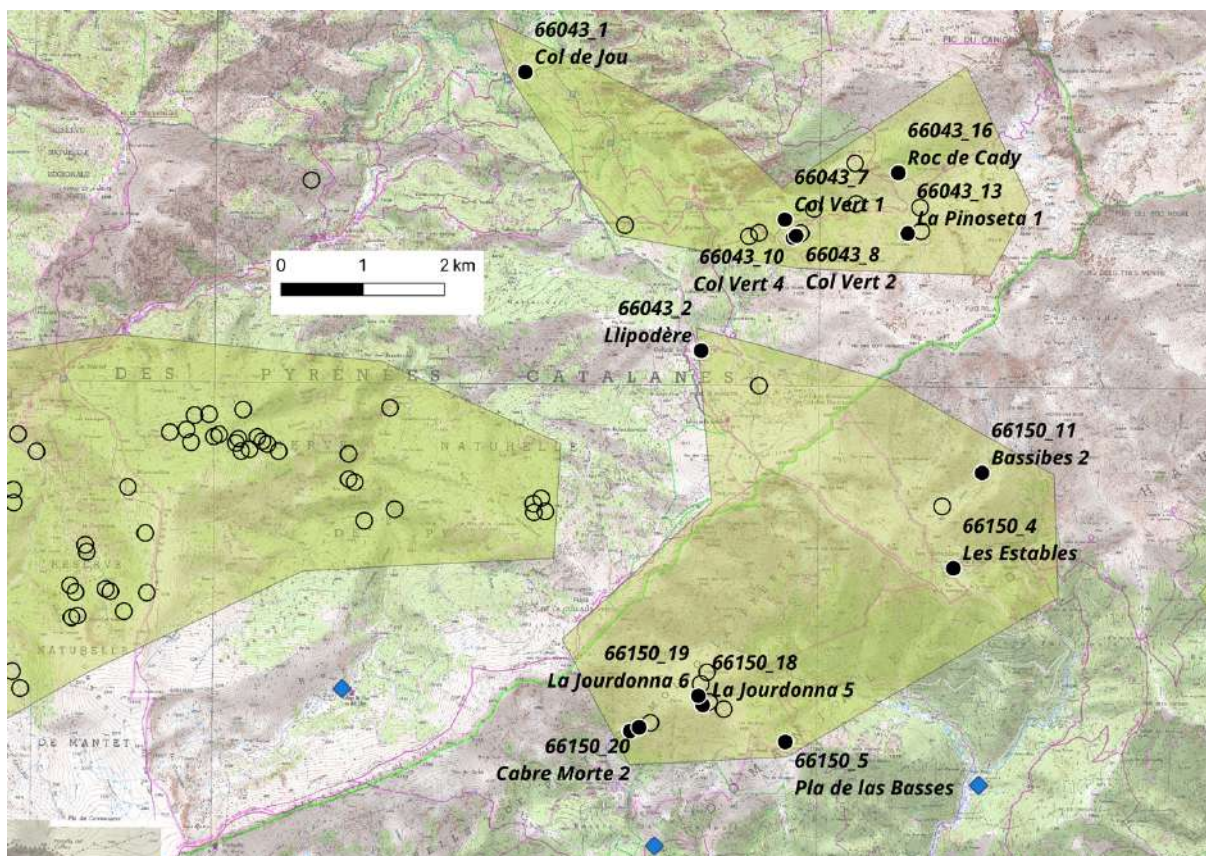
```

R_Combine("66150_8")
{
  R_Date("66150_8_Poz#2-150382",1553,25);
  R_Date("66150_8_Poz#2-150440",1418,28);
};
R_Date("66043_2_Poz#2-150430",1341,25);
R_Date("66150_11_Poz#2-150381",1237,27);
R_Combine("66150_4")
{
  R_Date("66150_4_Lyon-13942 (SacA 48949)",845,30);
  R_Date("66150_4_Lyon-13943 (SacA 48950)",975,30);
  R_Date("66150_4_Lyon-13944 (SacA 48951)",895,30);
};
R_Date("66150_5_CIRAM-9106", 857,28);
R_Date("66150_18_CIRAM-9108", 888,28);
R_Date("66150_19_CIRAM-9109", 886,29);
R_Date("66150_20_CIRAM-9110", 773,30);

```

	from 68.3	to 68.3	from 95.4	to 95.4
R_Combine 66150_8	566	600	549	636
R_Date 66043_2_Poz#2-150430	652	758	647	774
R_Date 66150_11_Poz#2-150381	704	870	681	881
R_Combine 66150_4	1051	1201	1045	1215
R_Date 66150_5_CIRAM-9106	1171	1221	1053	1263
R_Date 66150_18_CIRAM-9108	1054	1216	1045	1223
R_Date 66150_19_CIRAM-9109	1054	1217	1045	1224
R_Date 66150_20_CIRAM-9110	1229	1277	1221	1282





Le secteur du Pla Guillem est un secteur d'altitude qui se développe de part et d'autre de la ligne de crête directement à l'ouest du Canigou et surtout du Pic des Sept Hommes. C'est un secteur qui commence à se mettre en place à la période wisigothique de manière certaine. Cependant, la phase majeure d'occupation métallurgique se place après l'an mille, entre 1050 et les années 1280. La phase métallurgique importante est donc directement antérieure au développement de la métallurgie utilisant la force hydraulique. En cela c'est un secteur remarquable aussi. Il n'y a pas de continuité entre la phase wisigothique et médiévale. La phase carolingienne ne semble pas présente aussi.

## Section IV : Minerai et scorie, synthèse concernant leur composition chimique

### *1. Etat de la documentation chimique en 2023*

Un des objectifs majeurs du PCR FERAPO est d'enrichir les données chimiques de référence relatives à la réduction des minerais de fer dans la partie orientale des Pyrénées. Dans le cadre de précédents travaux de recherche, des analyses chimiques globales de minerais et de scories métallurgiques avaient été entreprises. Une recherche documentaire a donc été menée dans le cadre du PCR afin de réunir une documentation exhaustive. Quatre-vingt-deux analyses avaient d'ores et déjà été publiées. Néanmoins, ces données concernent un nombre très restreint de sites. Seuls la mine du Rancié (22 analyses), les sites de réduction antiques de Lercoul 01 (19 analyses) et de Cimetière 01 (Rivièrevert, 8 analyses), la mouline médiévale de Castel-Minier (Aulus-les-Bains, 28 analyses), ainsi que la forge hydraulique du Najar 01 (Savignac-les-Ormeaux, 5 analyses) bénéficiaient d'une documentation chimique. Ces cinq sites sont localisés dans le département de l'Ariège. Les analyses sur le site de Lercoul 01 ont été réalisées dans le cadre du programme de fouilles mené sur le site par Claude Dubois dans les années 1990, et ont été complétées par de nouvelles analyses réalisées dans le cadre du doctorat de Stéphanie Leroy, dont la thèse a été soutenue en 2010. Ce travail a également été l'occasion d'analyser des minerais collectés sur le site du Rancié, ainsi que des scories prélevées sur le site du Castel-Minier dans le cadre de la fouille programmée menée par Florian Téreygeol. Des scories du Cimetière de Rivièrevert ont également été analysées dans le cadre de ce doctorat. Les analyses concernant le Najar 01 ont été réalisées dans le cadre de l'opération de fouille préventive menée par l'INRAP dans les années 2000 (dir. Laurent Grimbert) (Calmés et Grimbert 2006).

Au vu de l'ampleur du territoire d'étude, et de la diversité géologique des ressources ferrifères, il nous apparaissait essentiel d'initier un ambitieux programme d'analyses chimiques. Ce besoin s'avérait d'autant plus fort que le département des Pyrénées-Orientales n'avait bénéficié d'aucune démarche de ce type auparavant. À ce jour, 222 échantillons de minerai et de scorie de réduction ont été analysés à l'échelle des départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales. À ceux-ci s'ajoutent 20 analyses de scories issues des sites de réduction antique de la Montagne Noire (Aude), sites de production majeurs qu'il nous apparaissait pertinent d'intégrer à notre corpus pour appréhender à terme les réseaux d'échange de fer à l'époque antique dans l'espace languedocien. La base de données constituée comporte ainsi à ce jour 324 analyses globales, parmi lesquelles 117 ont été réalisées sur des minerais, et 200 sur des scories de réduction. À ces analyses s'ajoutent celles réalisées sur 6 échantillons indéterminés, et sur un échantillon de paroi du site de Lercoul 1, issues de la documentation préexistante.

### *2. Protocole de sélection, de prélèvement et d'analyse :*

Devant l'ampleur du corpus de sites repérés dans le cadre des prospections (environ 700 à ce jour), il a été nécessaire d'opérer une sélection en définissant des priorités. Nous avons donc réalisé des prélèvements en priorité sur les sites métallurgiques datés. Nous avons dû par ailleurs opérer un choix concernant le nombre d'échantillons sélectionnés pour chaque site, en nous efforçant de trouver le meilleur compromis entre une approche extensive à l'échelle du territoire étudié, et la possibilité d'évaluer la représentativité des échantillons sélectionnés à l'échelle d'un site donné. Nous avons donc opté pour une base de cinq échantillons de scorie par site sélectionné. Lorsque ces sites ont également livré du minerai pouvant être considéré comme représentatif du minerai réduit dans les structures de réduction, un échantillon a été sélectionné. Pour les sites miniers, dont la plupart ne peuvent malheureusement pas être datés, une sélection de 2 à 3 échantillons a été opérée. La population de sites ayant bénéficié d'analyses en fonction du département et de leur fonction, est donnée par le Tableau 4.

	Ariège	Pyrénées-Orientales	Aude	Total
Site métallurgique	17	12	6	35
Site minier	15	30	0	45
<b>Total</b>	32	42	6	<b>80</b>

Tableau 4 : Nombre de sites concernés par les données chimiques collectées

Nous avons pris soin de collecter, quand cela était possible, des échantillons de minerai et de scorie de réduction sur chaque site visité ou découvert au cours des prospections menées dans le cadre du PCR et du programme FEDER FERMAPYR. Une partie des minerais collectés ont fait l'objet d'une caractérisation minéralogique préalable par diffraction des rayons X au moyen d'un générateur X à anode tournante équipant le Laboratoire Archéomatériaux et Prévision de l'Altération. En ce qui concerne les scories, nous avons pris soin de sélectionner en priorité des individus présentant une morphologie écoulee. Afin d'éviter tout effet de contamination par le milieu d'enfouissement, nous avons procédé à une découpe des échantillons au moyen d'une tronçonneuse de laboratoire adaptée à la découpe de matériaux lithiques. Des cubes d'un volume d'environ 1cm<sup>3</sup> ont été produits à partir du cœur des échantillons. Les échantillons ont ensuite été analysés par le Service d'Analyse des Roches et Minéraux du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG UMR 7358 CNRS-Université de Lorraine), une plateforme analytique qui dispose de très bonnes connaissances sur les résidus de la métallurgie ancienne, du fait d'une étroite collaboration initiée par Alain Ploquin dans les années 1980, et structurée sous la forme du programme PALSID. Le broyage et le micro-broyage (jusqu'à une granulométrie de 80µm) des échantillons sont assurés par le SARM. À l'heure actuelle, les dosages sont effectués au moyen d'un ICP-OES iCap6500 utilisé pour le dosage d'onze éléments majeurs et mineurs (Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Sc) et d'un ICP-MS iCapQ pour le dosage de 43 éléments traces. Les valeurs mesurées sont certifiées, et les limites de détection, ainsi que les incertitudes de mesure en fonction des teneurs sont fournies par la plateforme, ce qui permet d'évaluer la fiabilité des valeurs exploitées.

### 3. Analyse générale

Nous présenterons ici une première synthèse des données chimiques collectées dans le cadre du PCR FERAPO et du FEDER FERMAPYR. Ces données constituent le point de départ d'une démarche visant à livrer à terme une analyse cohérente, contextualisée et interprétée des informations collectées à la fois sur les lieux d'extraction et de traitement des minerais de fer à l'échelle du territoire étendu que constituent les deux départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales. Cette première synthèse sera l'occasion d'apprécier la diversité des signatures chimiques, mais également de livrer des exemples concrets d'application qui illustrent l'apport des données archéométriques à l'étude de l'organisation de l'économie du fer dans ce milieu montagnard. Elle fournira également une base solide pour l'élaboration d'une stratégie visant à enrichir les données de référence pour être à terme en mesure de proposer un référentiel chimique de qualité qui servira à éclairer la circulation des matériaux ferreux dans l'espace languedocien, mais également à plus large échelle (nationale voire internationale).

L'analyse des données sera déclinée en deux parties. Nous décrirons dans un premier temps les données chimiques liées aux sites d'extraction des minerais afin de déterminer dans quelle mesure les signatures chimiques des minerais exploités dans l'espace considéré peuvent être distinguées. Nous décrirons dans un second temps les caractéristiques chimiques des échantillons provenant des sites métallurgiques afin de proposer des ensembles cohérents

pouvant refléter les zones de circulation des différents minerais. Ces ensembles cohérents pourront être exploités pour toute étude de provenance réalisée sur des objets ferreux, et pour lesquels les Pyrénées centrales et orientales peuvent être considérées comme des pourvoyeuses potentielles.

## 6. Les Minerais

### *Les caractéristiques chimiques des minerais analysés pour les sites d'extraction*

Les caractéristiques chimiques de 89 échantillons de minerai analysés ont été comparées afin de décrire la structure des données. Pour cette approche, on se concentrera sur les teneurs des éléments utilisés couramment pour définir la signature chimique d'espaces de production sidérurgiques anciens (Desaulty et al. 2009; Leroy et al. 2012; A. Disser et al. 2016). Il s'agit en majorité d'éléments entrant dans la catégorie géochimique des 'terres rares'. Ces éléments présentent des rayons atomiques proches, et donc des comportements géochimiques similaires. Cette caractéristique est essentielle pour les études de provenance, puisque les rapports élémentaires impliquant ces éléments sont très peu affectés par de potentiels phénomènes de pollution au cours des procédés métallurgiques. Ces rapports restent constants, du minerai utilisé pour produire le métal jusqu'aux scories générées par la réduction de ce minerai. De plus, ces éléments ne doivent pas pouvoir être réduits dans les conditions thermodynamiques dans lesquelles se déroule la réduction du minerai par le biais du procédé direct. Dix-neuf éléments remplissent ces critères, dont les concentrations sont exprimées dans la Figure 14. La signature chimique d'un minerai donné dépend de nombreux facteurs. Il s'agit tout d'abord de la composition chimique du magma à l'origine des roches-mères. Par la suite, ces roches peuvent être amenées à subir des phénomènes de natures très diverses (par exemple, hydrothermalisme, altération météorique, diagénèse). Chacun de ces phénomènes se traduit par des processus physico-chimiques susceptibles de modifier les concentrations relatives des éléments chimiques constitutifs de la roche primaire. La signature chimique des roches ferrifères utilisées comme minerai est donc la conséquence d'une succession particulière de ces phénomènes. Il en découle que les minerais de fer peuvent présenter une signature plus ou moins spécifique.

Dans le cadre du PCR FERAPO, nous n'avons pas effectué d'étude géologique précise des différents contextes miniers mis en évidence. Les catégories représentées ont été définies de manière provisoire, soit en fonction de la reconnaissance de gisements métallifères cohérents (tels que le Rancié), soit en fonction de l'entité géographique au sein desquelles les échantillons ont été collectés. L'analyse de données qui suit repose sur le postulat de départ suivant : les catégories définies a priori sont pertinentes du point de vue des signatures chimiques. On utilisera donc ce critère pour discuter la structure des données. Ces catégories, que l'on sait fondées sur des critères qui n'ont pas de signification géochimique, seront également discutées de manière critique. Elles sont donc amenées à potentiellement évoluer, d'autant plus si on peut être en mesure, à l'avenir, de procéder à une analyse géologique plus fine des sites miniers étudiés. Cette première classification permet toutefois de relever un certain nombre de caractéristiques chimiques intéressantes des minerais analysés. Ces caractéristiques sont exprimées sous la forme d'une série de concentrations, outil de représentation couramment utilisé en géochimie. Les éléments chimiques sont classés en fonction de leur numéro atomique (nombre de protons dans le noyau). Chaque courbe représente l'analyse d'un échantillon de minerai, ligne dont la couleur représente une catégorie telle que décrite précédemment.

Les différences de composition chimique entre les individus sont exprimées en premier lieu par les concentrations ('hauteur' des courbes sur le graphique). En observant les données collectées, on remarque que la plupart des teneurs montrent une amplitude d'un facteur 10 à l'échelle du corpus analysé. Quelques individus semblent toutefois sortir du lot, en montrant des teneurs

relativement élevées pour certains éléments. Il s'agit notamment des trois minerais prélevés dans la vallée de Massat (courbes noires), des minerais prélevés sur les sites de la Tour de Batère 4 (La Bastide, 66) et de Carnissière 2 (Montbolo, 66), ainsi que d'un échantillon provenant du site du Rancié (Val de Sos, 09).

Les différences de composition s'expriment également par les rapports élémentaires qui sont figurés par les pentes des segments de chaque courbe. Cette représentation permet ainsi de mettre en évidence des anomalies de concentration de certains éléments en comparant les formes des courbes. On remarque que la plupart des terres lourdes (ou 'HREE') présentent des profils de concentration très similaires, à l'exception notable de l'euporium. On remarque que les tronçons correspondant à cet élément adoptent des profils très variés. Sur les séries observées, on remarque que d'autres éléments, tels que l'hafnium, le thorium et l'uranium, présentent des variations assez notables. Dans une moindre mesure, le lanthane et le cérium montrent également une dispersion des profils.

De prime abord, ces éléments constitueraient les critères chimiques les plus pertinents pour distinguer les minerais analysés en fonction des catégories établies. Cette variabilité intervient également au sein d'une même catégorie, ce qui reflète en un sens le fait que la signature chimique d'un 'minerai' n'est pas absolument homogène à l'échelle d'un même gisement. L'exemple des individus appartenant à la catégorie 'Rancié' illustre bien ce fait. Ainsi, la possibilité de distinguer les productions sidérurgiques en fonction des catégories définies reposera sur l'importance relative de la dispersion chimique intra-classe par rapport à la dispersion interclasse. En d'autres termes, pour une distinction satisfaisante, il faudrait que les différences chimiques entre les minerais des catégories distinctes soient significativement plus importantes que la dispersion observée entre des minerais identifiés comme appartenant à la même catégorie.

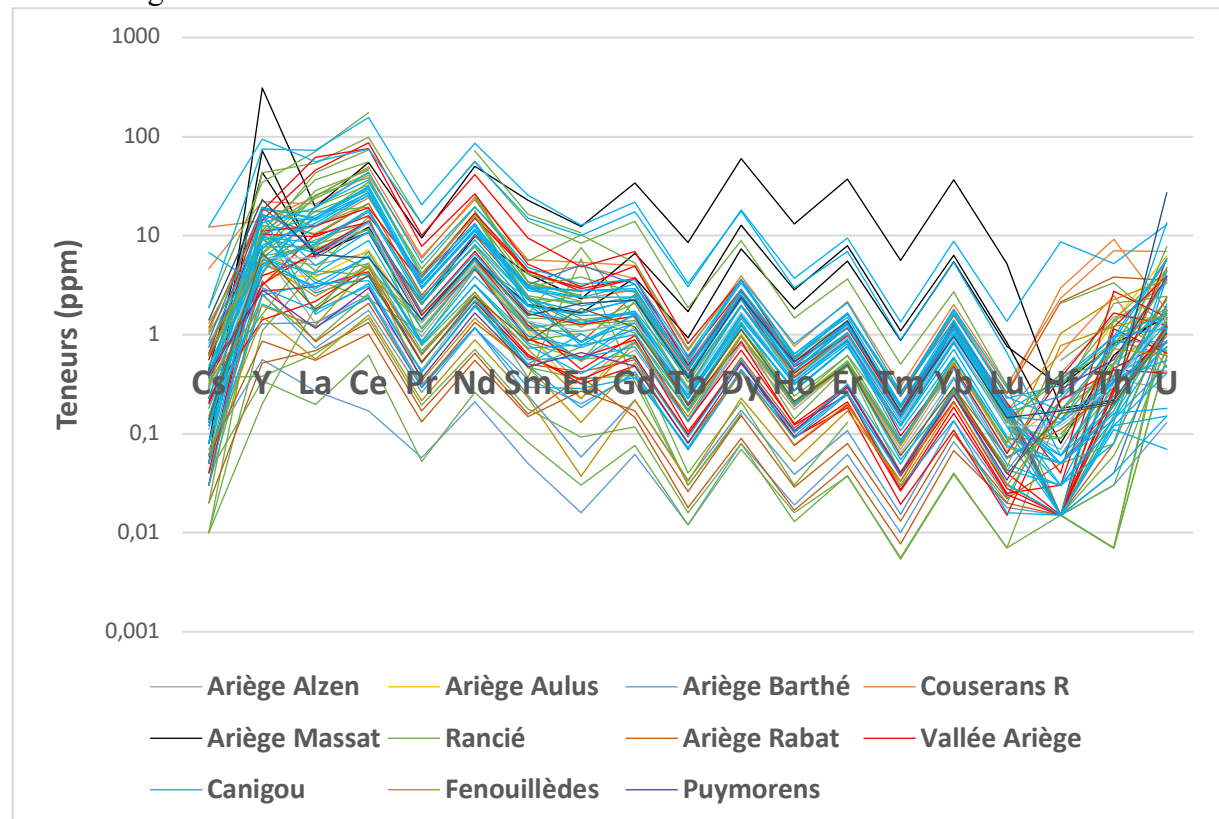


Figure 14 : séries comparées des concentrations des éléments d'intérêt

Cette comparaison sera effectuée en examinant les caractéristiques chimiques par une approche multivariée combinant analyse en composantes principales et classification ascendante

hiérarchique selon la démarche proposée par (Husson, Josse, et Pagès 2010). Les données ont au préalable été transformées par la méthode des log-ratios, afin de s'affranchir notamment de l'amplitude des teneurs absolues qui a été observée auparavant.

#### Analyses statistiques multivariées :

La fouille de données a débuté en prenant en compte l'ensemble des 89 individus examinés précédemment. Cette première étape a rapidement révélé que deux échantillons analysés pour le Rancié (références R5 et R6 dans la thèse de S. Leroy) pouvaient être considérés comme des outliers. L'examen individuel des compositions chimiques, notamment en éléments en majeurs, suggère qu'une erreur d'échantillonnage est à l'origine des différences observées. Il est probable que ces échantillons soient en réalité des fragments d'encaissant, peut-être de la dolomie ferrugineuse. L'analyse a donc été effectuée sur les 87 individus restants, en prenant comme variables les log ratios des éléments suivants : Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Th, U. Si l'on considère les catégories déjà décrites précédemment, et définies en fonction soit des principaux gisements ferrifères, soit des entités géographiques, les résultats du partitionnement des données montrent une structure qui n'est pas interprétable. En effet, les populations des différentes catégories ne sont pas distinguées par l'analyse.

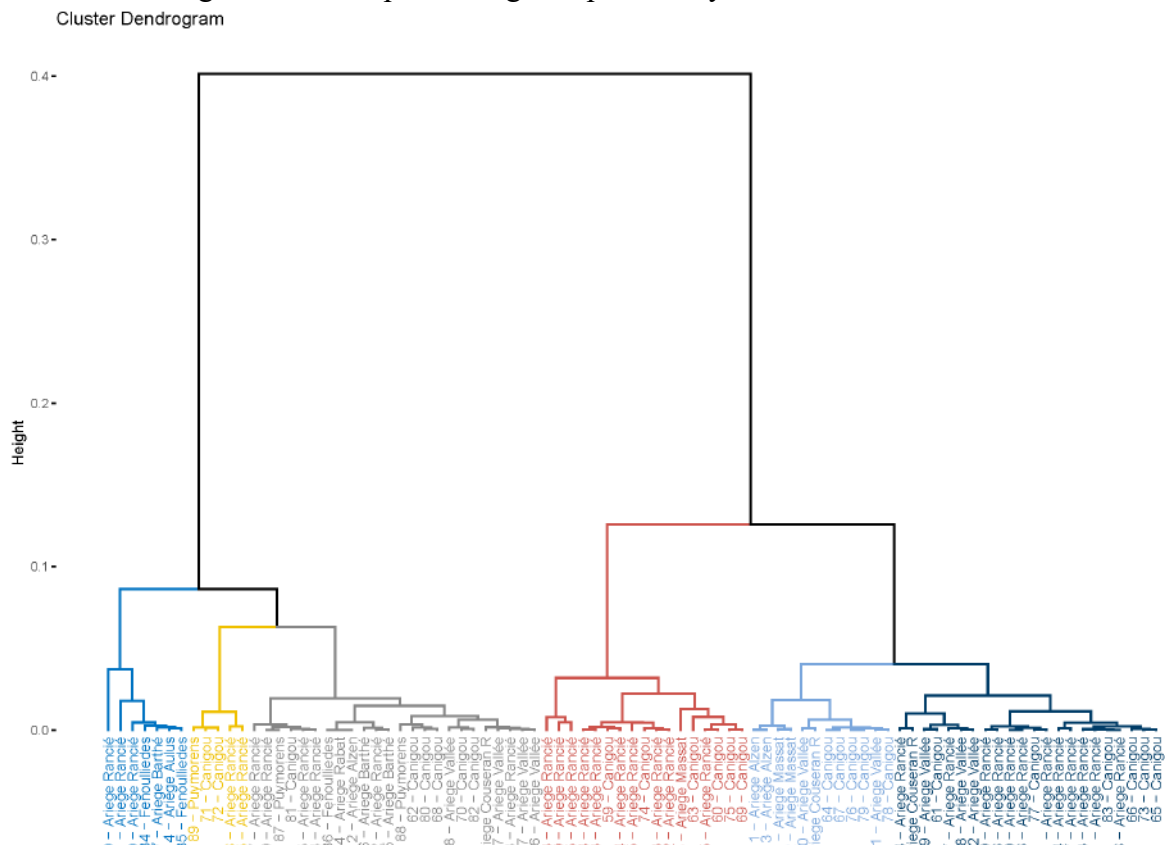


Figure 15 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 87 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Th, U ; facteurs pris en compte PC1 à PC4

En examinant l'influence des variables sur l'analyse, et plus particulièrement sur le premier plan factoriel qui exprime environ 80% de la variance totale, on constate l'influence très forte des log ratios de Th et de U par rapport aux autres variables (Figure 16). Étant donné qu'il a été observé précédemment que les teneurs de ces deux éléments montraient une variabilité importante (Figure 14) au sein des catégories définies, il est probable que leur forte influence sur l'analyse multivariée amoindrisse celle d'autres teneurs qui pourraient potentiellement se révéler pertinentes pour la distinction de ces catégories.

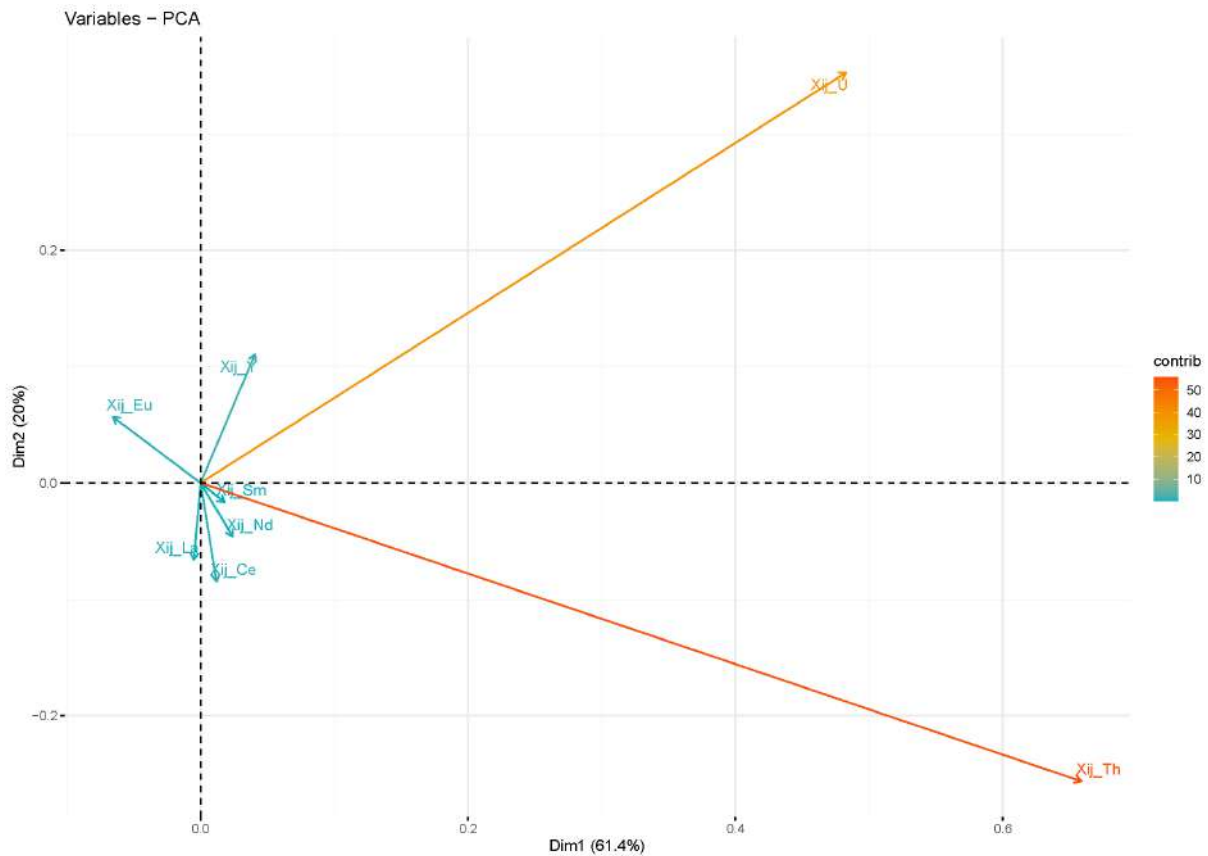


Figure 16 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2 ; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 15

Une nouvelle analyse a donc été effectuée sur la même population, mais en excluant les log ratios de Th et U de l'analyse. Les résultats de cette nouvelle classification révèlent néanmoins une structure de données relativement similaire à la précédente (Figure 17). Cette structure a été interprétée comme la conséquence d'un nombre restreint de variables, qui ne sont potentiellement pas les plus pertinentes pour tenter de distinguer chimiquement les catégories.

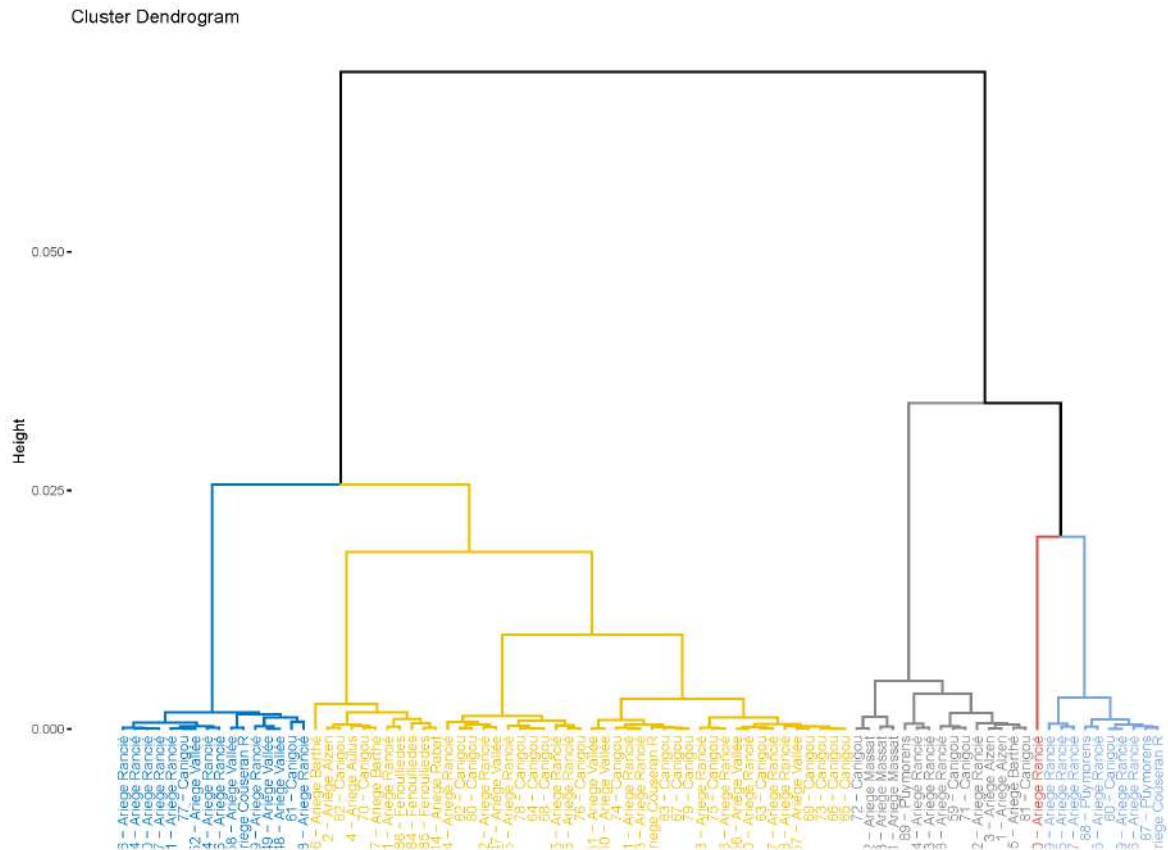


Figure 17 dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 87 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu ; facteurs pris en compte PC1 à PC4

Compte tenu des résultats de cette première approche, mettant en évidence le fait que le nombre et la nature des variables utilisées pouvaient contribuer à ce qu'aucune structure intelligible ne puisse être déduite des données exploitées, il a été décidé d'extraire les analyses réalisées avant les programmes FERAPO et FERMAPYR, car un nombre important de variables pertinentes (les teneurs de Pr, Gd, Dy, Ho, Er, Tm et Lu) n'avaient malheureusement pas été mesurées alors. Ceci réduit la population examinée à 67 individus, et a pour conséquence d'exclure la totalité des minerais qui avaient été analysés pour le site minier du Rancié.

Une nouvelle fouille de données a été effectuée sur cette population réduite, en ajoutant les 7 variables mentionnées dans le paragraphe précédent. Les log ratios associés à Th et U ont été réintégrés afin d'analyser leurs effets compte tenu de la réduction de la population examinée. La contribution des log-ratios associés à Th et U est à nouveau dominante sur le premier plan factoriel (PC1-PC2, exprimant environ 80% de la variance totale de l'analyse) (Figure 18).

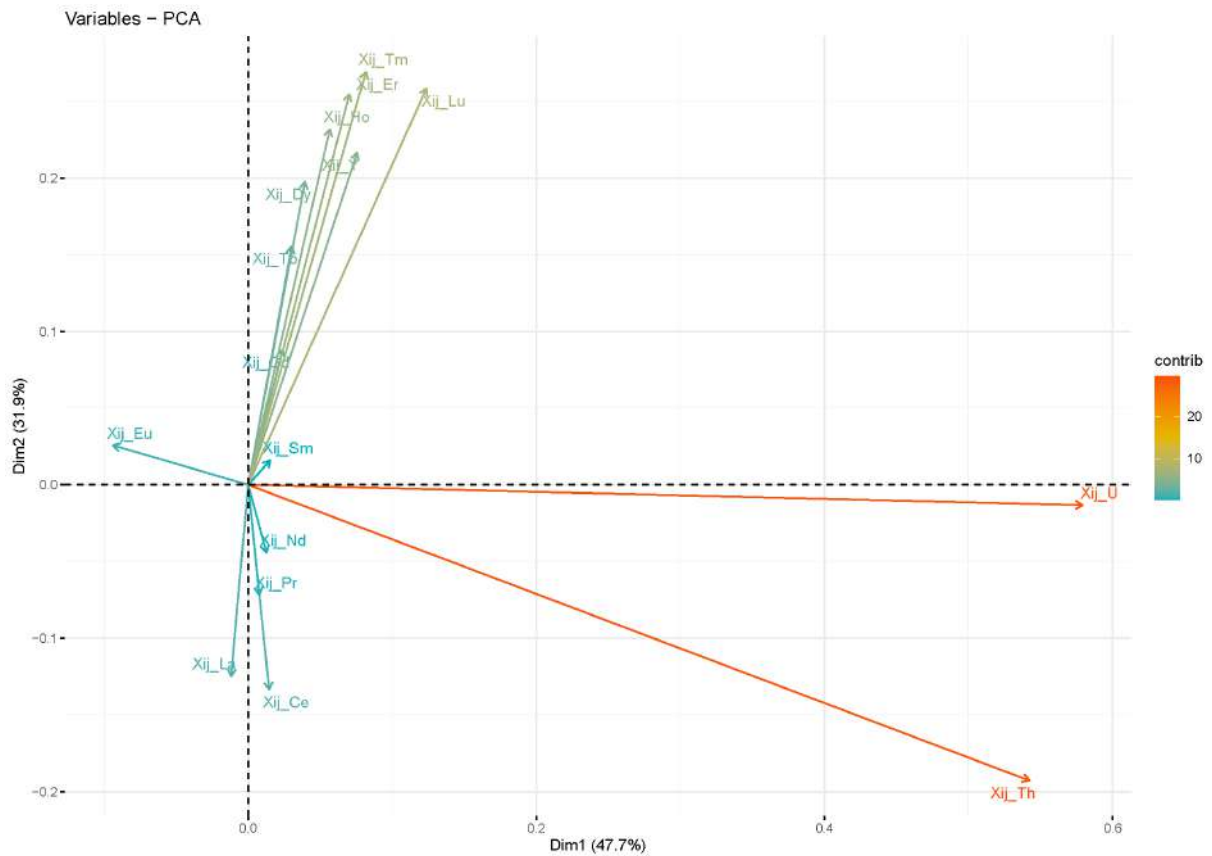


Figure 18 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2, après retrait des individus provenant de la base CHIPS; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 19

Étant donné la structure du dendrogramme exprimant les résultats de la classification réalisée sur les coordonnées des individus dans les plans factoriels, ces deux variables ont été retirées (Figure 19).



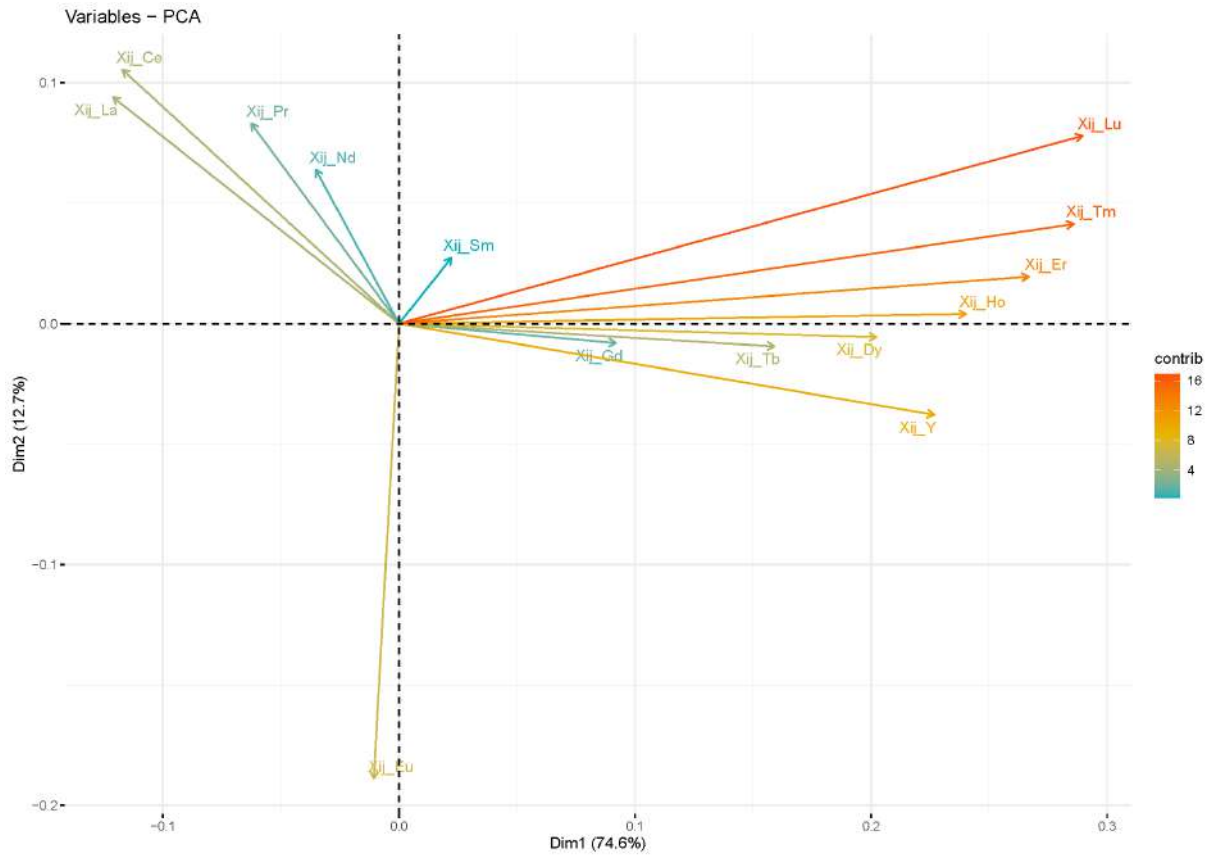


Figure 20 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2, après retrait des individus provenant de la base CHIPS; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 21

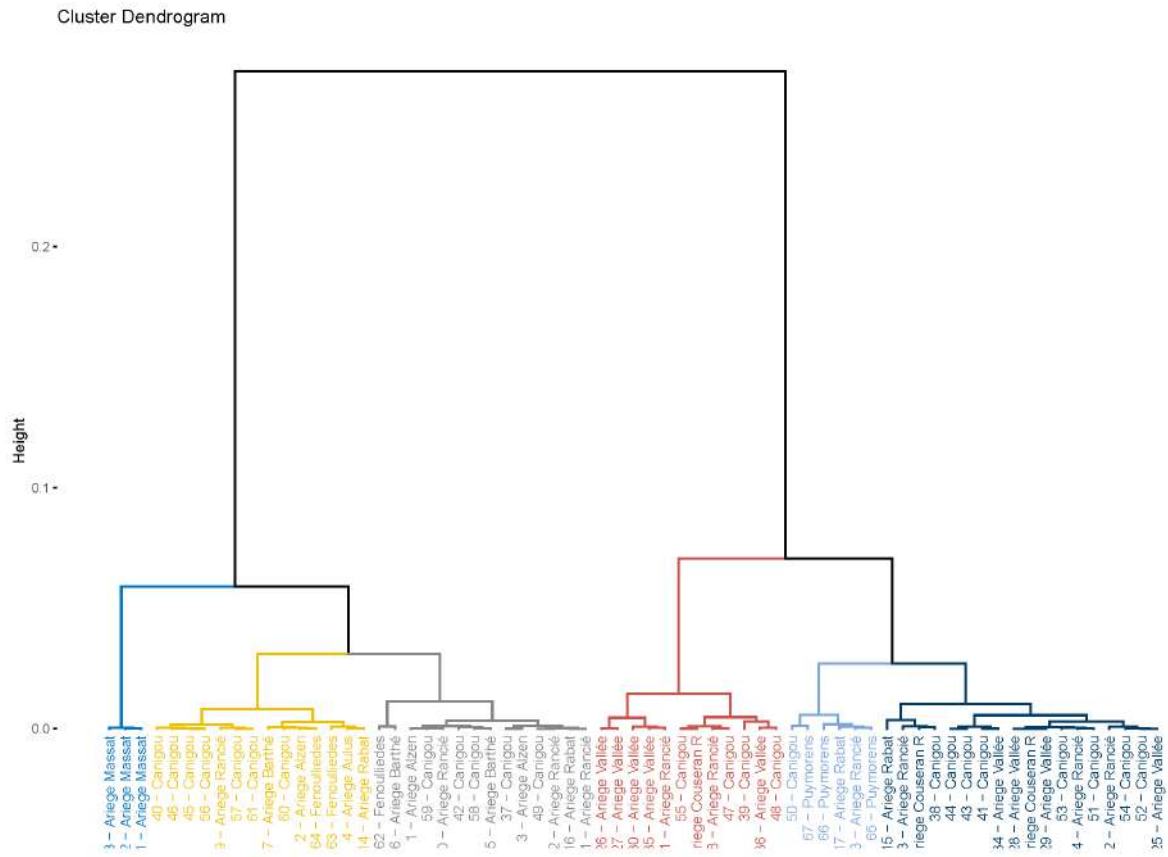


Figure 21 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 67 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Pr, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Er, Lu ; facteurs pris en compte PCI à PC3

Plusieurs remarques s'imposent au terme de cette première démarche. En premier lieu, la plupart des analyses chimiques extraites du référentiel chimique CHIPS, généralement effectuées avant les années 2010, ne comportent pas le dosage de plusieurs éléments chimiques qui pourraient se révéler utiles pour la distinction chimique des minerais de fer. Le gain apporté par la prise en compte de ces éléments est visible lorsque sont comparées les Figure 17 et Figure 21. Néanmoins, ceci suscite une lacune dans le référentiel, puisqu'aucun échantillon de minerai prélevé sur l'exploitation minière du Rancié à proprement parler n'a bénéficié d'analyses chimiques aussi exhaustives que celles effectuées dans le cadre du PCR FERAPO et du FEDER FERMAPYR. D'autre part, certaines catégories telles que 'Canigou' et 'Ariège Rancié' montrent une très grande variabilité chimique, qui peut être due à plusieurs facteurs. En premier lieu, on peut remettre en question les conditions d'échantillonnage sur le terrain. Bien que nous ayons privilégié le prélèvement au sein des haldes<sup>3</sup>, il est délicat de s'assurer que l'échantillonnage soit bien représentatif des minerais qui ont été exploités. On sait d'autre part que la nature des minerais n'est pas homogène à l'échelle d'un gisement. De nombreux phénomènes sont susceptibles d'enrichir ou d'appauvrir les roches ferrifères en éléments chimiques donnés. Des minerais extraits dans la même mine, à quelques mètres ou dizaines de mètres l'un de l'autre sont susceptibles de posséder des signatures chimiques distinctes. Enfin, la catégorisation que nous avons employée dans ce travail de première approche, n'est certainement pas exacte d'un point de vue géochimique. Il s'agissait de disposer d'une première base, mêlant connaissance générale des gisements et topographie de l'est des Pyrénées, qui soit suffisamment facile à se représenter pour effectuer la fouille des données. Pour plus d'exactitude, ces catégories devraient être reprises sur la base d'une expertise gîtologique. Pour conclure sur cette première approche, il semble qu'à l'échelle du territoire observé les signatures chimiques des minerais ne soient pas suffisamment spécifiques pour permettre une distinction aisée des différentes mines ou districts miniers.

#### *La question des minerais manganésifères*

Certains minerais de la moitié orientale des Pyrénées bénéficient d'une réputation particulière, à savoir des caractéristiques particulièrement propices à l'obtention d'« acier naturel ». Rappelons que la réduction des minerais de fer selon le procédé direct permet l'obtention d'une masse métallique souvent très hétérogène du point de vue du taux de carburation. Une même masse peut ainsi contenir à la fois du fer doux (env. 0.02%mass C) et des aciers plus ou moins carburés (généralement jusqu'à 0.8%mass C). La réputation de certains minerais pyrénéens provient du fait que leur réduction fournit des masses métalliques globalement plus carburées. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour plusieurs filières métallurgiques, notamment la production d'outils agricoles tels que les faux, mais également les limes, objets dont la fonction nécessite un acier pour éviter une usure rapide. L'utilisation de matériaux déjà aciérés évite à ces filières une étape supplémentaire consistant à carburer le métal. Certains secteurs pyrénéens, notamment la Barguillière (à l'ouest de Foix), ont d'ailleurs vu la concentration, au cours des époques moderne et contemporaine, d'ateliers produisant ce type

---

<sup>3</sup> Cette stratégie a été adoptée en partant du postulat qu'un tri exhaustif de minerai était impossible. Les composés ferrifères retrouvés dans les haldes ne sont donc pas obligatoirement des matériaux rejetés par les mineurs, tel qu'on pourrait le supposer de prime abord. Une partie de ces composés doit être représentative des minerais qui ont effectivement servi à alimenter les établissements sidérurgiques.

d'objets. Le lien entre l'obtention facilitée d'acier et la présence de manganèse dans les minerais est suggéré par des hommes de l'Art et les savants à partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. L'exemple le plus éloquent nous est fourni par l'étroite collaboration entretenue par Vergniès Bouischère, maître de forge à Vicdessos, et Picot de la Pérouse. Un exemple particulièrement éloquent a été mis en avant par Jean Cantelaube, que nous citons ici : « Le point de départ de sa réflexion est une constatation que lui a rapportée Vergniès Bouischère dans une lettre datée du 27 mars 1780 : ' Un fait historique prouve que le manganèse épure la fonte et sert à la rendre plus riche en acier. Depuis 1766 jusques en 1771, nous avons fait si peu d'acier, qu'à cette dernière époque je n'en trouvai pas à Vicdessos où il y a cinq forges pour aciérer quatre ou cinq pioches. On exploitait alors les belles mines spathiques noires du Tartié [à Rancié]. Je fis percer la montagne, le Tartié s'épuisa ; nous eûmes de riches veines d'hématite abondamment chargées de manganèse ... Ma seule forge, depuis cette époque jusques à ce jour, a fait plus de 800 charges [2400 quintaux] de fer fort ou d'acier excellent'. » (Cantelaube 2005, 271). Ce passage présente un double intérêt : il montre sans ambiguïté que ce maître de forge établissait une relation de causalité entre la présence de manganèse dans le minerai et l'obtention d'acier, mais il révèle également que les gisements ferrifères ne sont pas considérés comme des entités homogènes du point de vue des ressources, mais que différentes qualités de minerai sont présentes, dont certaines sont plus recherchées que d'autres. Picot de la Pérouse a d'ailleurs consacré une partie de son traité à la question du manganèse (Picot de la Peyrouse 1786, 206-20). Le manganèse a par la suite fait l'objet de plusieurs recherches, notamment par des ingénieurs tels que J. François et T. Richard, qui ont cherché à rationaliser, par la théorie ou l'expérience, l'emploi et le rôle du manganèse en métallurgie du fer (François 1843; Richard 1838).

Une attention particulière a donc été portée au manganèse au cours du dernier siècle de la métallurgie directe dans les Pyrénées centrales. Par ailleurs, la réputation des productions sidérurgiques des Pyrénées centrales et orientales a fait l'objet d'une forte promotion tout au long des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles. Ces produits sont cités entre autres par des chimistes et métallurgistes influents tels que Réaumur ou Buffon (Cantelaube 2005, 260), parlant ainsi de « fers de Foix » ou de « fers catalans ». Cette qualification est par la suite employée comme une marque, destinée à justifier le prix élevé des fers pyrénéens face à un marché européen de l'acier de plus en plus concurrentiel, évolution due notamment aux exportations suédoises (Cantelaube 2005, 468). Cette réputation, promue avec conviction par les acteurs économiques de la sidérurgie pyrénéenne, a ainsi pu gommer progressivement la multiplicité des qualités de minerais, telle que perçue et décrite par des praticiens à l'instar de Vergniès Bouischère, en laissant la place à une association de fait entre minerais manganésifères et Pyrénées centrales et orientales. Des travaux récents illustrent bien par ailleurs cette association, en se focalisant uniquement sur les minerais manganésifères (Dubois 2000; Leroy 2010, 81).

Les prospections extensives effectuées dans le cadre du PCR FERAPO ont été l'occasion de mettre en évidence de nombreux sites d'extraction de minerai de fer, dans les déblais desquelles des blocs que nous avons considérés comme du minerai étaient encore présents. Nous sommes conscients des limites que présente ce mode de collecte d'échantillon quant à la représentativité de l'échantillonnage si l'on considère uniquement un gisement donné. Néanmoins, cette collecte offre l'occasion inédite d'enrichir notre perception de la diversité chimique des ressources à l'échelle de l'espace géographique concerné. Nous utiliserons le caractère extensif de la collecte de données (45 sites miniers concernés) pour examiner la distribution des teneurs en manganèse des roches ferrifères exploitées à l'échelle des départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales.

La Figure 22 présente la dispersion des teneurs en manganèse des minerais de fer examinés dans le cadre du PCR, ainsi que des échantillons qui avaient été analysés auparavant dans le cadre d'autres études. La classification a été réalisée à partir des secteurs définis par ailleurs, et

représentés spatialement sur la Figure 23. Cette comparaison montre le caractère généralement manganésifère des minerais à l'échelle des deux départements considérés. Toutefois, ces teneurs montrent une dispersion notable dans certains cas. De plus, certains secteurs présentent des teneurs relativement basses. Les séries statistiques disponibles à l'heure actuelle sont relativement faibles. Néanmoins, plusieurs tendances semblent se dessiner, qu'il faudra confirmer à l'avenir.

Considérons d'abord le cas des deux ensembles les plus exploités, à savoir celui du Rancié et du Canigou. La classe du Rancié comprend les minerais issus d'un bassin métallifère qui s'étend d'ouest en est sur plus de 15km, dans le centre-sud du département de l'Ariège. Il comprend globalement les vallées du Vicdessos, de Siguer, de Miglos et le versant occidental de la vallée d'Aston. La série comprend 35 analyses de minerai, correspondant à 6 exploitations minières distinctes. La dispersion des teneurs confirme bien le caractère fortement manganésifère observé par ailleurs. La gamme de teneurs s'étale principalement de 1% à 4.8%mass (respectivement 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quantiles). Pour le Canigou (n=25 pour 22 sites miniers), les gammes de teneurs observées sont similaires, s'étalant principalement entre 1.7 (Q1) et 3.7%mass (Q3). D'autres secteurs de moindre importance montrent également des teneurs notables en manganèse, tels que la vallée de Massat (3 échantillons analysés provenant de 2 sites miniers), la vallée du Nert (nommé 'Couserans R', 3 échantillons pour 1 mine), et le plateau d'Alzen (3 échantillons pour 1 mine). Dans ces trois cas néanmoins, le nombre de mesures est faible et la tendance devra être confirmée par l'analyse d'autres minerais. Le cas du Puymorens (3 échantillons pour 1 mine) illustre bien la variabilité des teneurs en manganèse pour un même gisement, puisque l'un des échantillons prélevés contient des teneurs importantes en manganèse (env. 5%mass) tandis que les deux autres en sont presque exempts (<0.5%mass Mn). La vallée de l'Ariège ('Ariège Vallée') est représentée par 9 échantillons de minerai provenant de 3 sites miniers distincts. Dans ce cas, aucun échantillon prélevé ne contient de teneurs significatives en manganèse. Il en va de même pour les Fenouillèdes, un secteur minier situé dans le nord des Pyrénées-Orientales (3 échantillons provenant de 2 sites miniers). Enfin, les 3 échantillons de minerai issus de 2 mines localisées dans le massif du Saint-Barthélémy (Ariège) sont également dépourvus de manganèse.

Cette nouvelle collecte de données chimiques, qui bénéficie du caractère extensif des prospections menées à l'échelle des deux départements offre l'opportunité de rediscuter le caractère spécifique de l'élément manganèse en termes de marqueur chimique pour l'est du massif pyrénéen. Les 89 analyses chimiques exploitées montrent que le manganèse est globalement bien présent dans les minerais qui ont été exploités dans les secteurs miniers du Rancié et du Canigou. Cette discussion enrichit toutefois de manière sensible notre perception de cet élément comme 'traceur' pour des secteurs miniers de moindre ampleur. Trois secteurs, ceux de la vallée du Nert, du plateau d'Alzen et de la vallée de Massat sont, à l'échelle des données disponibles, marqués par la présence de phosphore. Pour quatre autres secteurs, les Fenouillèdes, la haute vallée de l'Ariège, le massif du Saint-Barthélémy et l'ensemble Saurat-Rabat, le manganèse n'est à l'heure actuelle pas détecté de manière significative dans les minerais reconnus. Il découle de ces observations que, si le manganèse reste un élément fréquemment présent dans les minerais de fer exploités par le passé dans les Pyrénées centrales et orientales, cette présence n'est pas systématique. Il en découle que, lorsque l'on considère cette information dans la perspective d'études de provenance d'objets en fer, l'absence de manganèse dans la signature chimique des objets ne permet pas de disqualifier ces espaces géographiques comme des sources potentielles de métal. Ceci renforce la nécessité de considérer les terres rares pour définir les signatures chimiques des espaces sidérurgiques, approche qui est développée par ailleurs dans ce rapport.

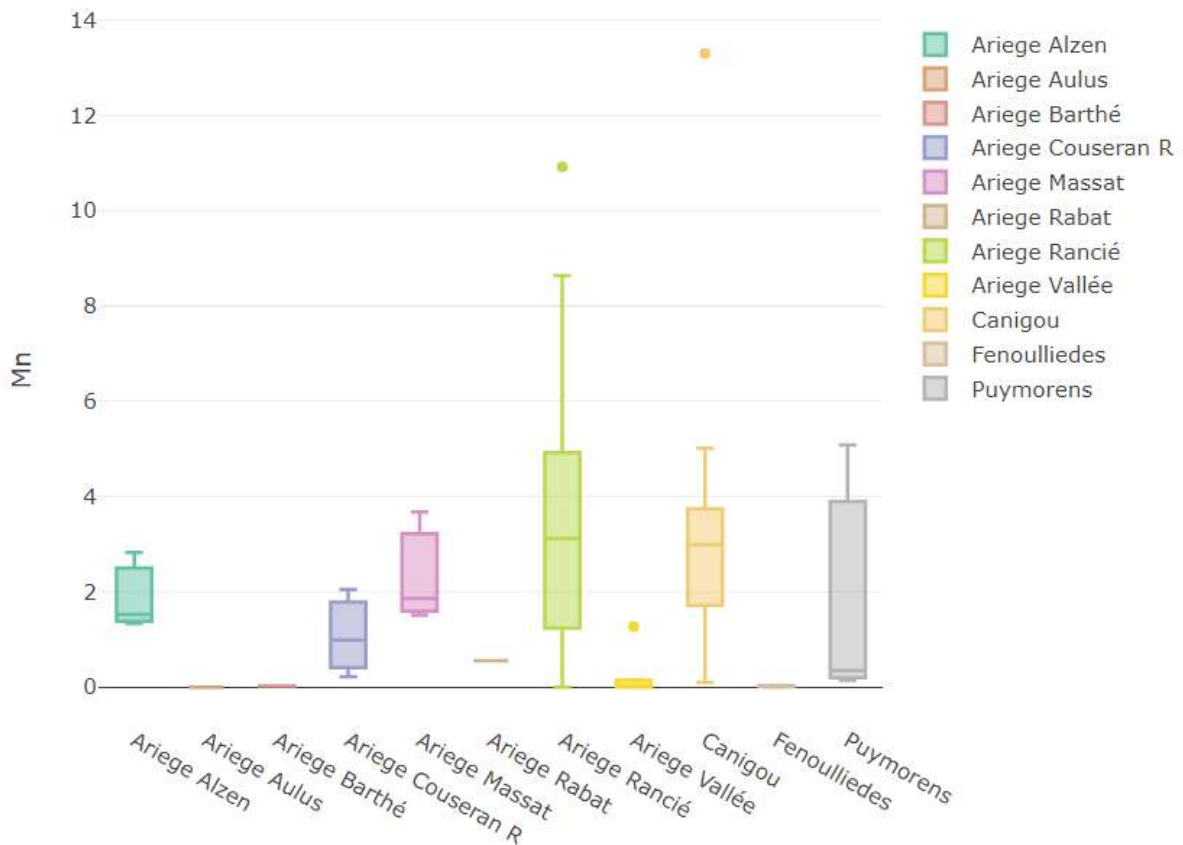


Figure 22 : Teneur en manganèse des échantillons de minerai (n=89) analysés dans le cadre du PCR ainsi que des minerais intégrés au préalable dans la base CHIPS

### 7. Les scories

Cent quatre-vingt-quatorze analyses globales de scories ont été examinées dans le cadre du PCR. Parmi celles-ci, 132 ont été réalisées à l'échelle des deux départements dans le cadre de FERAPO et du FEDER FERMAPYR. A ces analyses s'ajoutent 21 autres effectuées sur des échantillons provenant du district sidérurgique de la Montagne Noire, dans l'Aude. Quarante et une analyses supplémentaires ont en outre été extraites du référentiel chimique CHIPS. À l'instar des analyses de minerai présentées précédemment, ces dernières sont marquées par le manque de certaines informations chimiques, notamment l'absence de la plupart des terres rares lourdes, ainsi que du praséodyme et du gadolinium.

Compte tenu du nombre beaucoup plus important d'analyses, l'approche sérielle de teneurs présentée pour les minerais s'avérerait plus difficile à appréhender pour les scories. Il a donc été décidé de présenter directement les résultats d'une démarche multivariée. Les variables ont subi la même transformation préalable, à savoir la méthode des log ratios. Afin d'étudier la structure des données, la catégorisation définie pour les minerais a été réutilisée. Une différence fondamentale est toutefois à relever. Contrairement aux minerais, il n'est pas possible d'établir un lien avec les gisements exploités sur la base des contextes de prélèvement. Néanmoins, les sources historiques peuvent apporter des informations utiles pour certains sites. Il s'agit des sites de la fin du Moyen Âge et des périodes moderne et contemporaine, puisque les archives livrent parfois des informations sur l'origine du minerai utilisé. Ainsi, les sites médiévaux et plus tardifs localisés dans le Couserans sont intégrés à la catégorie 'Ariège Rancié', puisque ces sites ont été presque exclusivement approvisionnés par la mine du Rancié dans le cadre de l'échange établi entre la vicomté de Couserans et le comté de Foix. D'autre part, pour les sites se trouvant à proximité directe d'une exploitation minière (distance inférieure au kilomètre),

nous avons fait le choix de les associer à cette dernière, et donc de leur attribuer la catégorie correspondante. Enfin, plusieurs sites n'ont pas pu être intégrés à l'une des catégories définies précédemment, puisqu'on ne disposait d'aucune information sur l'origine du minéral. Ces sites ont été regroupés dans une catégorie nommée 'à déterminer'.

La fouille de données réalisée est déclinée en deux étapes principales : 1) l'analyse du corpus complet, c'est-à-dire en intégrant les données de la base CHIPS ; 2) l'analyse du corpus constitué au cours du PCR FERAP0 et du FEDER FERMAPYR. L'objectif sera de déterminer si les variables supplémentaires sont susceptibles d'apporter des informations utiles en termes de distinction des espaces de production sidérurgique.

#### Analyse multivariée du jeu de données complet

Onze éléments chimiques utilisables pour les études de provenance étaient disponibles pour l'ensemble du corpus : Y, Nb, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Hf, Th, U. La contribution des variables sur les axes factoriels montre des similarités avec les données associées aux minerais. Les plus fortes contributions sont portées par les log ratios de 4 éléments : Nb, Hf, Th, U (Figure 23). La majorité de cette contribution est d'ailleurs exprimée sur le premier axe factoriel, et implique principalement Nb, Hf et Th.

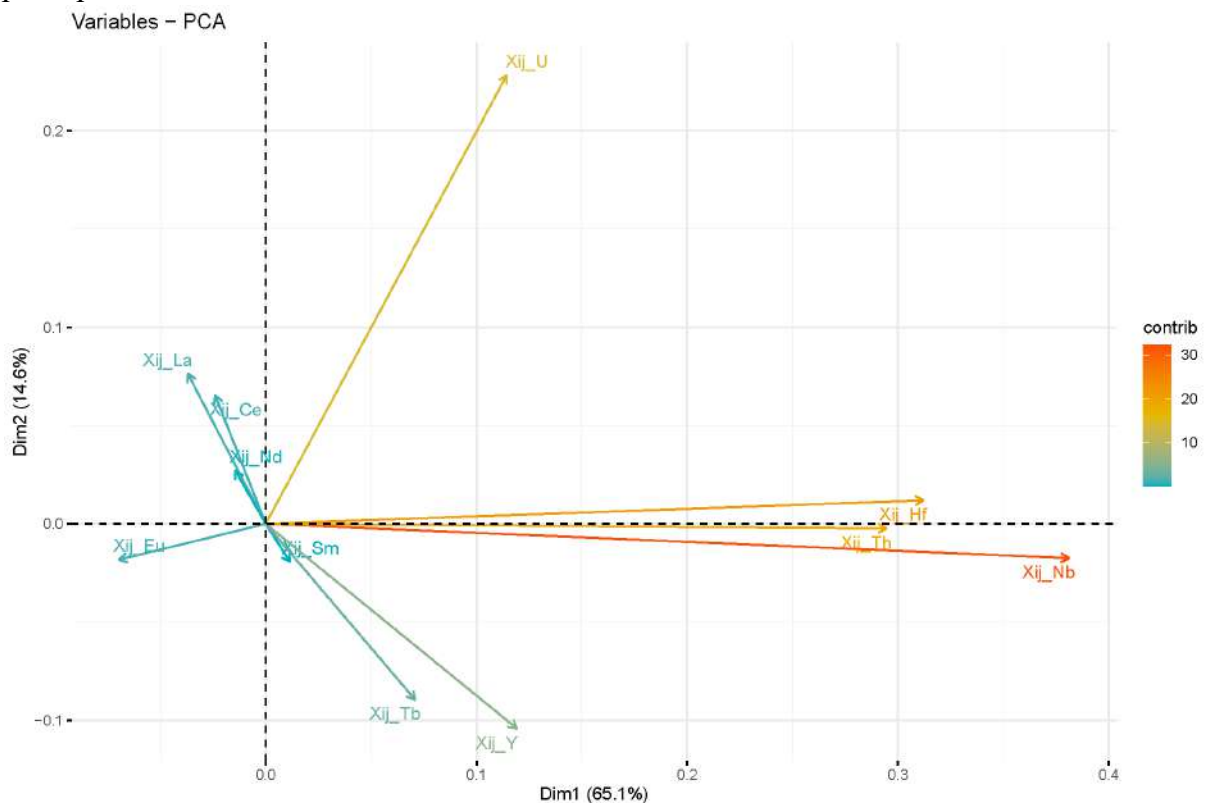


Figure 23 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2, pour la totalité du corpus de scories étudiées; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 24

Cinq classes principales ont été définies par l'observation des sauts d'inertie provoqués par la création successive des classes (Figure 24). La structure des données et la composition des classes révèlent une information majeure : deux classes (rouge et bleu clair) apparaissent significativement distinctes des autres. Ces classes sont composées principalement de scories provenant de sites pour lesquels les sources archéologiques et/ou historiques ont montré l'utilisation de minéral du Rancié. Cette observation est d'autant plus importante que l'analyse des caractéristiques des minerais avait certes révélé une légère distinction des minerais associés au gisement du Rancié par rapport aux minerais d'autres provenances, mais elle apparaissait toutefois relative. Les trois autres classes sont néanmoins composées de scories de provenance

diverses, rendant toute distinction impossible. Dans la mesure où nous avons observé, dans le cas des minerais, une forte variabilité intra-catégorie de certaines variables aux contributions fortes, notamment Nb, Hf, Th et U, nous avons pris le parti de les retirer du jeu de données étudiées afin d'observer des plans factoriels dépourvus de la forte influence qu'ils exercent.

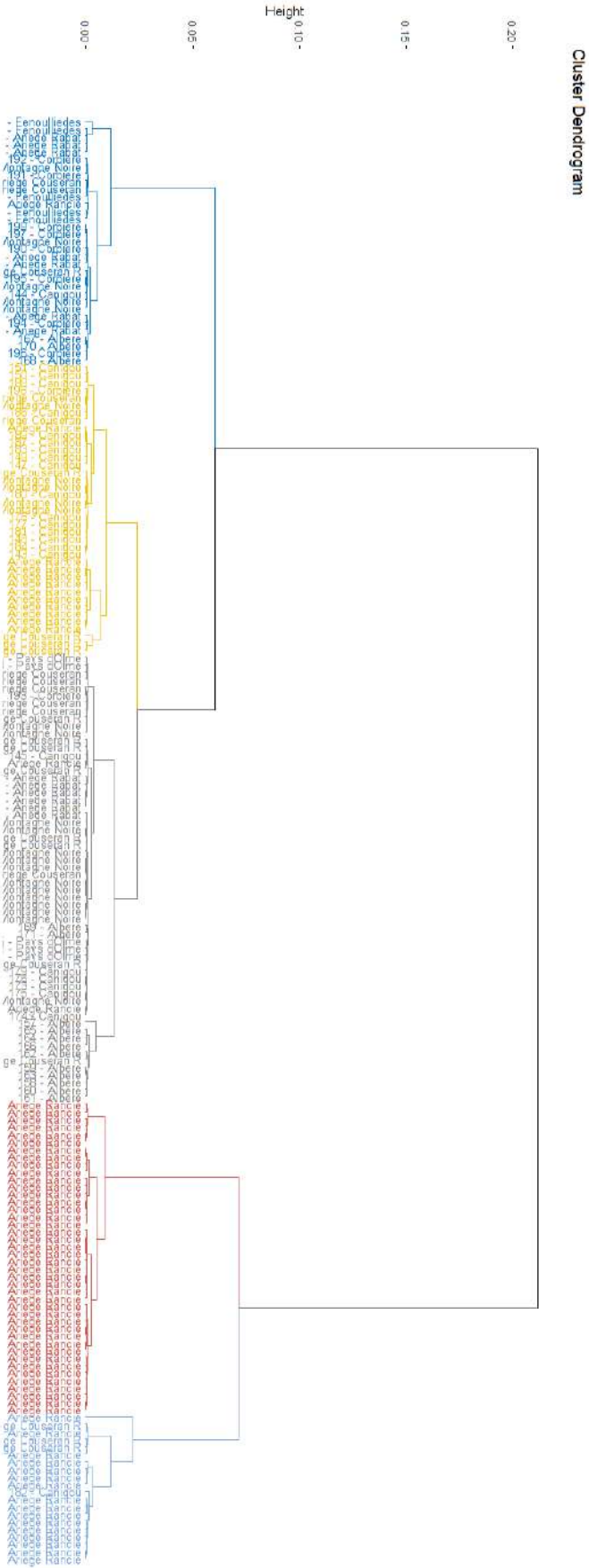


Figure 24 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 149 échantillons de scories provenant de sites métallurgiques ; variables : log-ratios de Y, Nb, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Hf, Th, U ; facteurs pris en compte PC1 à PC3

La nouvelle analyse, reposant sur 7 variables, montre une contribution assez semblable à ce qui avait été observé sur un ensemble réduit de variables pour l'étude des minerais. La, Ce et Nd apparaissent fortement corrélés, ainsi que Y et Tb. Ces deux éléments exercent d'ailleurs une influence forte sur le premier axe factoriel. Eu et Sm sont quant à eux presque anticorrélés, et non corrélés aux deux groupes de variables précités (Figure 25).

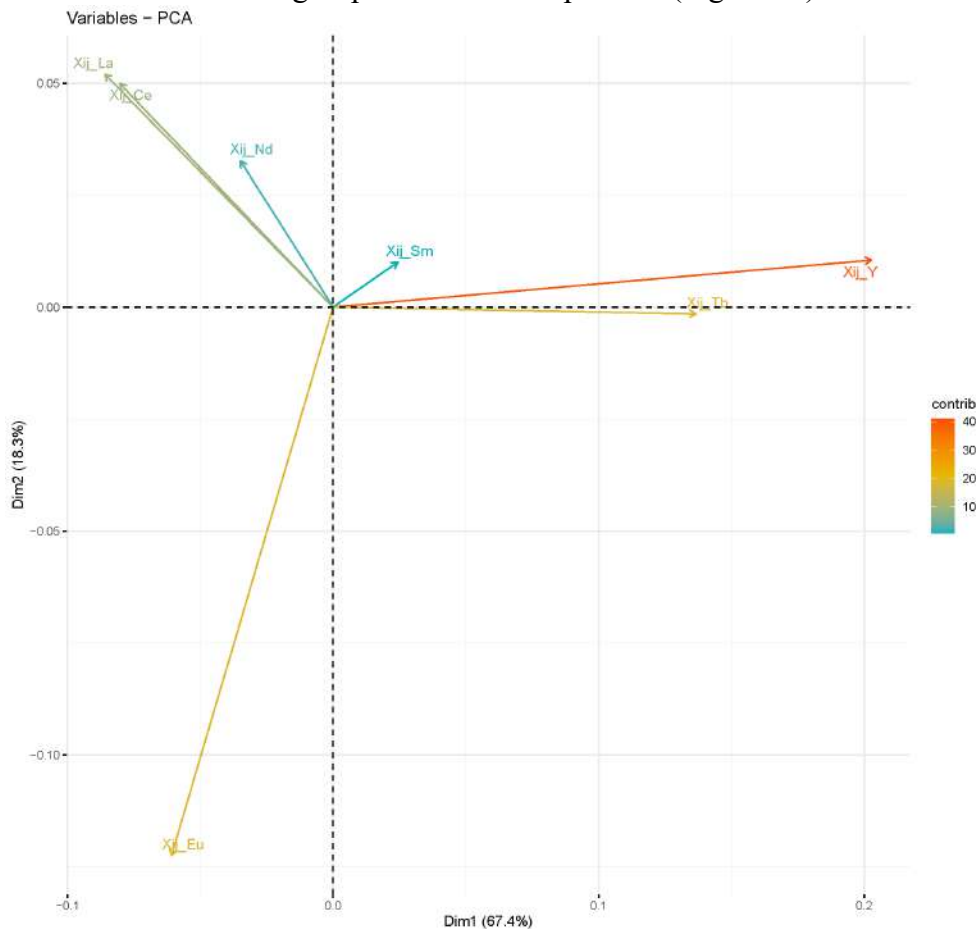


Figure 25 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2, pour la totalité du corpus de scories étudiées; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 26

Six classes ont été définies en examinant les sauts d'inertie provoqués par les agglomérations successives, afin d'obtenir le meilleur rapport entre inertie intra- et extraclass (Figure 26). Si la composition de certaines classes est rendue plus homogène par la réduction du nombre de variables (classes bleu foncé et grise composées uniquement de scories pouvant être attribuées à l'utilisation du minerai du gisement du Rancié), cette nouvelle analyse voit s'affaiblir la spécificité chimique observée auparavant (sur la Figure 24 les deux classes rouge et bleu clair étaient bien distinguées du reste du corpus). Un certain nombre de scories associées aux catégories 'Canigou' et 'Ariège Pays d'Olme' se trouvent chimiquement plus proches. À l'exception d'un individu, les scories associées à la catégorie 'Canigou' sont regroupées dans cette classe (représentée en jaune). D'autres groupes semblent se dessiner ; la classe bleu foncé est composée majoritairement de scories provenant des Albères, mais sept autres scories associées à d'autres catégories leur sont associées. L'ensemble des scories de la Montagne Noire sont regroupées au sein d'une même classe (couleur rouge), mais celle-ci comporte également nombre d'autres individus de provenances diverses.



### Analyse multivariée du jeu de données réduit

Les résultats de ces analyses multivariées s'avèrent plutôt encourageants. Dans l'ensemble, la catégorisation effectuée sur la base d'une combinaison de critères géographiques, archéologiques et/ou historiques semble montrer une certaine signification chimique. La distinction de ces catégories n'est pas parfaite, mais elle révèle néanmoins une certaine homogénéité chimique. Avant d'explorer ces faits plus en détail, nous tenterons de déterminer si la prise en compte de variables supplémentaires, notamment plusieurs terres rares lourdes, permettrait d'affiner cette première perception. Pour cela, il est nécessaire de réduire la population étudiée aux seuls individus analysés dans le cadre des programmes FERAPO et FERMAPYR.

La première phase de cette étape a consisté à prendre en compte la totalité des log ratios considérés comme exploitables dans le cadre d'études de provenance. Les 18 variables sont donc associées respectivement aux rapports de teneurs impliquant Y, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Hf, Th et U. Les trois premiers axes factoriels, totalisant 92.3 % de la variance totale exprimée par l'analyse, ont été sélectionnés. Les relations entre variables correspondent à ce qui a été observé auparavant pour les minerais (Figure 27). On remarque une forte contribution de Nb, Hf et Th, notamment sur l'axe factoriel 1. D'autre part, il existe une forte corrélation entre la plupart des terres rares lourdes, qui sont décorréliées des trois variables précédentes. Les vecteurs des contributions de Eu et U sont isolés.

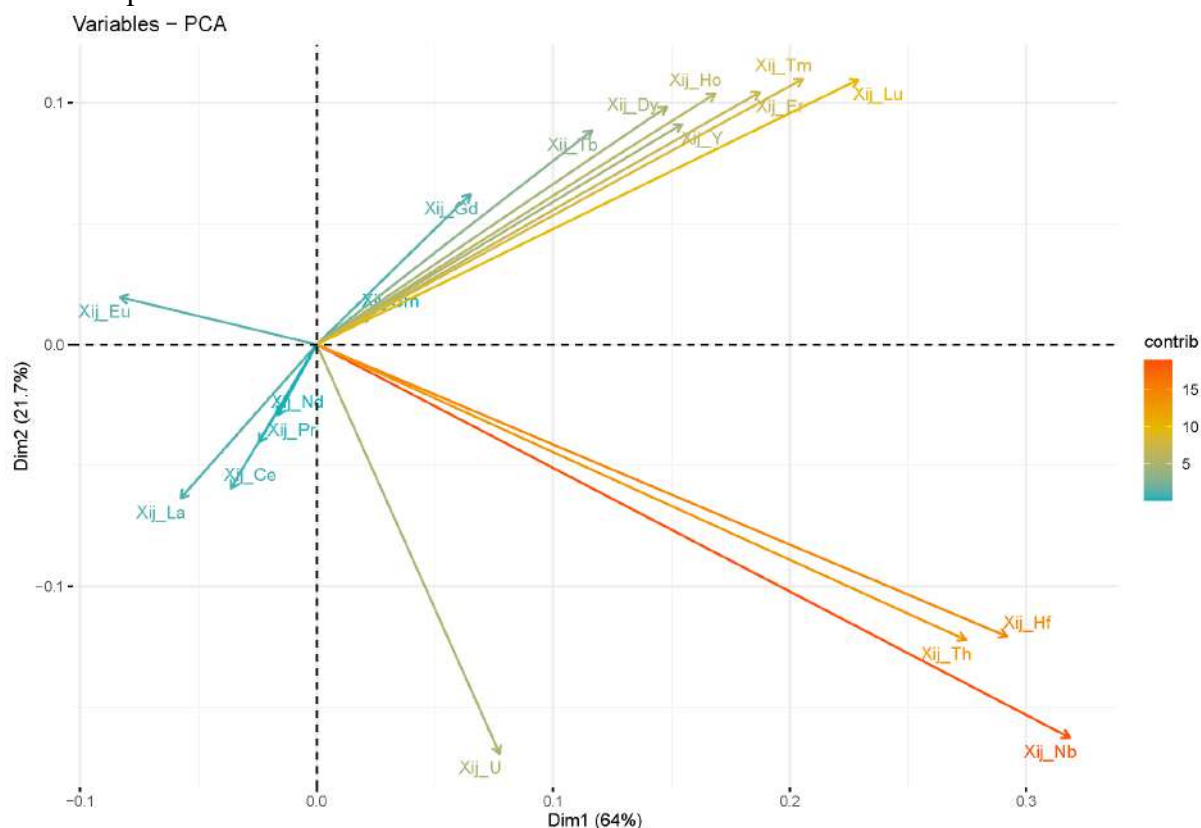


Figure 27 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2, pour les scories analysées dans le cadre des programmes FERAPO et FERMAPYR; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 28

Le dendrogramme figurant les distances entre individus sur le plan factoriel a été divisé en 5 classes en fonction des sauts d'inertie. Deux classes sont isolées. La première (en jaune) regroupe la totalité des individus que l'on peut associer de façon sûre à l'utilisation de minerai provenant de l'exploitation du Rancié (Figure 28). Le second est constitué d'individus associés à trois catégories : 'à déterminer', 'Canigou' et 'Couserans R (Vallée du Nert)'. Parmi les trois autres classes, la première (grise) regroupe presque la moitié (65 ind. sur 149) de la population

étudiée, qui représente 7 catégories. Une autre classe (rouge) est composée presque exclusivement d'individus prélevés dans les Albères. La dernière est composée d'individus associés à 6 catégories différentes. Si la distinction de certaines catégories ('Ariège Rancié' et 'Albères') paraît satisfaisante, il n'en est pas de même pour la plupart des autres.

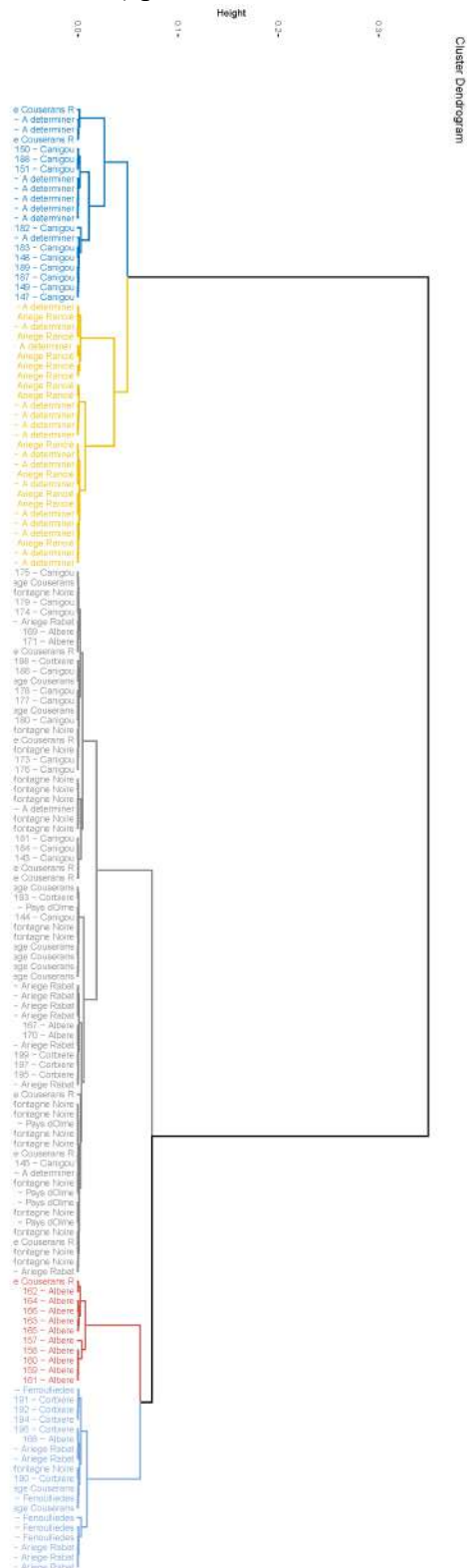


Figure 28 dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 149 échantillons de scories provenant de sites métallurgiques ; variables : log-ratios de Y, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Hf, Th et U ; facteurs pris en compte PC1 à PC3

Compte tenu des observations déjà formulées auparavant sur la variabilité intra-catégorie des éléments dont les log ratios contribuaient le plus aux analyses multivariées (Nb, Hf, Th et U), il a été décidé de retirer ces éléments du jeu de données. Les relations entre les variables restantes (Figure 29) sont très similaires à celles observées à l'examen du jeu de données intégrant les 18 variables initiales.

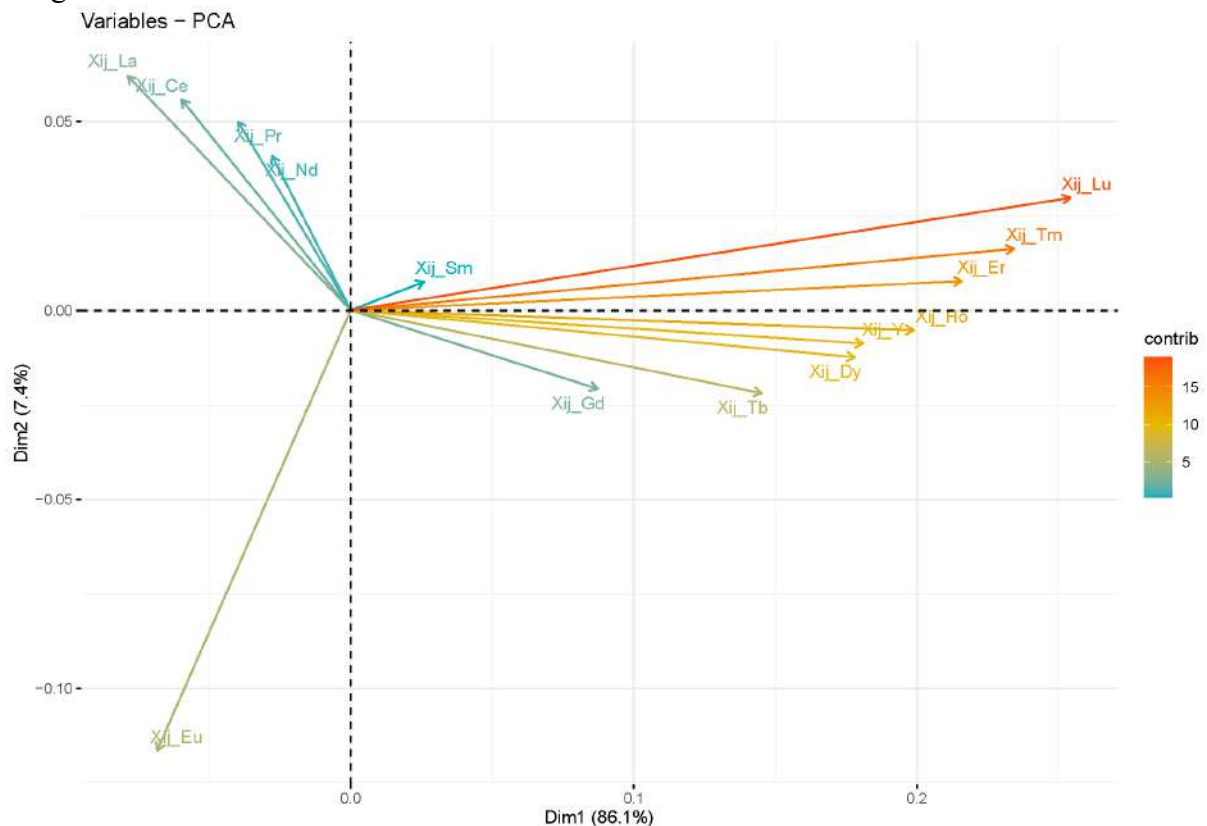


Figure 29 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2, pour les scories analysées dans le cadre des programmes FERAPO et FERMAPYR; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 30

Réduit à 14 variables, le jeu de données montre une structure différente de la précédente. Quatre classes ont été définies (Figure 30). Une classe est distinguée des autres de manière sensible (bleu foncé). Elle regroupe les individus associés à l'exploitation du minerai extrait du Rancié avec une partie des individus de la catégorie 'à déterminer'. Sept individus des Albères sont également bien distingués du reste du corpus, mais à une distance moindre. Les deux classes restantes sont plus hétérogènes en termes de représentation catégorielle. Néanmoins, il est intéressant de noter que certaines catégories se trouvent totalement incluses dans l'une ou l'autre de ces classes. C'est le cas notamment du 'Couserans' (dans la classe grise), ou du 'Canigou' et de la 'Montagne Noire' (classe rouge). Ainsi, si la distinction des catégories n'est pas totalement satisfaisante, le jeu de données exploré révèle toutefois l'homogénéité chimique de la plupart des catégories définies.

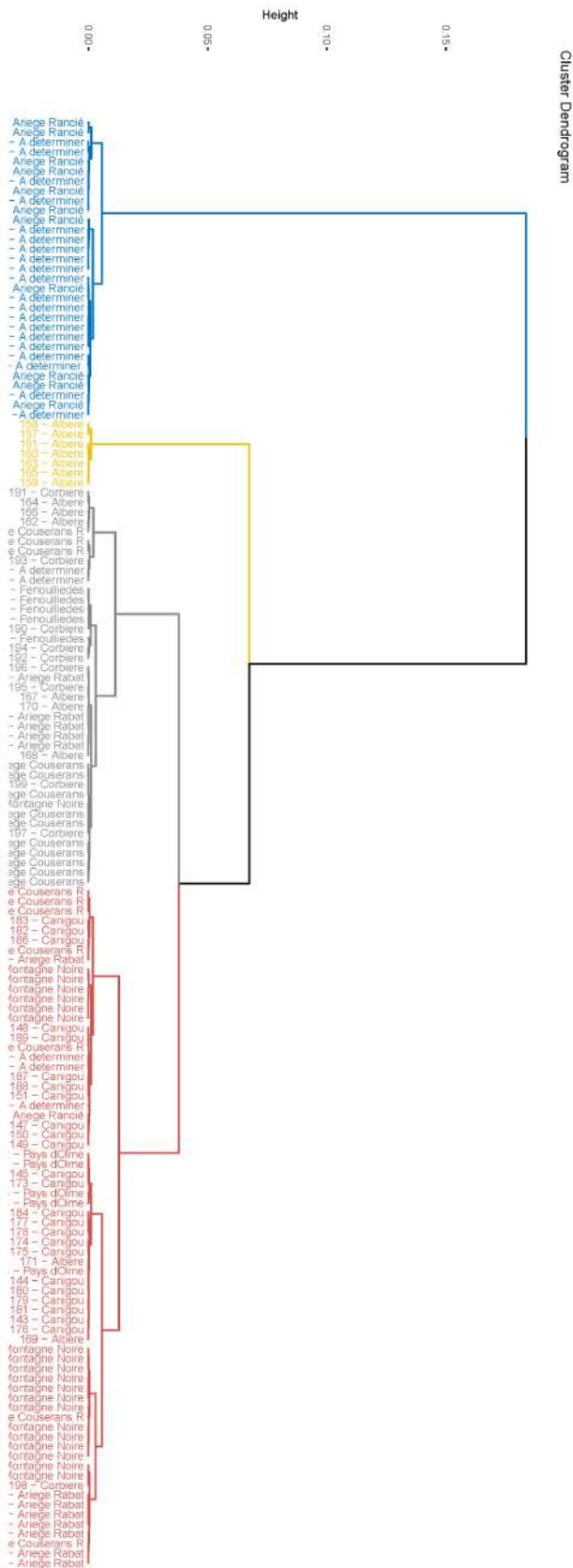


Figure 30 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 87 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu ; facteurs pris en compte PC1 à PC3

L'ensemble des démarches multivariées présentées *supra* pour explorer les données chimiques acquises dans le cadre des projets FERAPO et FERMAPYR révèlent plusieurs faits dignes

d'intérêt. En premier lieu, l'approche catégorielle choisie montre, dans une certaine mesure, une corrélation entre les données chimiques et la situation géographique des échantillons prélevés. Cette corrélation ne montre toutefois pas de structure totalement spécifique, à savoir que les différentes catégories ne sont pas systématiquement et strictement distinguées d'un point de vue chimique. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ce constat. Tout d'abord, les signatures chimiques des différents gisements ne sont potentiellement pas suffisamment différentes les unes des autres pour assurer cette distinction. D'autre part, les sources écrites montrent sans ambiguïté que certains minerais ont fait l'objet de transport sur des distances parfois importantes, de plusieurs dizaines de kilomètres. Enfin, l'approche multivariée adoptée repose sur une analyse linéaire des coordonnées des individus sur des plans factoriels (PCA). Les distances entre individus sur ces plans factoriels peuvent ne pas être suffisamment importantes pour que la classification ultérieure soit en mesure de bien distinguer les groupes chimiques pertinents. Pour vérifier l'influence de ce dernier facteur, il a été décidé d'employer une autre méthode de réduction de dimensionnalité, l'algorithme t-SNE (*t-distributed stochastic neighbor embedding*). À la différence des analyses factorielles, cet algorithme repose sur une loi de densité de probabilités pour décrire les différences chimiques entre individus. Une série d'itérations est mise en œuvre sur les relations chimiques entre les individus afin de les placer dans un espace de dimensions réduites (généralement 2 ou 3). Cette approche, qui met plus l'accent sur les relations chimiques entre individus, montre donc un potentiel accru de regroupement d'individus sur le plan d'analyse, facilitant la définition de groupes chimiquement cohérents par le biais d'une classification ascendante hiérarchique. Cette approche sera ici testée sur le corpus des analyses chimiques de scories, en conservant les catégories déjà employées. On réalisera cette démarche successivement sur le corpus comprenant les individus issus de la base CHIPS et des analyses réalisées dans le cadre de FERAPO et FERMAPYR, puis sur le corpus réduit comprenant uniquement les analyses réalisées dans le cadre de ces deux programmes. Ce corpus réduit permettra de prendre en compte un nombre de variables plus important.

#### *Classification du corpus d'analyses de scories par t-SNE*

Les 194 analyses de scories disponibles, tirées de CHIPS et des campagnes analytiques réalisées dans le cadre de FERAPO et FERMAPYR ont été analysées par le biais de l'algorithme t-SNE. Plusieurs tests ont été réalisés afin de choisir les paramètres les plus adaptés au corpus étudié. Les paramètres retenus sont ainsi 4 ou 5 dimensions initiales en fonction des cas. D'autre part, l'indice de perplexité a été fixé à 30. Cet indice correspond au nombre de « voisins » pris en compte pour la définition des relations entre individus, et donc leur placement dans l'espace de dimensions réduites. Une première analyse a été réalisée en employant un ensemble de 11 variables (Y, Nb, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Hf, Th, U) déjà employé pour la mise en œuvre de la classification ascendante hiérarchique sur les coordonnées des individus sur les premiers axes factoriels de l'analyse en composantes principales (méthode HCPC ; Figure 24).

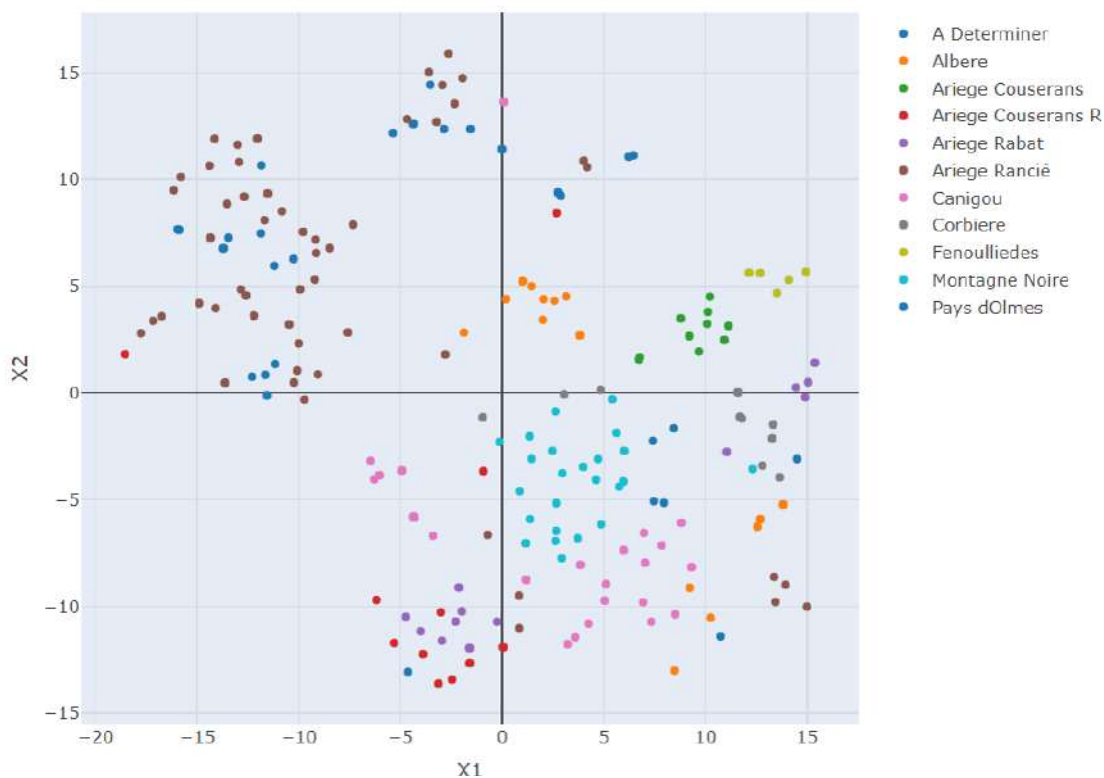


Figure 31 : Positions des 194 analyses de scores dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, Nb, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Hf, Th, U

Cette première analyse montre des résultats mitigés (Figure 31). Un groupe d'analyses, composé d'individus catégorisés comme liés au Rancié et d'individus dont la catégorie reste à déterminer, se démarque relativement bien du reste du corpus (angle haut gauche du plan). Un second groupe plus réduit, constitué d'individus appartenant aux mêmes catégories (angle haut gauche), semble également se démarquer. D'autre part, un groupe constitué par des individus provenant des Albères (centre) se trouve partiellement isolé du reste de la population. En revanche, la majorité des individus constituent un semis assez lâche de points occupant la partie droite du plan. Ceci montre une distinction insatisfaisante des scores sur la base de leurs caractéristiques chimiques.

Une nouvelle analyse a donc été réalisée en excluant quatre variables de l'analyse : Nb, Hf, Th, U. Ceci fait suite au constat dressé au cours des analyses par ACP précédentes (Figure 23). Cette nouvelle analyse repose donc sur sept descripteurs, *log-ratios* impliquant les teneurs de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb.

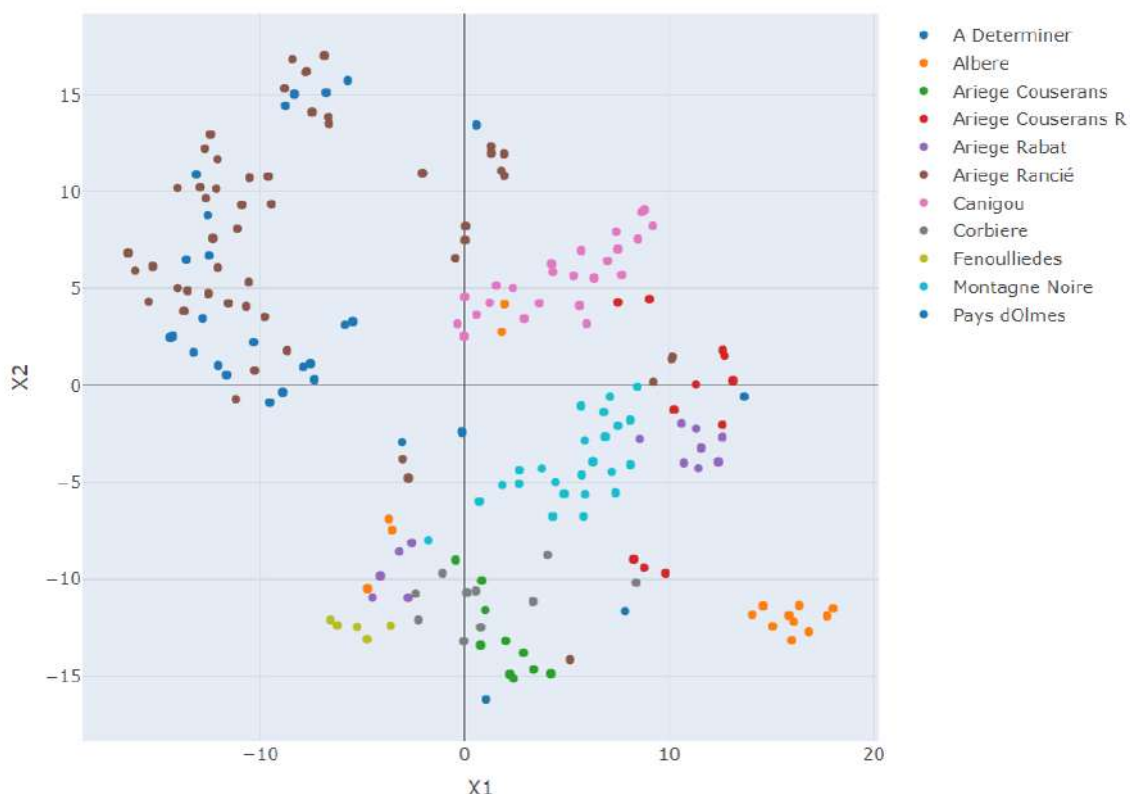


Figure 32 : Positions des 194 analyses de scores dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb

Les résultats montrent cette fois-ci une structure plus spécifique des coordonnées des individus dans l'espace réduit. Les premiers constats dressés, concernant les catégories 'Rancié', 'A déterminer' et 'Albères' restent valables, ces *clusters* étant par ailleurs mieux dissociés du reste du corpus. D'autre part, alors que les autres catégories formaient un nuage lâche de points dans la précédente analyse, les individus apparaissent désormais mieux regroupés en fonction des catégories définies *a priori*. C'est particulièrement le cas pour les individus attribués à la catégorie 'Canigou' et à la catégorie 'Montagne Noire'. Enfin, il faut noter que les individus de la catégorie 'Pays d'Olmes', qu'il était possible d'isoler sur les plans factoriels de l'ACP, ne sont pas distingués par cette analyse.

Afin de poursuivre l'exploration du potentiel de cette approche, le corpus d'individus a été réduit aux seules analyses réalisées dans le cadre des programmes FERAPO et FERMAPYR, représentant une population de 149 individus. Un ensemble de 18 variables, *log-ratios* impliquant les teneurs de Y, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Hf, Th et U, a été considéré afin de déterminer si la variabilité observée pour Nb, Hf, Th et U précédemment conservait suffisamment d'influence au sein d'un jeu de variables étendu. L'analyse repose sur 5 dimensions initiales, et utilise une perplexité de 30.

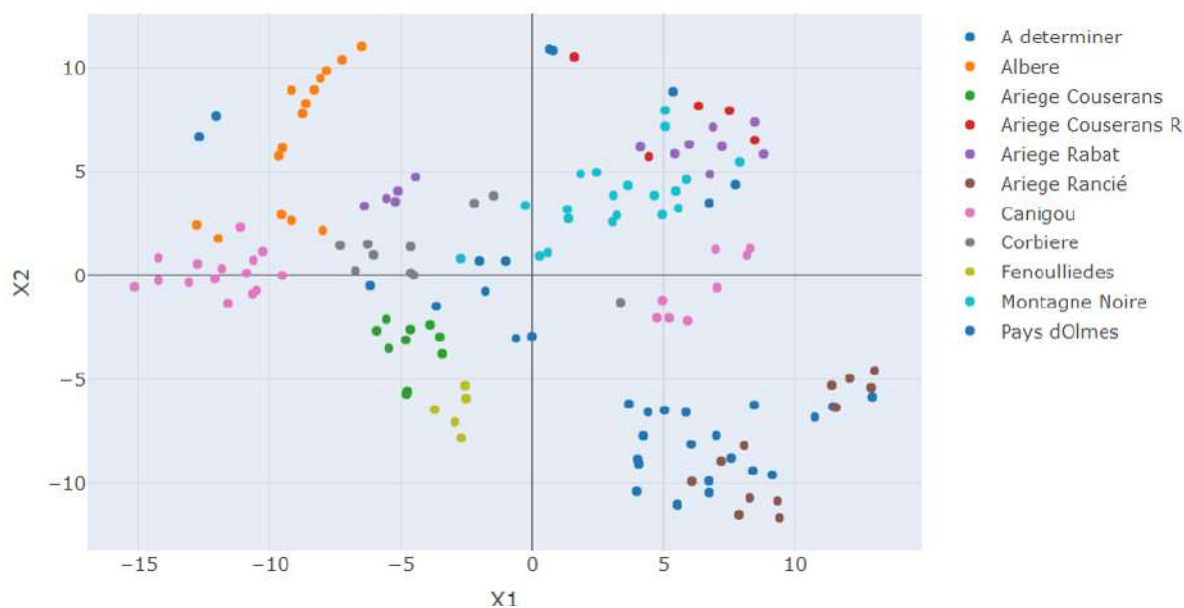


Figure 33 : Positions des 149 analyses de scories dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Hf, Th et U

Le placement des individus dans l'espace réduit révèle une structure plus marquée que précédemment, caractérisée par une plus forte dispersion du nuage lâche observé sur la Figure 31. Les regroupements par catégories sont toutefois moins équivoques qu'au terme de l'analyse à 7 variables présentée en Figure 32, puisqu'on observe notamment une séparation des individus associés au 'Canigou' en deux *clusters*. De la même manière, les individus associés à la 'Montagne Noire' sont moins bien distingués d'autres catégories, telles que 'Ariège Rabat'. Nb, Hf, Th et U ont donc été soustraits au lot de variables analysées. Les paramètres de l'analyse précédente ont été conservés.

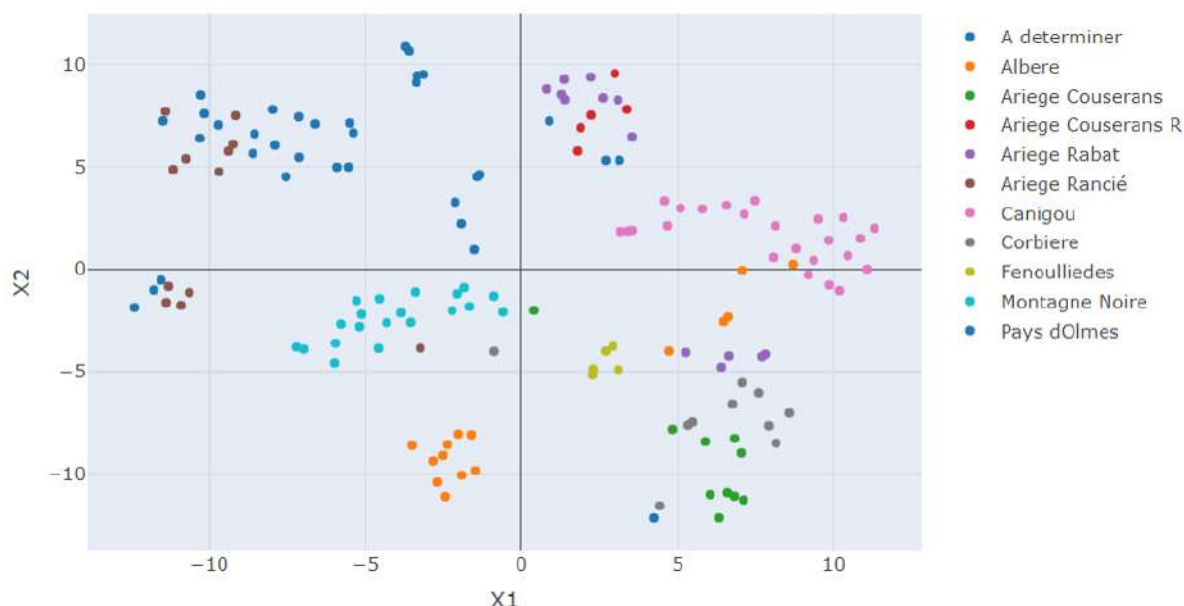


Figure 34 : Positions des 149 analyses de scories dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu

Les résultats de cette analyse montrent une dispersion des individus qui paraît significative si l'on considère la dispersion des individus en plusieurs *clusters* relativement compacts, ainsi que la définition catégorielle initiale. Plusieurs éléments déjà constatés sur les analyses précédentes

persistent. Les individus correspondant au ‘Rancié’ et la plupart de ceux correspondant à la catégorie ‘à déterminer’ constituent des groupes isolés. D’autre part, la plupart des échantillons des ‘Albères’ sont relativement bien distingués du reste du corpus. Les individus correspondant respectivement au ‘Canigou’ et à la ‘Montagne Noire’ forment deux groupes cohérents. Afin de définir plus précisément des classes chimiquement cohérentes, une classification ascendante hiérarchique a été réalisée sur les coordonnées des individus sur l’espace réduit. L’algorithme d’agrégation retenu est ‘Ward’. D’après les sauts d’inertie de l’analyse, 10 classes ont été définies (Figure 35).

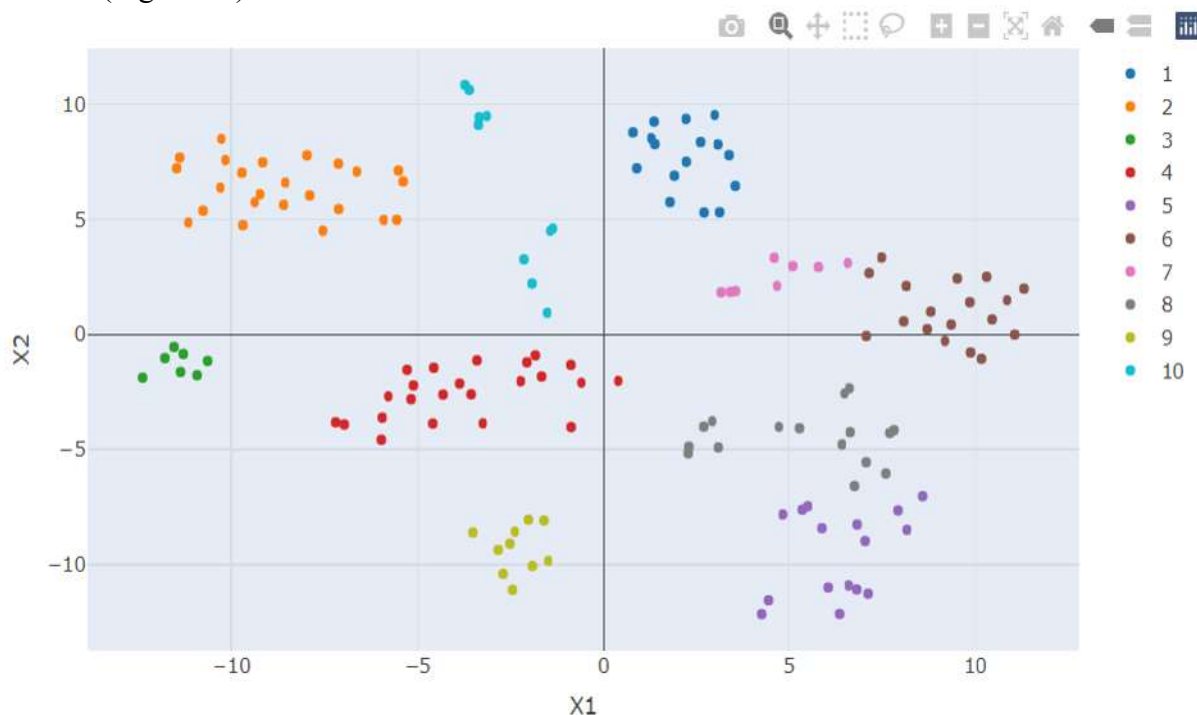


Figure 35 : Positions des 149 analyses de scories dans l’espace réduit par t-SNE ; variables : Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu ; résultats d’une classification ascendante hiérarchique réalisée sur les coordonnées des individus sur l’espace réduit

Les échantillons des ‘Corbières’ et du ‘Couserans’ sont associés au sein d’une même classe. Une partie des individus de ‘Rabat’ forment, avec des individus des ‘Fenouillèdes’ et trois individus des ‘Albères’, un autre groupe. Les individus du ‘Pays d’Olmes’ sont attribués à une autre classe, avec deux individus de la catégorie ‘à déterminer’ et trois individus provenant de la vallée du Nert. Les autres individus de cette catégorie forment une autre classe (classe 10 sur la Figure 35) avec une partie des individus de la catégorie ‘Rabat’.

#### Remarques conclusives sur l’exploration multivariée des données chimiques :

L’exploration des données présentée dans cette partie du rapport montre des résultats prometteurs. Elle a permis de définir les descripteurs les plus pertinents afin d’assurer un partitionnement du corpus d’analyses de scories qui apparaissent pertinentes au vu des hypothèses de départ formulées, et matérialisées par la définition des différentes catégories examinées. Les principaux éléments résultants de cette démarche sont les suivants :

- Les signatures des minerais tels qu’ils ont été catégorisés sur la base des informations à notre disposition (principalement lieu de prélèvement) montrent une variabilité pouvant se montrer très importante. Si nous espérons une meilleure spécificité chimique des catégories définies, ce constat n’est toutefois pas étonnant. La signature chimique des minéraux ferrifères est susceptible de varier sensiblement à l’échelle d’un même gisement. Ceci est dû à plusieurs facteurs, intervenant à la fois au cours des

processus primaires de métallogénèse, mais également au cours de processus ultérieurs. Une piste de recherche intéressante serait de pouvoir cartographier avec précision, pour les exploitations les plus importantes telles que le Rancié ou Batère, les lieux de prélèvements d'échantillons de minerais qui feraient l'objet d'une caractérisation chimique. Ceci permettrait de préciser à la fois la dispersion des signatures à l'échelle des gisements, mais aussi potentiellement de définir des zonations chimiques plus précises au sein de ces derniers.

- Les éléments chimiques les plus pertinents pour une distinction des signatures chimiques ont été définis avec succès. Dans le contexte qui nous intéresse, à savoir les départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales, mais également le district de la Montagne Noire (Aude), un ensemble de 14 variables semble particulièrement adapté. Il s'agit des teneurs des éléments chimiques suivants : Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu.
- Il apparaît néanmoins possible d'utiliser une liste de variables plus réduite afin de prendre en compte des échantillons analysés au cours de travaux précédents, et pour lesquelles toutes les variables mentionnées précédemment ne sont pas disponibles. Une liste de 7 éléments paraît bien adaptée dans ce cas : Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb. La distinction chimique des catégories définies *a priori* apparaît moins univoque, mais les principales tendances observées par l'analyse des 14 variables restent perceptibles à cette échelle d'analyse.
- Les démarches de réduction de dimensionnalité reposant sur une analyse linéaire des variables, telles que la PCA, apparaissent très utiles pour analyser les relations entre variables, mais également pour étudier l'influence des différentes variables sur l'analyse multivariée. Néanmoins, cette approche semble montrer des limites lorsqu'il s'agit de partitionner la population analysée en vue d'obtenir des classes interprétables sur la base des informations archéologiques et historiques dont on dispose par ailleurs.
- L'application de l'algorithme t-SNE, qui repose sur une analyse probabiliste et itérative des relations entre individus pour obtenir une représentation spatiale réduite de l'information chimique, semble se montrer plus pertinente dans le cas présent. Cette approche permet de définir, de façon plus tranchée, des classes d'individus interprétables sur la base des informations contextuelles, archéologiques et historiques. Les paramètres les plus adaptés au jeu de données ont été définis. Une valeur de perplexité de 30 apparaît comme la plus adaptée au cas présent. Le nombre de dimensions initiales prises en compte est quant à lui amené à être modifié au cas par cas, ce paramètre apparaissant sensible au nombre de variables explicatives analysées.
- Une approche combinée, employant en parallèle une analyse factorielle du jeu de données, et une approche de réduction de dimensionnalité probabiliste, apparaît comme la démarche de traitement de données la plus pertinente. Elle permet à la fois d'analyser l'influence des variables sur l'analyse, et de procéder à un partitionnement pertinent du jeu de données.

#### *8. Les informations nouvelles apportées par les données chimiques sur la définition d'ensembles chimiques de production et la circulation des minerais*

Les efforts d'acquisition et de traitement de données chimiques réalisés dans le cadre du PCR FERAPO et du FEDER FERMAPYR renouvellent considérablement notre perception chimique des activités anciennes de réduction de minerai de fer dans la partie orientale du massif pyrénéen et de la Montagne Noire. Parmi les résultats les plus marquants, il faut mentionner la définition de nouveaux ensembles chimiques de production sidérurgique, qui est due à la collecte d'échantillons dans des secteurs géographiques qui n'avaient pas fait l'objet de travaux archéométallurgiques notables jusqu'alors. Ces ensembles correspondent aux ensembles suivants : le massif du 'Canigou', les 'Fenouillèdes', les 'Albères', le 'Pays d'Olmes', la vallée de 'Rabat' et les 'Corbières'. D'autres secteurs ont bénéficié d'un enrichissement notable de données chimiques dans le cadre de nos travaux : le Couserans, la vallée du Nert, la Montagne Noire et la Haute-Ariège.

Le résultat le plus marquant des traitements de données chimiques réalisés est la mise en évidence d'une possibilité de distinction des ensembles chimiques de production. Cette distinction est un préalable essentiel à l'étude de la circulation des matériaux, puisqu'elle permet de déterminer, avec une relative précision spatiale, l'origine des alliages ferreux en circulation. Avant ces travaux, seuls les ensembles du 'Rancié' et de la 'vallée du Nert (Couserans R)' avaient fait l'objet d'une caractérisation chimique, et d'une confrontation des données chimiques (Leroy et al. 2012). Cette étude pionnière avait permis de mettre en évidence des tendances chimiques favorables à la distinction des deux ensembles, mais les données disponibles n'avaient pas permis d'aboutir à une distinction chimique univoque de ces derniers. Les nouvelles données acquises, et notamment les éléments chimiques pris en compte désormais, permettent cette distinction. D'autre part, l'utilisation combinée de l'algorithme t-SNE et de la classification ascendante hiérarchique souligne la possibilité d'identifier des ensembles chimiques cohérents correspondants à des secteurs d'activité sidérurgique.

Au vu des résultats obtenus et des données disponibles à l'heure actuelle, il paraît possible de distinguer de façon satisfaisante les ensembles suivants : le 'Rancié', le 'Canigou' et la 'Montagne Noire'. Il semble également possible de distinguer le 'Pays d'Olmes' et les 'Fenouillèdes', mais ceci nécessitera d'acquérir plus de données sur ces ensembles afin de confirmer les tendances observées. Les 'Albères' constituent un cas particulier. Sur les 15 individus analysés, 10 forment une classe chimique bien distincte du reste du corpus étudié. Les 5 autres individus proviennent tous d'un même site, Clot del Poux 1 (N° projet 66093\_5). Une vingtaine de sites ont été découverts sur le territoire de la commune de Laroque-des-Albères. Il s'agit dans ce cas d'un site isolé, situé à environ 1,5km au nord et environ 100m en contrebas des sites les plus proches. Il est possible que cet ait fonctionné sous des conditions différentes, à savoir l'utilisation d'un minerai présentant des caractéristiques différentes, ou la contribution notable d'autres matériaux (ajouts, ou parois de four) à la formation de la scorie de réduction.

Certaines catégories sont mal distinguées les unes des autres. C'est notamment le cas du 'Couserans' (représenté en vert foncé sur la Figure 34), des 'Corbières' (représentées en gris) et du site de Stal de Bizou 01 (n° projet 09136\_3) intégré à la catégorie 'Rabat' (en violet). C'est également le cas pour l'autre partie de la catégorie 'Rabat', représentée par les individus du site de Pujols 01 (n° projet 09241\_1) et la catégorie 'Couserans R' (vallée du Nert) représentée par le site du cimetière 01 de Rivèrenert (n° projet 09247\_1). Au vu des informations archéologiques dont nous disposons sur les sites concernés, il est probable que l'impossibilité de les distinguer soit due à une grande proximité chimique des minerais employés. Il semble peu probable dans ces deux cas que la correspondance chimique soit due à la circulation du minerai.

D'autre part, le traitement multivarié a montré dans certains cas l'inadéquation entre les catégories définies *a priori* et les caractéristiques chimiques du mobilier archéologique. C'est le cas notamment pour l'ensemble 'Rabat', qui est en réalité constitué de deux entités chimiques

distinctes. Ces deux entités correspondent à deux sites de réduction, Stal de Bizou 01 (n° projet 09136\_3) et Pujols 01 (n° projet 09241\_1). Des sites d'extraction se trouvent dans l'environnement archéologique direct de chacun ces sites, respectivement la mine du Bois des Taillades (n° projet 09136\_1) et celle des Métairies (n° projet 09241\_2 ; \_5 ; \_6 ; \_7 ; \_8). Ceci laisse supposer qu'il s'agit des sources ayant alimenté chacun des deux ateliers, et que les minerais exploités possédaient des caractéristiques chimiques distinctes. La catégorie 'Rabat' ne peut donc être en tant que telle qualifiée d'ensemble chimique de production.

#### *Interprétation des caractéristiques chimiques des individus de la catégorie 'à déterminer'*

Les sites suivants ont été attribués à la catégorie 'à déterminer' car on ne disposait d'aucun argument suffisamment solide pour les attribuer à une catégorie définie sur la base du minerai exploité ou de l'emplacement géographique. Ces sites sont : Carnies 01 (n° projet 09241\_3) localisé dans la vallée de la Courbière (Rabat), Le Castel 01, Cimetière 02 et Le Pech 01 sur le plateau de Génat (respectivement 09133\_1 ; \_2 ; \_3), le site de Ferasse 04 (n° projet 09057\_4) dans la vallée de Massat, le site de la Mouline 03 (n° projet 09023\_2) à Ascou, la mouline d'Andronne 01 à Serres-sur-Arget dans la Barguillière (n° projet 09293\_2) et enfin le site du Port de l'Hers 01 (n° projet 09334\_6). Le cas de chacun de ces sites sera discuté individuellement ici afin de développer des interprétations propres à chaque contexte.

#### *Carnies 01 :*

Ce site a fait l'objet d'une notice dans le rapport de prospection thématique 2018 pour le département de l'Ariège (Alexandre Disser et Dubois 2018, 17-19). Ce site aurait fonctionné au cours des XVIIe et XVIIIe s. Son activité a cessé en 1805, suite au transfert de droit de feu à la forge d'Enfalits, située en aval dans la même vallée. Le site aurait employé le minerai du Rancié selon PF de Dietrich, qui en fait état dans son inventaire de 1786 (Dietrich 1786, 204). Néanmoins, plusieurs gisements de minerai de fer sont présents à proximité directe du site, et auraient pu avoir été exploités pour alimenter l'atelier. Nous avons voulu vérifier l'hypothèse de fourniture en minerai du Rancié en confrontant les caractéristiques chimiques des scories prélevées sur le site avec celles des individus intégrés dans la catégorie 'Rancié'. Pour constituer cette catégorie, nous avons décidé d'employer les sites pour lesquels l'emploi du minerai du Rancié paraissait certain. Nous y avons donc intégré les moulins et forges hydrauliques du Couserans postérieures à l'accord d'échange de minerai et de charbon de bois établi au XIVe s. entre la vicomté de Couserans et le comté de Foix. Les sites concernés sont donc Sérac 01 (n° projet 09322\_1) dans la vallée d'Ustou, la Forge Vieille d'Oust (n° projet 09223\_1). Nous y avons adjoint le site de Lercoul 02 (n° projet 09162\_2), car sa proximité directe avec le gisement du Rancié semblait assurer son alimentation par le minerai provenant de ce dernier.

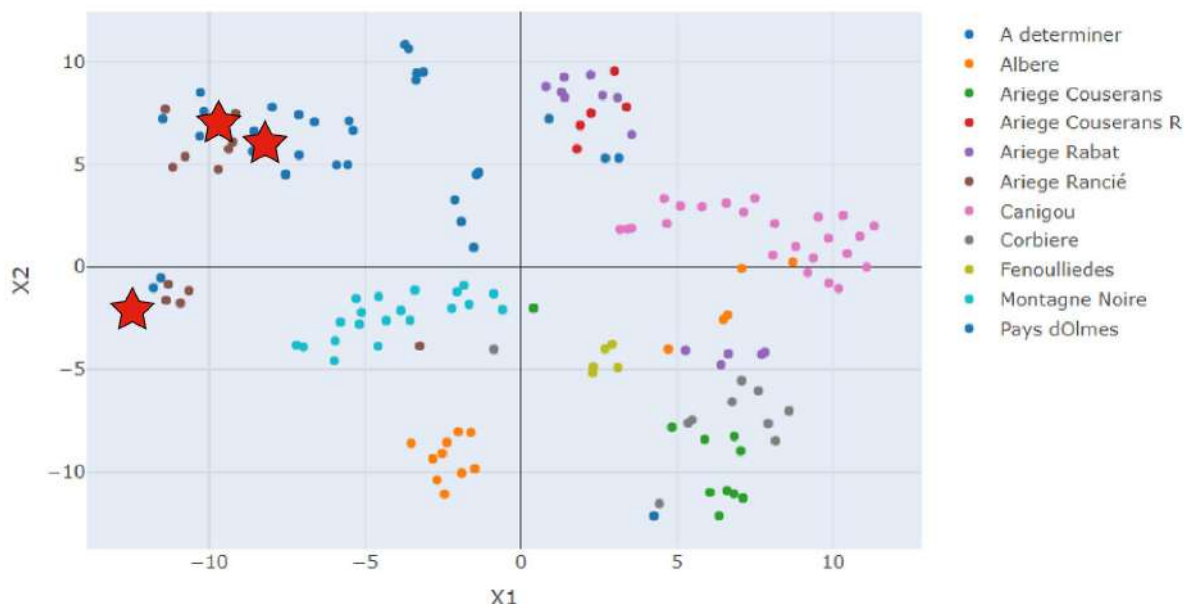


Figure 36 : position des individus de Carnies 01 dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34

Les trois scories analysées sont projetées à proximité directe des individus qui constituent la catégorie de référence 'Rancié'. Ceci valide l'alimentation du site au moyen du minerai de Rancié. Il est intéressant de noter que l'une des scories est plus compatible avec le deuxième *cluster* du Rancié, matérialisé par les scories de Lercoul 02. Il est donc envisagé que deux types de minerai du Rancié aient servi à alimenter Carnies 01.

*Castel 01, Cimetière 02 et Le Pech 01 (plateau de Génat) :*

Ces sites ont fait l'objet d'une notice dans le rapport de prospection thématique 2020 pour le département de l'Ariège (Alexandre Disser et al. 2020, 20-21). Une datation a également été effectuée sur un fragment de charbon issu d'une scorie du site du Pech 01, ayant livré un intervalle à 2 sigma de [1413 ; 1480] (Pagès et al. 2022). Cette datation était particulièrement surprenante compte tenu du contexte historique, marqué par un dynamisme très fort de la métallurgie hydraulique, qui semblait avoir supplanté totalement la réduction des minerais par ventilation naturelle ou musculaire (sites qualifiés de « forges à bras »). La proximité de la mine du Bois des Taillades déjà mentionnée auparavant, et située à une distance de marche d'environ 4 kilomètres par le col de Montgrenié, nous a amené à formuler l'hypothèse d'une activité périphérique employant des ressources disponibles à faible distance, en s'affranchissant du marché du minerai de fer qui se tenait à Vicdessos.

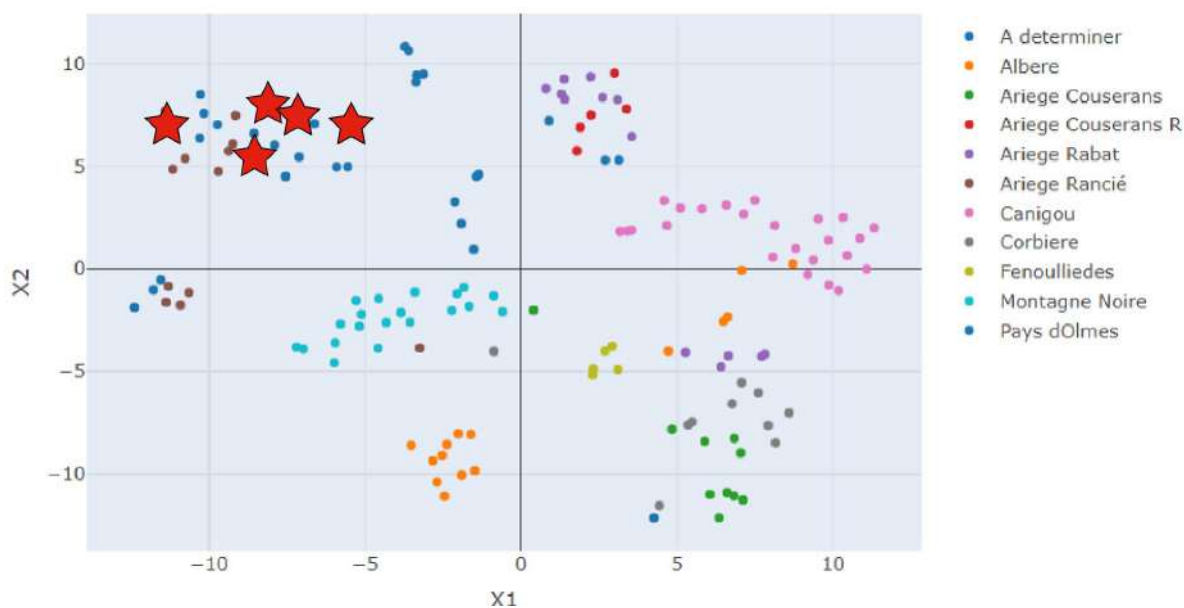


Figure 37 : position des individus de Castel 01, Pech 01 et Cimetière 02 (Génat) dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34

La position des 5 scories analysées pour les trois sites concernés suggère une compatibilité chimique avec la catégorie du 'Rancié'. On peut raisonnablement penser que les personnes ayant pratiqué la réduction de minerais de fer à Génat se soient fournies en matières premières sur le marché de minerai de Vicdessos. Il est également possible qu'elles aient profité du fait que le plateau de Génat soit sur un itinéraire possible de transport du minerai de Rancié vers d'autres vallées telles que celles de Saurat, de la Courbière (Rabat), ou de la Barguillière pour acheter une partie des minerais transportés. Quoiqu'il en soit, les données chimiques semblent exclure la possibilité d'une fourniture de minerai par d'autres sources, telles que la mine du Bois des Taillades. La chronologie des activités pose la question de la motivation des métallurgistes pour produire du fer à cet endroit dans un contexte qui paraît très concurrentiel. On pourrait penser que cette activité ait répondu à un renchérissement des prix du fer fuxéen, car la majeure partie du XVe s. est une période de crise pour la production sidérurgique au sein du comté, qui voit la production s'essouffler (Verna 2001, 307-12). La politique commerciale vis-à-vis du minerai prend également un caractère protectionniste. Gaston IV serait allé jusqu'à interdire en 1450 la vente du minerai du Rancié hors des frontières du comté. Mais ces difficultés n'auraient peut-être pas eu d'impact pour les habitants de Génat, qui font partie intégrante du comté. Ce contexte difficile pour l'industrie sidérurgique ariégeoise pourrait également expliquer la pratique de la réduction hors du modèle de la mouline. En effet, de nombreuses installations hydrauliques, dont l'entretien demande des ressources notables, semblent connaître des difficultés financières, contraignant parfois leurs propriétaires à les céder. Dans ce contexte, le fonctionnement de forges à bras aurait pu contribuer à répondre en partie à ces problèmes, en permettant de produire du métal avec des investissements moins conséquents. Enfin, le comté de Foix a connu, dans le dernier quart du XVe s. (de 1472 à 1512), de vives luttes politiques qui pourraient également avoir été cause de difficultés pour la sidérurgie comtale.

#### *Ferasse 04 (Vallée de Massat) :*

Le site de la Ferasse 04 a fait l'objet d'une notice dans le rapport de prospection thématique 2019 pour le département de l'Ariège (Alexandre Disser et Dubois 2019, 79-80) et a été sondé en 2021 pour établir la stratigraphie du site et réaliser des prélèvements pour datation (Pagès et

al. 2021, 156-58). A l'instar du site du Pech de Génat, la datation de ce site est étonnante ; les deux datations ont livré les intervalles suivants [1484 ; 1639] et [1521 ; 1798]. Il est donc probable que ce site ait fonctionné au XVI<sup>e</sup> s. Le volume probable de déchets accumulés laisse supposer que plusieurs dizaines voire centaines de tonnes de métal ont été produites sur le site, ce qui semble exclure la pratique d'une réduction ponctuelle du minerai. Plusieurs exploitations de minerai ont été mises en évidence dans la vallée de Massat, ce qui laissait supposer l'exploitation de minerais locaux. Néanmoins, l'approvisionnement en minerais de provenance plus lointaine, tels que celui de Rancié, ne pouvait être exclu.

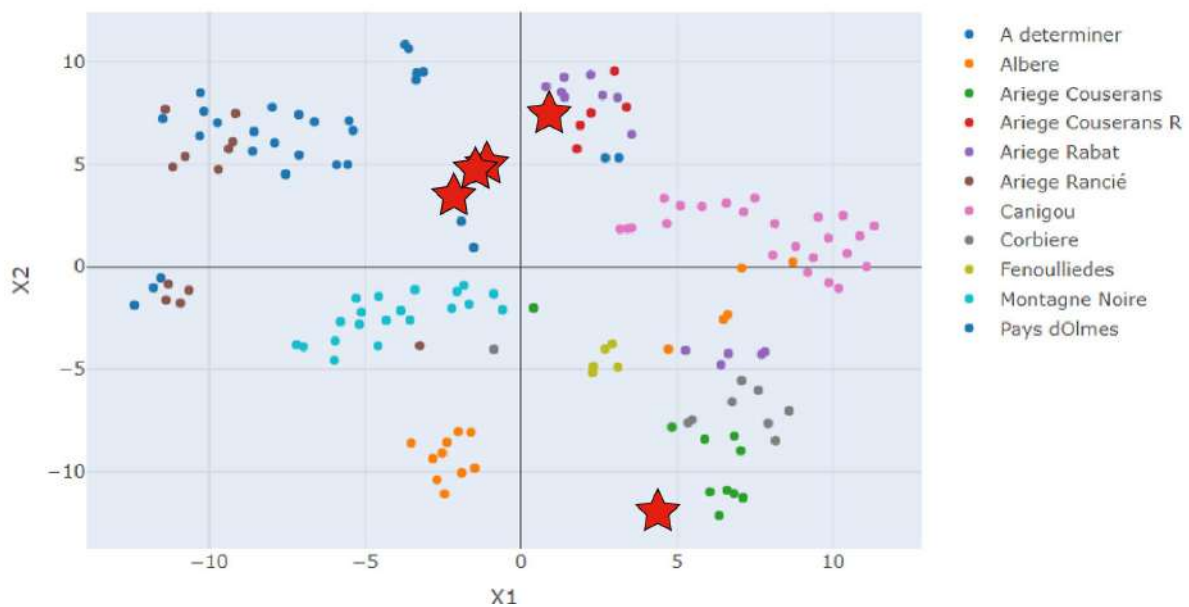


Figure 38 : position des individus de Ferasse 04 dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34

La position des individus analysés pour le site de Ferasse 04 ne permet pas d'associer ce site sans ambiguïté à l'un ou l'autre des ensembles de production définis précédemment. Il est très probable que plusieurs sources de minerai aient été utilisées pour approvisionner le site. La première pourrait être commune avec les sites de Pujols 01 et de Riverenert. Le transport de minerai depuis la mine de Riverenert en empruntant le chemin de crête entre le Pic de Calamane et la Serre de Goueil serait d'ailleurs relativement aisé, pour un parcours d'environ 11 kilomètres. Une autre scorie présente des caractéristiques chimiques similaires à celles de sites faisant partie de l'ensemble du 'Couserans'. Enfin, trois autres scories semblent chimiquement distinctes des ensembles chimiques de production définis à l'heure actuelle.

Les données disponibles suggèrent donc plusieurs sources d'approvisionnement en minerai pour ce contexte. Si l'identification de deux de ces sources semble relativement fiable, la troisième demeure inconnue à ce jour. Il est également intéressant de noter que le minerai du Rancié ne semble pas avoir été utilisé sur ce site, alors même que les sources écrites attestent de son utilisation par la plupart des forges hydrauliques qui se sont installées dans cette vallée aux époques moderne et contemporaine. Contrairement aux sites du plateau de Génat, qui semblent avoir fonctionné selon des modalités techniques proches, on a décidé dans ce cas d'avoir recours à d'autres sources de minerai, dont deux pourraient être localisées dans la vicomté de Couserans.

#### *La Mouline 03 (Ascou) :*

Le site de la Ferasse 04 a fait l'objet d'une notice dans le rapport de prospection thématique 2018 pour le département de l'Ariège (Alexandre Dissier et Dubois 2018, 69-71). Il est probable

que cette mouline ait fonctionné au courant du XVII<sup>e</sup> s., même si en l'absence de datation absolue sur le site, on ne peut être certains qu'il ne puisse s'agir de vestiges d'une installation plus ancienne. La question de la fourniture en minerai de ce site est ouverte, puisqu'aucune source écrite n'en fait mention. On sait toutefois que le minerai du Rancié approvisionnait des forges hydrauliques plus tardives dans ce secteur, au cours du XVIII<sup>e</sup> s. Rochechouart, propriétaire des forges d'Ascou et de Mijanès, a d'ailleurs tenté d'exploiter plusieurs gisements locaux pour réduire la part de minerai du Sabarthès dans l'approvisionnement de ses forges.

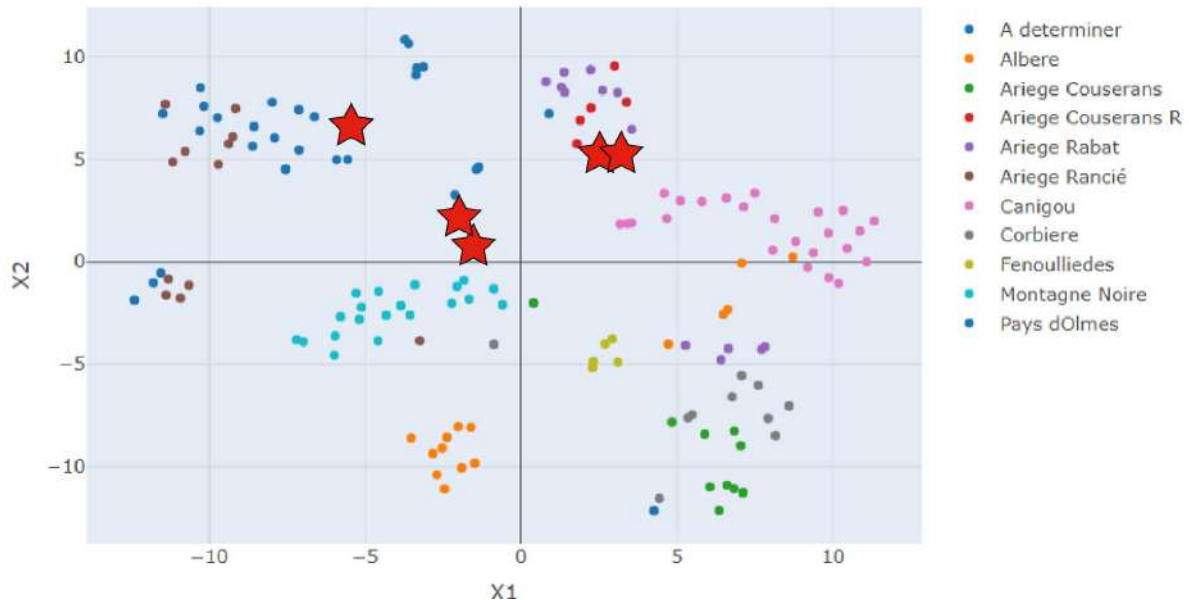


Figure 39 : position des individus de la Mouline 03 dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34

Les cinq analyses effectuées se répartissent en trois groupes. Un individu correspond chimiquement à l'un des ensembles chimiques du Rancié, tandis que deux autres sont proches du groupe formé par les scories de la vallée du Nert ('Couserans R') et du site des Pujols dans la vallée de Rabat. Deux autres échantillons sont proches chimiquement des scories examinées précédemment pour le site de la Ferasse 04 (vallée de Massat). Ces résultats indiquent que plusieurs sources de minerai ont probablement été employées pour l'approvisionnement de la mouline. Il est fort probable qu'une partie du minerai provienne du gisement du Rancié. D'autre part, il semble qu'au moins une source encore inconnue ait été utilisée. Enfin, il semble peu probable que la vallée du Nert ou celle de la Courbière aient fourni des minerais pour alimenter la mouline d'Ascou, et il est probable qu'un minerai aux caractéristiques chimiques similaires ait été utilisé pour les opérations ayant généré les deux fragments de scories dont les caractéristiques chimiques sont proches de celles de Riverenert et des Pujols.

#### Andronne 01 :

Le site de la Ferasse 04 a fait l'objet d'une notice dans le rapport de prospection thématique 2020 pour le département de l'Ariège (Alexandre Disser et al. 2020, 46-47). D'après les sources écrites à notre disposition, il semble que la mouline ait fonctionné durant environ un siècle, de la moitié du XIV<sup>e</sup> à la moitié du XV<sup>e</sup> s. D'après les travaux de C. Verna, la mouline aurait été alimentée en minerai de Château-Verdun (Verna 2001, 165) et du Vicdessos (Verna 2001, 149-50), qui devraient correspondre chimiquement à la catégorie 'Rancié'. Néanmoins, la possibilité d'une exploitation de ressources plus proches, et notamment les gisements du plateau d'Alzen situés à quelques kilomètres à l'ouest de la mouline, n'est pas à exclure. Un document daté de 1565 fait défense aux habitants de la Barguillière d'utiliser le minerai d'Alzen

(Cantelaube 2005, 335). Bien que ce texte soit postérieur à l'activité de la mouline d'Andronne, il est fort possible qu'il se réfère à une pratique alors en usage depuis longtemps.

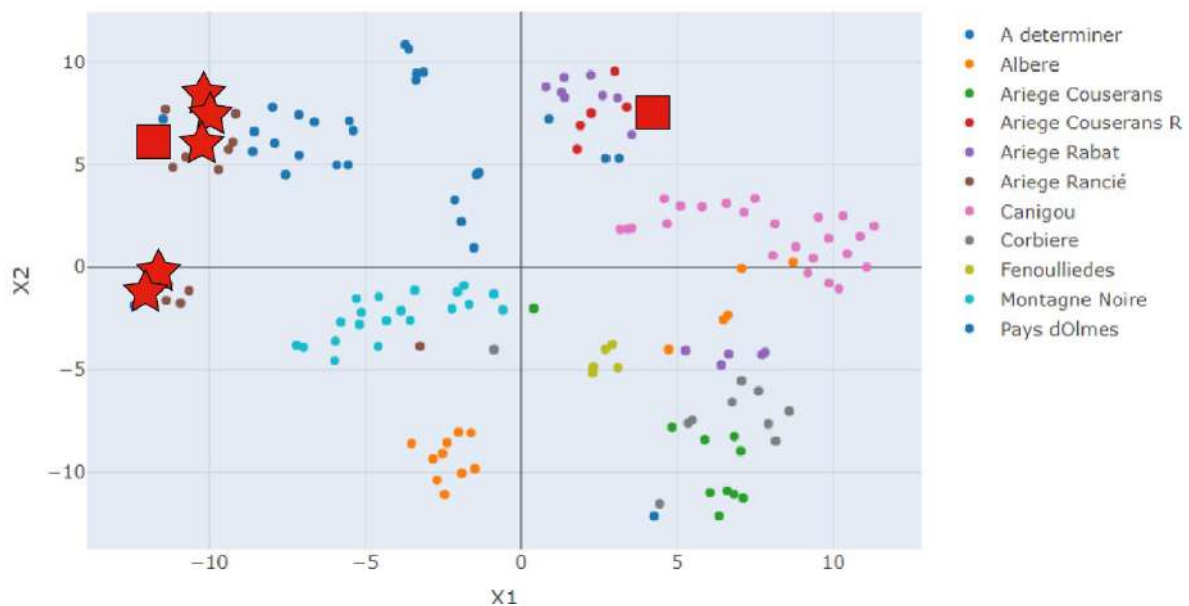


Figure 40 : position des individus d'Andronne dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34 ; les étoiles figurent les scories, les carrés représentent les minerais

Cinq scories de réduction et deux fragments de minerai ont été analysés pour la mouline d'Andronne. La position de cinq scories analysées dans l'espace réduit par la t-SNE montre une bonne compatibilité chimique avec les individus formant la catégorie 'Rancié'. Toutefois, tandis que la position d'un des deux minerais prélevés correspond bien aux caractéristiques chimiques de la catégorie 'Rancié', le deuxième est quant à lui placé à proximité des individus correspondant aux catégories 'Couserans R' (vallée du Nert) et du site des Pujols 01 dans la vallée de la Courbière ('Ariège Rabat'). Les résultats analytiques suggèrent dans ce cas que la mouline d'Andronne a été alimentée majoritairement par du minerai provenant du gisement ferrifère dévonien du Vicdessos. Les données archéométriques vont ici dans le même sens que les interprétations historiques. Néanmoins, la présence sur le site d'un fragment de minerai dont la signature chimique ne correspond pas à ce gisement suggère d'autres sources d'approvisionnement en minerai. Au vu de la quantité d'analyses réalisées à ce jour, dont la représentativité ne peut être évaluée à l'échelle du site, on peut émettre l'hypothèse que le minerai du Vicdessos domine la fourniture de la mouline, mais que d'autres sources de minerai ont été utilisées en complément. Les informations archéométriques collectées apportent dans ce cas des informations remettant en perspective les sources historiques. Elles suggèrent que dans les faits les usages peuvent diverger d'un cadre administratif défini sur la base de textes qui peuvent n'éclairer qu'une facette des stratégies d'approvisionnement en minerai, susceptibles d'être dans la réalité plus complexe.

#### Port de l'Hers 01 :

Le site du Port de l'Hers a fait l'objet d'une notice dans le rapport de prospection thématique 2020 pour le département de l'Ariège (Alexandre Disser et al. 2020, 14-15). Le site a également bénéficié de deux datations radiocarbone réalisées sur des charbons pris dans la scorie. La combinaison des deux dates a livré un intervalle à 2 sigma de [1224 ; 1275]. Il s'agit à notre connaissance du premier site sidérurgique du XIIIe s. mis en évidence dans le département de l'Ariège. La position du site, sur un tracé de franchissement important entre le comté de Foix et la vicomté de Couserans, et à distance des gisements de minerai de fer connus à l'heure

actuelle dans le secteur, ont amené à s'interroger sur les raisons d'implantation d'un site de réduction à cet endroit. La caractérisation chimique des scories semblait pertinente pour tenter de répondre à cette question.

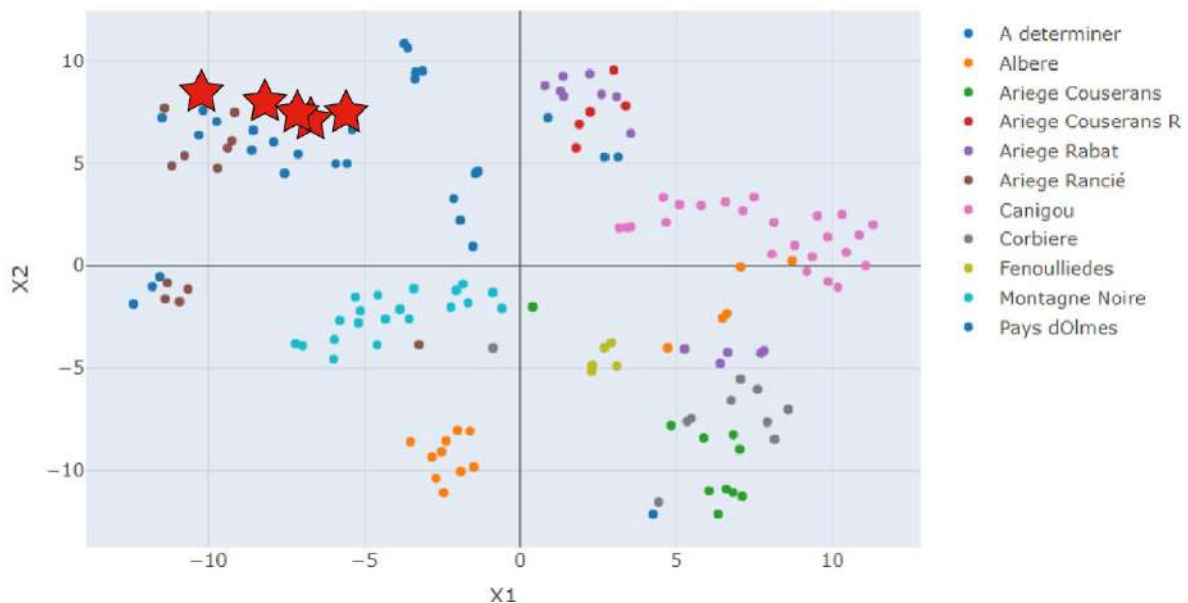


Figure 41 : position des individus de Port de l'Hers 01 dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34

La signature chimique des cinq scories de réduction sélectionnées pour ce site apparaît compatible avec les individus constituant la catégorie 'Rancié'. Il est donc très probable que le minerai du Vicdessos a été utilisé pour produire du fer à cet endroit. Ce résultat, mis en perspective par la localisation du site et sa chronologie, ouvre une réflexion intéressante sur la circulation des minerais du Vicdessos avant la formalisation en 1348 du traité d'échange de minerai (communauté du Vicdessos) contre du charbon de bois (vicomté de Couserans), qui a conditionné pour plusieurs siècles les relations commerciales entre ces deux entités. Le fait que nous ayons retrouvé, sur l'un des deux principaux itinéraires empruntés par le charbon de bois et le minerai, les traces d'un atelier de réduction dont les scories portent la signature chimique caractéristique du gisement de Rancié, suggère qu'on ait profité du transit de la matière première à cet endroit pour produire du fer. Ce pourrait dès lors être la présence sur place d'autres ressources, telles que le bois pour produire le combustible, qui aurait conditionné la mise en œuvre de cette activité. Si cette hypothèse s'avère correcte, l'activité du site de Port de l'Hers 01 matérialiserait ainsi une pratique d'échange antérieure de plusieurs décennies à l'accord contracté entre comté de Foix et vicomté de Couserans. Les données archéologiques et archéométriques soutiendraient en ce sens les réflexions formulées par C. Verna à partir de lettres patentes rédigées par Gaston II en 1343 (Verna 2001, 149), en leur donnant plus de profondeur chronologique. Cette thèse pourrait être étayée par la découverte en Couserans d'ateliers de réduction ayant fonctionné avant le XIV<sup>e</sup> s. en s'appuyant sur la réduction du minerai du Vicdessos.

Le programme de caractérisation chimique engagé dans le cadre du PCR FERAPO et du FEDER FERMAPYR a d'ores et déjà livré plusieurs informations dignes d'intérêt concernant l'économie des minerais de fer dans la partie orientale du massif pyrénéen aux périodes médiévale et moderne. Les analyses suggèrent dans plusieurs cas le recours à des sources de

minerais distinctes pour alimenter les ateliers de réduction, amenant à rediscuter le récit du monopole du Vicdessos pour la fourniture de minerai durant ces périodes. Analysées notamment par J. Cantelaube dans le cadre de sa thèse, les sources historiques livraient déjà plusieurs éléments dépeignant la volonté de divers acteurs de la sidérurgie, maîtres de forge et propriétaires, de mettre en valeur des sources de matières premières alternatives, vraisemblablement pour diminuer les coûts d'exploitation de leurs installations. Les sources historiques et archéologiques livrent une image de plus en plus précise d'un écosystème constitué par une intrication d'intérêts, parfois divergents, engageant une diversité d'acteurs aux poids politiques et économiques différents : communauté du Vicdessos, comté de Foix, maîtres de forge, mais aussi potentiellement des métallurgistes difficiles à identifier, car absents des sources écrites. Le fait de pouvoir disposer d'informations archéométriques sur des contextes bien définis spatialement et chronologiquement permet en ce sens de donner plus de substance à la trame historique tissée à partir des sources écrites. Pour traiter de ces questions dans le cadre de la présente triennale, on s'est focalisé sur les sites ariégeois, du fait de fortes orientations données par les recherches précédentes, et notamment les travaux historiques. On tâchera à l'avenir d'étendre ce type de réflexion à l'ensemble du territoire étudié afin de mettre en évidence de potentielles différences dans les stratégies d'approvisionnement en minerai. Ceci passera notamment par la prise en compte de secteurs de production qui n'ont pour l'instant pas encore été bien caractérisés, tels que le secteur du Puymorens.

#### *Bibliographie :*

- Calmés, C., et L. Grimbert. 2006. « Savignac-les-Ormeaux - Le Najar. Etude documentaire de la Forge de Savignac ». Rapport Final d'Opération. Toulouse: INRAP / Service Régional de l'Archéologie Midi-Pyrénées.
- Cantelaube, J. 2005. *La forge à la catalane dans les Pyrénées ariégeoises, une industrie à la montagne, XVII-XIX siècle*. Toulouse, France: CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail.
- Desaulty, A.-M., P. Dillmann, M. L'Heritier, C. Mariet, B. Gratuze, J.-L. Joron, et P. Fluzin. 2009. « Does It Come from the Pays de Bray? Examination of an Origin Hypothesis for the Ferrous Reinforcements Used in French Medieval Churches Using Major and Trace Element Analyses ». *Journal of Archaeological Science* 36 (octobre): 2445-62. <https://doi.org/DOI.10.1016/j.jas.2009.07.002>.
- Dietrich, P.-F. 1786. *Description des gîtes de minerai, des forges et des salines des Pyrénées: suivie d'observations sur le fer mazé et sur les mines des Sardes en Poitou*. Paris, France: chez Didot, fils aîné, et Cuchet.
- Disser, A., P. Dillmann, M. Leroy, M. L'Héritier, S. Bauvais, et P. Fluzin. 2016. « Iron supply for the building of Metz cathedral: new methodological development for provenance studies and historical considerations ». *Archaeometry* 58.
- Disser, Alexandre, et Claude Dubois. 2018. « Mines et métallurgie du fer pour les périodes historiques dans le département de l'Ariège. Rapport de prospection thématique 2018 ».
- . 2019. « Mines et métallurgie du fer pour les périodes historiques dans le département de l'Ariège. Rapport de prospection thématique 2019 ».
- Disser, Alexandre, Claude Dubois, Philippe Cabau, Fernandez, Florence Guillot, et Jean-Noël Lamiable. 2020. « Mines et métallurgie du fer pour les périodes historiques dans le département de l'Ariège. Rapport de prospection thématique 2020 ».
- Dubois, C. 2000. « Lercoul (Pyrénées ariégeoises). Un site sidérurgique du IIIe s. de notre ère ». In *Mines et métallurgies en Gaule. Recherches récentes*, 1:53-62. Gallia 57. Paris: CNRS Editions.
- François, J. 1843. *Recherches sur le gisement et le traitement direct des minerais de fer dans les Pyrénées et particulièrement dans l'Ariège*. Carilian-Goeury et Dalmont.

- Husson, F., J. Josse, et J. Pagès. 2010. « Principal component methods - hierarchical clustering - partitionnal clustering: why would we need to choose for visualizing data ? » Traduit par Applied Mathematics Department. Technical Reports - Agrocampus. Rennes: Agrocampus.
- Leroy, S. 2010. « Circulation au Moyen Age des matériaux ferreux issus des Pyrénées Ariégeoises et de la Lombardie. Apport du couplage des analyses en éléments traces et multivariées. » Université de Technologie de Belfort Montbéliard.
- Leroy, S., S. X. Cohen, C. Verna, B. Gratuze, F. Téreygeol, P. Fluzin, L. Bertrand, et P. Dillmann. 2012. « The medieval iron market in Ariège (France). Multidisciplinary analytical approach and multivariate analyses ». *Journal of Archaeological Science* 39: 1080-93.
- Pagès, Gaspard, Alexandre Disser, Maxime L'Héritier, Jordi Mach, et Manon Gosselin. 2022. « Programme Collectif de Recherche (2021-2023) le FER en Ariège et dans les Pyrénées-Orientales (PCR FERAPO) ». Programme Collectif de Recherche 76-2022-0364. Montpellier: Ministère de la Culture.
- Pagès, Gaspard, Alexandre Disser, Jordi Mach, et Maxime L'Héritier. 2021. « Programme Collectif de Recherche (2021-2023) le FER en Ariège et dans les Pyrénées-Orientales (PCR FERAPO). Rapport intermédiaire 2021 ». Programme Collectif de Recherche 76-2022-0364. Montpellier: Ministère de la Culture.
- Picot de la Peyrouse, P.-I. 1786. *Traité sur les mines de fer et les forges du comté de Foix*. Toulouse: D. Declassan.
- Richard, Tom. 1838. *Etudes sur l'art de d'extraire immédiatement le fer de ses minerais*. Paris: L. Mathias.
- Verna, C. 2001. *Le temps des Moulines. Fer, technique et société dans les Pyrénées centrales (XIIIe - XVIe siècles)*. Paris: Publications de la Sorbonne.

## Vers un nouveau triennal 2024-2026

Depuis pratiquement 10 ans et le commencement des programmes sur le fer en Ariège et dans les Pyrénées-Orientales (1. Le fer antique et médiéval du massif du Canigou et des Pyrénées-Orientales sous la direction de Gaspard Pagès en 2014, 2. Mines et métallurgie du fer pour les périodes historiques dans le département de l'Ariège sous la direction d'Alexandre Disser en 2017 et 3. PCR FERAPO 2021-2023), nous comptabilisons plus de 700 sites métallurgiques liés à la métallurgie du fer dans ces départements. Une dizaine de sites antiques républicains liés à l'exploitation de la galène ont aussi été requalifiés avec précisions Figure 42. Plus de 700 charbonnières ont été également inventoriées précisément.

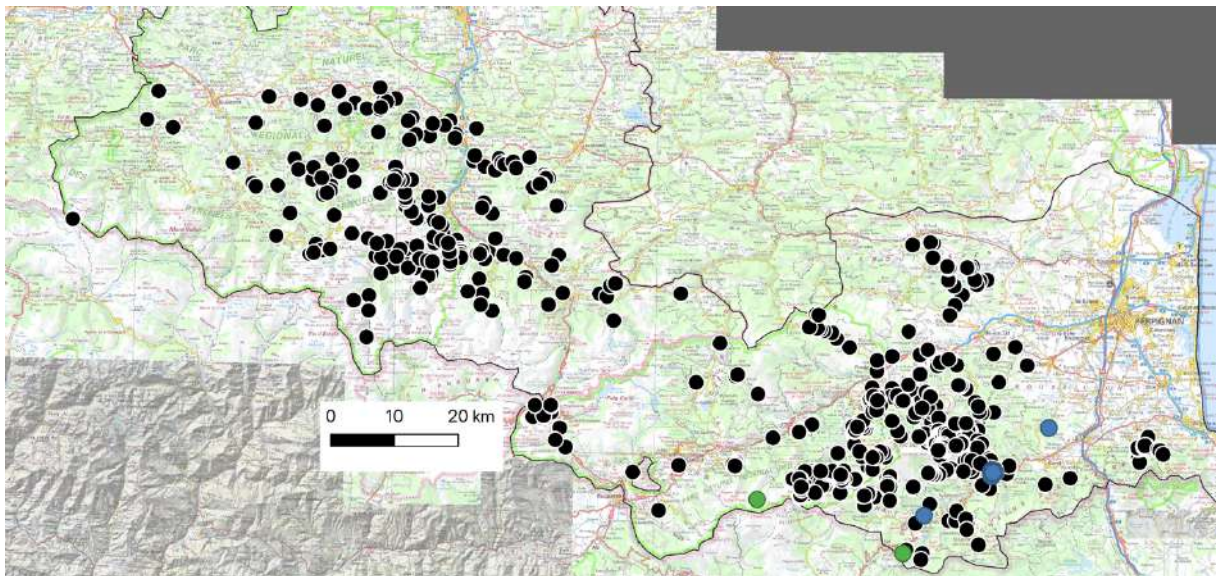


Figure 42 : Les 714 sites sidérurgiques (noir), les 10 sites miniers de galène (bleu) et les 2 sites miniers cuivreux (vert) inventoriés.

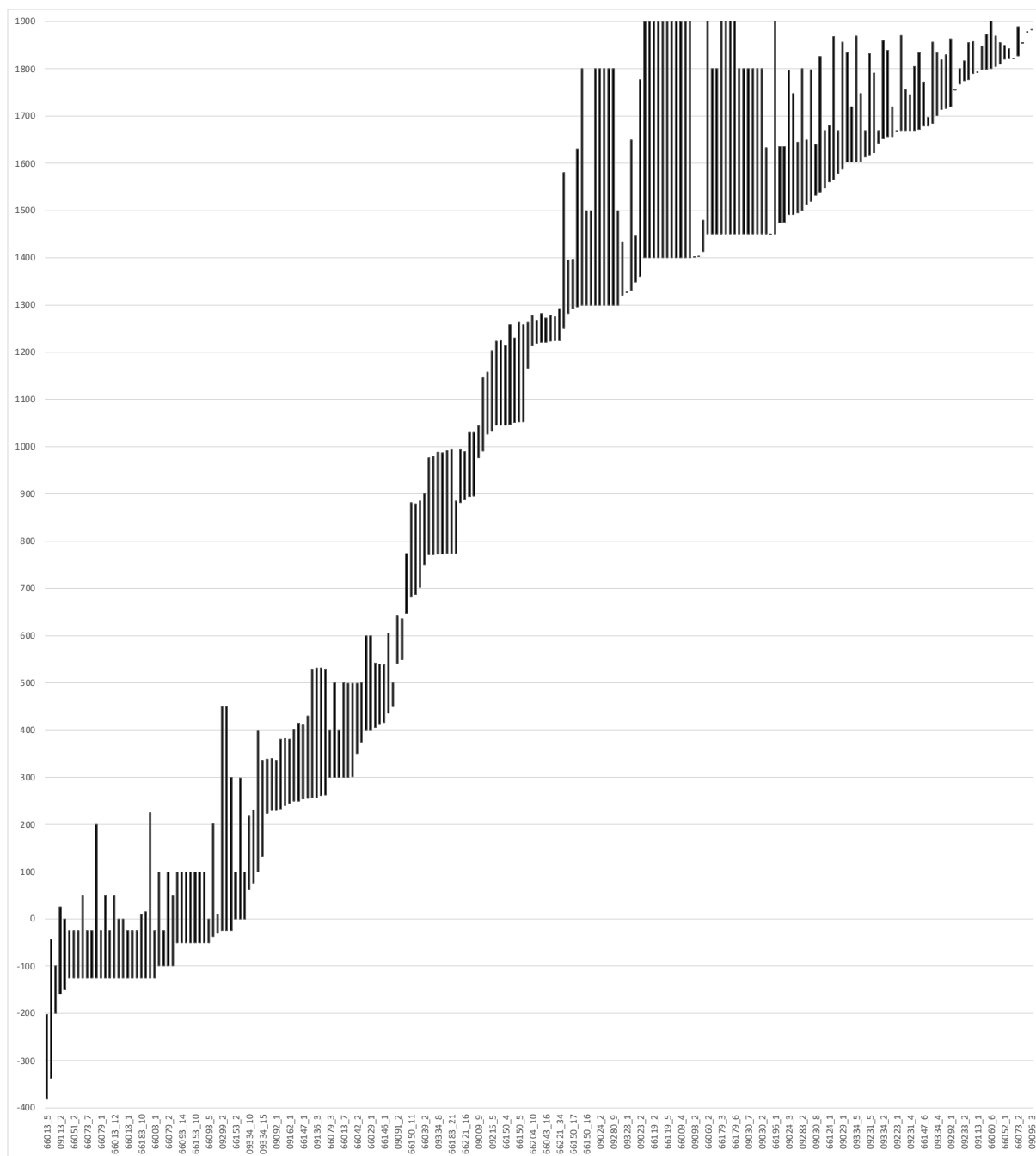


Figure 43 : les bornes chronologiques inférieures et supérieures du fonctionnement de tous les sites de réduction datés (tarditionnels et hydraulique) dans les départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales.

En observant les Figure 42 et Figure 43 plusieurs constats peuvent être avancés. L'Ariège et les Pyrénées-Orientales possèdent de très nombreux ateliers sidérurgiques partout et toutes périodes confondues. Cette vision généraliste est à manipuler avec précaution en réalité. Le territoire étudié est un territoire de montagne que l'on ne peut pas observer à plat. Il existe de grandes disparités géographiques qui sont détaillées dans la section III de ce rapport. Quant à la chronologie, il faut aussi éviter de la saisir comme un bloc homogène comme cela est également détaillé dans la section III. Les exploitations sont nombreuses pendant l'Antiquité, mais avec de grande différence selon la période prise en compte (période tardo-républicaine, Haut-Empire, Bas-Empire etc.). À noter que la période wisigothique est très peu observée sur ce territoire hormis principalement dans le secteur du Puymorens. À noter aussi que la fin de la

période wisigothique constitue un hiatus très fort dans l'exploitation métallurgique des 2 départements. Ce n'est là qu'une partie des conclusions. Par exemple, nous pouvons aussi mettre en avant au terme de ce triennal deux faits marquants chronologiques : d'une part, il semble exister une métallurgie protohistorique autour du IV<sup>e</sup> – III<sup>e</sup> s. avant notre ère dans la vallée de la Lentilla sur la commune Baillestavy (66). Ceci est une donnée majeure à discuter encore. D'autre part, au moins 4 sites hydrauliques bien conservés datés de la 2<sup>e</sup> moitié du XIII<sup>e</sup> s. ont été découverts et peuvent servir des études plus fines sur cette innovation majeure qu'est l'introduction de la force hydraulique dans les techniques métallurgiques médiévales. Toutes ces considérations géographiques et chronologiques peuvent également désormais être mises en regard de données chimiques pour préciser les minerais exploités, les techniques employées et définir la signature chimique des ateliers. Ce volet est développé en détail dans la section IV. Ce sont là quelques brèves lignes de conclusions que nous espérons continuer à fournir dans un prochain triennal (2024-2026).

## Table des figures

Figure 1 : PCR FERAPO, copie d'arrêté de décision du préfet de région.....	7
Figure 2 : Modèle numérique de terrain obtenu à partir du traitement du Lidar HD de l'IGN 30	
Figure 3 : Scorie fayalitique collectée sur le site de Pratch de Moulino 01, à Arbas .....	31
Figure 4 : Scorie vitreuse collectée sur le site de Pratch de Moulino 01, à Arbas.....	31
Figure 5 : Les 714 sites sidérurgiques (noir), les 10 sites miniers de galène (bleu) et les 2 sites miniers cuivreux (vert) inventoriés.....	36
Figure 6 : les sites miniers ferreux qui remonte à l'Antiquité (noir), au Moyen-Âge (rouge) et à l'Époque moderne (bleu). .....	37
Figure 7 : les 108 sites utilisant la force hydraulique inventoriés dans le programme.....	38
Figure 8 : les sites hydrauliques pour lesquels des datations C14 sur charbon de bois ont été réalisées.....	39
Figure 9 : les dates C14 brutes et calibrées des sites hydrauliques avec le code de traitement OxCal .....	40
Figure 10 : les 108 sites utilisant la force hydraulique et leur datation .....	41
Figure 11 : les 416 sites de réduction directe non hydrauliques datés (110 ronds noirs pleins) et non datés (306).....	43
Figure 12 : les espaces sidérurgiques des Pyrénées-Orientales (sans le Puymorens) qui sont définis grâce à la répartition des sites de réduction directe non hydrauliques.....	44
Figure 13 : les espaces sidérurgiques d'Ariège (avec le Puymorens qui est dans les Pyrénées-Orientales) qui sont définis grâce à la répartition des sites de réduction directe non hydrauliques.....	45
Figure 14 : séries comparées des concentrations des éléments d'intérêt .....	85
Figure 15 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 87 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Th, U ; facteurs pris en compte PC1 à PC4.....	86
Figure 16 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2 ; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 15.....	87
Figure 17 dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 87 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu ; facteurs pris en compte PC1 à PC4.....	88
Figure 18 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2, après retrait des individus provenant de la base CHIPS; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 19 .....	89
Figure 19 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 67 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Pr, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Er, Lu, Th, U ; facteurs pris en compte PC1 à PC3 .....	90
Figure 20 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2, après retrait des individus provenant de la base CHIPS; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 21 .....	91
Figure 21 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 67 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Pr, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Er, Lu ; facteurs pris en compte PC1 à PC3 .....	92
Figure 22 : Teneur en manganèse des échantillons de minerai (n=89) analysés dans le cadre du PCR ainsi que des minerais intégrés au préalable dans la base CHIPS.....	95

Figure 23 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2,pour la totalité du corpus de scories étudiées; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 24 .....	96
Figure 24 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 149 échantillons de scories provenant de sites métallurgiques ; variables : log-ratios de Y, Nb, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Hf, Th, U ; facteurs pris en compte PC1 à PC3.....	98
Figure 25 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2,pour la totalité du corpus de scories étudiées; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 26 .....	99
Figure 26 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 194 échantillons de scories provenant de sites métallurgiques ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb ; facteurs pris en compte PC1 à PC4.....	100
Figure 27 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2,pour les scories analysées dans le cadre des programmes FERAPO et FERMAPYR; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 28 .....	101
Figure 28 dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 149 échantillons de scories provenant de sites métallurgiques ; variables : log-ratios de Y, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Hf, Th et U ; facteurs pris en compte PC1 à PC3.....	102
Figure 29 : Contribution des variables sur le plan factoriel PC1-PC2,pour les scories analysées dans le cadre des programmes FERAPO et FERMAPYR; analyse en composantes principales sur laquelle se base la classification présentée en Figure 30 .....	103
Figure 30 : dendrogramme présentant les résultats de l'analyse HCPC réalisée sur 87 échantillons de minerai provenant de sites d'extraction ; variables : log-ratios de Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu ; facteurs pris en compte PC1 à PC3 .....	104
Figure 31 : Positions des 194 analyses de scories dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, Nb, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Hf, Th, U .....	106
Figure 32 : Positions des 194 analyses de scories dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb.....	107
Figure 33 : Positions des 149 analyses de scories dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Hf, Th et U .....	108
Figure 34 : Positions des 149 analyses de scories dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu.....	108
Figure 35 : Positions des 149 analyses de scories dans l'espace réduit par t-SNE ; variables : Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu ; résultats d'une classification ascendante hiérarchique réalisée sur les coordonnées des individus sur l'espace réduit .....	109
Figure 36 : position des individus de Carnies 01 dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34 .....	113
Figure 37 : position des individus de Castel 01, Pech 01 et Cimetière 02 (Génat) dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34 .....	114
Figure 38 : position des individus de Ferasse 04 dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34 .....	115
Figure 39 : position des individus de la Mouline 03 dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34 .....	116
Figure 40 : position des individus d'Andronne dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34 ; les étoiles figurent les scories, les carrés représentent les minerais .....	117
Figure 41 : position des individus de Port de l'Hers 01 dans l'espace réduit de la t-SNE présentée en Figure 34 .....	118
Figure 42 : Les 714 sites sidérurgiques (noir), les 10 sites miniers de galène (bleu) et les 2 sites miniers cuivreux (vert) inventoriés. ....	121

Figure 43 : les bornes chronologiques inférieures et supérieures du fonctionnement de tous les sites de réduction datés (traditionnels et hydraulique) dans les départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales. .... 122

#### Table des tableaux

Tableau 1 : Table des matières des 15 sites métallurgiques découverts en 2023. .... 13

Tableau 2 : Résultats des analyses par pXRF de deux scories prélevées sur le site de Pratch de Mouliño 01 ..... 32

Tableau 3 : géoréférencement en Lambert 93 des charbonnières découvertes en 2022 et 2023. .... 35

Tableau 4 : Nombre de sites concernés par les données chimiques collectées..... 83

## Table des matières

Sommaire .....	2
Avant-propos.....	2
Section I : Données administratives, techniques et scientifiques.....	3
1. Fiche signalétique.....	3
Nature et références de l’opération .....	3
Responsable scientifique de l’opération et organisme de rattachement .....	3
Localisation.....	3
Dates d’intervention sur le terrain.....	3
Mots-clés.....	3
2. Générique de l’opération.....	3
Equipe de prospection et/sondage (par ordre alphabétique) entre 2021 et 2023 .....	3
Analyse des archéomatériaux (par ordre alphabétique) entre 2021 et 2023 .....	4
Anthracologie entre 2021 et 2023.....	4
Céramologue entre 2021 et 2023 .....	4
Photographies, photogrammétrie et couverture 3D entre 2021 et 2023 .....	4
SIG et Web SIG 2021 et 2023 .....	4
Histoire entre 2021 et 2023.....	4
Gestion administrative 2023 .....	5
Financements 2023 .....	5
Section II : Inventaire détaillé.....	8
1. Préambule.....	8
2. animations scientifiques entre 2021 et 2023 .....	9
Publications scientifiques : .....	9
Rapport INRAP.....	10
Colloques .....	10
Enseignements universitaires :.....	11
Conférences grand public : .....	12
Site internet :.....	12
2. Les 15 sites métallurgiques découverts en 2023 .....	13
3. Notices complémentaires aux découvertes archéologiques .....	29
Découverte d’un site métallurgique à Arbas (Haute-Garonne) : .....	29
Bibliographie.....	33
2. Les 108 charbonnières découvertes en 2022 et 2023 .....	34
Section III : Synthèse géographique et chronologique des découvertes .....	36
1. Les mines de fer .....	36

2. Les établissements sidérurgiques hydrauliques (postérieurs à le 2 <sup>e</sup> moitié du XIII <sup>e</sup> s.) .....	38
3. Les espaces sidérurgiques de réduction directe en bas fourneau .....	43
La chronologie des espaces sidérurgiques de réduction directe en bas fourneau .....	45
Ariège.....	46
Arize.....	46
Couserans.....	47
Vicdessos .....	49
Trois Seigneurs .....	52
Barthélémy.....	53
Moyenne Ariège.....	54
Couserans ouest .....	55
Olmes .....	56
Entre Ariège et Pyrénées Orientale, le secteur du Puymorens.....	57
Pyrénées-Orientales .....	59
Bas Lentilla – discussion autour de la question de la métallurgie gauloise.....	59
Bas Lentilla .....	61
Bas Llech .....	64
Conflent.....	65
Haut Aspres.....	67
Bas Vallespir.....	70
Bas Aspres .....	72
Albères .....	73
Agly.....	74
Haut Lentilla .....	75
Cady .....	77
Balatg.....	79
Pla Guilhem .....	80
Section IV : Minerai et scorie, synthèse concernant leur composition chimique .....	82
1. Etat de la documentation chimique en 2023 .....	82
2. Protocole de sélection, de prélèvement et d'analyse : .....	82
3. Analyse générale.....	83
6. Les Minerais.....	84
Les caractéristiques chimiques des minerais analysés pour les sites d'extraction.....	84
Analyses statistiques multivariées : .....	86
La question des minerais manganésifères.....	92
7. Les scories.....	95

Analyse multivariée du jeu de données complet.....	96
Analyse multivariée du jeu de données réduit .....	101
Classification du corpus d’analyses de scories par t-SNE .....	105
Remarques conclusives sur l’exploration multivariée des données chimiques : .....	109
8. Les informations nouvelles apportées par les données chimiques sur la définition d’ensembles chimiques de production et la circulation des minerais .....	110
Interprétation des caractéristiques chimiques des individus de la catégorie ‘à déterminer’ .....	112
Carnies 01 : .....	112
Castel 01, Cimetière 02 et Le Pech 01 (plateau de Génat) : .....	113
Ferasse 04 (Vallée de Massat) : .....	114
La Mouline 03 (Ascou) : .....	115
Andronne 01 : .....	116
Port de l’Hers 01 : .....	117
Bibliographie : .....	119
Vers un nouveau triennal 2024-2026 .....	121
Table des figures .....	124
Table des tableaux .....	126
Table des matières .....	127