



HAL
open science

Programme CUPRUM Mauritanie 7e mission de recherche

Antoine Courcier, Hamza Benattia, Hassan Hachami, Moad Radi

► **To cite this version:**

Antoine Courcier, Hamza Benattia, Hassan Hachami, Moad Radi. Programme CUPRUM Mauritanie 7e mission de recherche. [Rapport de recherche] UMR 5608 TRACES, SRA, Région Occitane. 2022. hal-03774631

HAL Id: hal-03774631

<https://hal.science/hal-03774631>

Submitted on 21 Sep 2022

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.

Projet Franco-Mauritanien

« *CUivre : PRoduction et Usages à l'Holocène en Mauritanie* »

CUPRUM - Dynamiques !

Rapport d'activités

7^{ème} campagne de recherche

- 2022 -

Antoine Courcier

Directeur du programme, chercheur associé au Centre Jacques Berque

avec les contributions de

Hamza Benattia Melgarejo

Doctorant à l'Université de Barcelone
Directeur de la mission de prospections 2022

Hassan Hachami

Doctorant à l'INSAP
Archéozoologie et Morphométrie 3D

&

Moad Radi

Doctorant à l'INSAP
Lithicien, spécialiste des haches polies



Introduction	3
	4
1) Formation des étudiants marocains à l'archéoméallurgie	4
1.1) Sensibilisation à la géologie et métallogénie locales	4
1.2) Lecture des traces anthropiques dans le paysage	4
1.3) Etude des indices métallurgiques archéologiques	4
1.4) Utilisation des outils du SIG pour les métallurgies anciennes	4
1.5) Présentation des résultats dans un cours de master d'archéologie	5
2) La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain : des mines aux objets finis	6
2.1) cadres de l'étude	7
2.1.a) La zone de recherche	7
2.1.b) Le cadre géologique et métallogénique	7
2.2) Problématique	16
2.3) Notions générales sur les métallurgies du cuivre	17
2.3.a) Terminologie	17
2.3.b) Une chaîne opératoire ?	17
2.4) Démarche de recherche	19
2.4.a) Données publiques	19
2.4.b) Enquêtes locales	19
2.4.c) Prospections	20
2.4.d) Enregistrement cartographique sur SIG	20
2.4.e) Retour vers le département de géologie du Ministère des mines et vers l'ONHY	21
2.5) Objectifs visés	22
2.5.a) Déterminer les matières premières locales liées à la métallurgie	22
2.5.b) Caractériser les sites extractifs : description, estimation date exploitation	23
2.5.c) Prélèvement d'échantillons	23
2.6) Les sites d'extraction de cuivre	24
2.6.a) Le bassin de l'Oued Emsa	26
2.6.b) Le bassin de l'Oued Laou	31
2.6.c) Le bassin de l'Oued Stehat	37
2.6.d) Le bassin de l'Oued Hamza	40
2.6.e) Le bassin de l'Oued Sidi Yahya Aarabi	41
2.6.f) Le bassin de l'Oued Jnan Nich	42
2.7) Les indices métallurgiques au niveau des sites	45
2.7.a) Kach-Kouch	45
2.7.b) Le site métallurgique de Stehat-22	50
3) Perspectives	54
3.1) Recherches de terrain	54
3.2) Recherche en laboratoire	54
3.3) Recherche géoarchéologiques	54
Bibliographie	55

Introduction

Après deux ans sans mission de terrain en Mauritanie, pour des raisons de crise sanitaire, dans un contexte politico-diplomatique différent de celui de 2019 et avec le refus des institutions d'établir des conventions avec les partenaires du programme CUPRUM, aucune mission n'a pu être organisée en 2022 en Mauritanie (voir détails dans la lettre jointe au dossier).

Avec l'accord de la commission des fouilles et la direction du Centre Jacques Berque, le reliquat important de crédits 2021 a été utilisé pour organiser une mission au Maroc. Cette mission s'est appuyée sur le projet Kach-Kouch, dirigé par Hamza Benattia Melgarejo, dans la région du Rif Marocain (Fig. 1). Cette recherche de terrain consiste en une expertise des indices métallurgiques préhistorique dans l'aire de recherche du projet Kach-Kouch. J'ai été contacté par son directeur afin de mettre à profit mon expérience en archéométagurgie des cultures préhistorique. Il s'agit de rechercher les traces des métallurgies préhistoriques de cuivre depuis les sites d'extractions (mines) jusqu'aux objets finis en passant par les indices de métallurgies extractrices.

La mission de terrain s'est déroulée du 14 février au 5 mars 2022 du bassin de l'oued Emsa à celui de l'oued Jnan Nich de leur basses à leur moyennes vallées (Fig. 1). La base de recherche se situe dans la ville d'Oued Laou. L'équipe réduite se composait de deux étudiants marocains en doctorat à l'INSAP, du directeur du projet Kach-Kouch et de moi-même.

Les objectifs visés sont doubles : 1- formation des étudiants marocains et 2- identifications des métallurgies cuprifères préhistoriques.

Il s'agit de la première mission archéologique au Maroc visant à étudier l'ensemble de la chaîne opératoire des métallurgies préhistoriques de cuivre. Les nombreuses découvertes réalisées au cours de cette recherche de terrain devraient permettre de contribuer à une meilleure compréhension de ces métallurgies et de leurs implications dans les cultures préhistoriques du Maroc.

1) Formation des étudiants marocains à l'archéométaballurgie

L'étude des métallurgies anciennes selon une approche archéométaballurgique consiste en une étude systémique et pluridisciplinaire. J'ai tenté d'enseigner cette démarche de recherche auprès des étudiants.

1.1) Sensibilisation à la géologie et métallogénie locales

J'ai formé les étudiants marocains aux grands traits de la géologie et à l'évolution géodynamique du Rif. Il s'agissait de leur présenter les grandes structures géologiques caractérisant cette région ainsi que les roches qui les caractérisent. L'objectif est que les étudiants soient en mesure d'identifier les faciès géologiques et les encaissements lors des prospections.

Je leur ai enseignés les grands principes métallogéniques de formation des gîtes cuprifères. J'ai ensuite approfondi la formation en leur présentant les caractéristiques des gîtes métallifères dans la région du Rif. Sur le terrain, j'ai formé les étudiants à l'identification des différents minerais. Avec l'aide des outils optiques à notre disposition, nous avons poursuivi la formation par une étude pétrologique des échantillons de minerais collectés.

1.2) Lecture des traces anthropiques dans le paysage

J'ai amorcé cette formation en leur présentant les structures anthropiques liées à la métallurgie qui ont été identifiées en Mauritanie. Puis sur le terrain, je leur ai appris à lire le paysage et à identifier les différentes structures anthropiques : fronts de taille, mines, zone de concassage, fours métallurgiques, crassiers *etc.*

Progressivement, ils ont acquis une autonomie dans le repérage et l'enregistrement des caractéristiques de ces structures. Plusieurs sites archéologiques ont été découverts par les étudiants.

1.3) Etude des indices métallurgiques archéologiques

Le directeur du projet Kach-Kouch m'a sollicité pour étudier des artefacts découverts dans des niveaux probablement en lien avec des activités métallurgiques.

J'ai profité de cette opportunité pour former les étudiants à l'identification macroscopique des scories et aux céramiques techniques liées à la métallurgie de cuivre. J'ai alterné entre une formation théorique, en s'appuyant sur des exemples connus dans d'autres sites, et un enseignement pratique avec l'étude des indices découverts lors des fouilles à Kach-Kouch.

Les étudiants sont désormais à même d'identifier les indices métallurgiques lors des futures campagnes de fouilles à Kach-Kouch.

1.4) Utilisation des outils du SIG pour les métallurgies anciennes

J'ai formé un étudiant à l'enregistrement et aux croisements des données connexes à l'archéologie pour l'étude par SIG des métallurgies anciennes. Cet étudiant, spécialiste de SIG, n'avait jamais utilisé de données connexes à l'archéologie pour une étude pluridisciplinaire.

Avec patience, je lui ai expliqué la démarche de saisie et de croisement des données. A l'issue de 3 jours de formation intensifs, il a été à même d'enregistrer les données de terrain et de réaliser des croisements de données. Ce travail sur le SIG a permis d'ajuster les objectifs journaliers et d'avoir une démarche proactive.

1.5) Présentation des résultats dans un cours de master d'archéologie

Le 4 mars, j'ai présenté, avec l'équipe, à l'ensemble des étudiants en master d'archéologie préhistorique de l'INSAP les résultats préliminaires de cette mission de terrain dans le Rif Marocain.

J'ai sensibilisé les étudiants à la démarche de recherche interdisciplinaire et systémique qui a permis de collecter autant de données.

2) La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain : des mines aux objets finis

Etat de l'art

Au Maroc, aucun indice de production métallurgique daté de la Préhistoire n'a encore été découvert. La métallurgie du cuivre, qui remonterait au 4^e millénaire, n'est à ce jour connue qu'au travers d'objets dont l'origine serait septentrionale (Bokbot, 1991 à 2012 ; Bokbot et al., 1995 et 2008 ; Chenorkian, 1988 ; Daugas 2002 ; Robion-Brunner, 2018 ; Souville 1986 ; Tauveron, 1992 ; Wally, 1975).

Les récentes fouilles sur le site de Kach-Kouch, située dans la région du Rif et daté de la fin du 2^e millénaire, ont mis au jour des indices liés à la production métallurgique. Ces découvertes relancent la question des débuts de la métallurgie du cuivre au Maroc. L'approche scientifique est novatrice, nous avons décidé d'aborder cette problématique depuis le début de la chaîne opératoire : les sites d'extraction des minerais. A ce jour aucune recherche archéologique n'avait encore été menée dans ce sens dans la région du Rif et plus généralement au Maroc. Les résultats de cette mission sont nombreux et devraient modifier la vision des premiers métallurgies de cuivre au Maroc.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -

2.1] cadres de l'étude

2.1.a) La zone de recherche

Nos recherches couvrent une zone entre les longitudes 5°21' et 4°51' Ouest et entre les latitudes 35°33' et 35°09' Nord.

La zone d'étude va du bassin de l'oued Emsa à celui de l'oued Jnan Nich de leur basses à leur moyennes vallées (Fig. 1). Les piedmonts des massifs comportant des gîtes cuprifères ont également été prospectés.

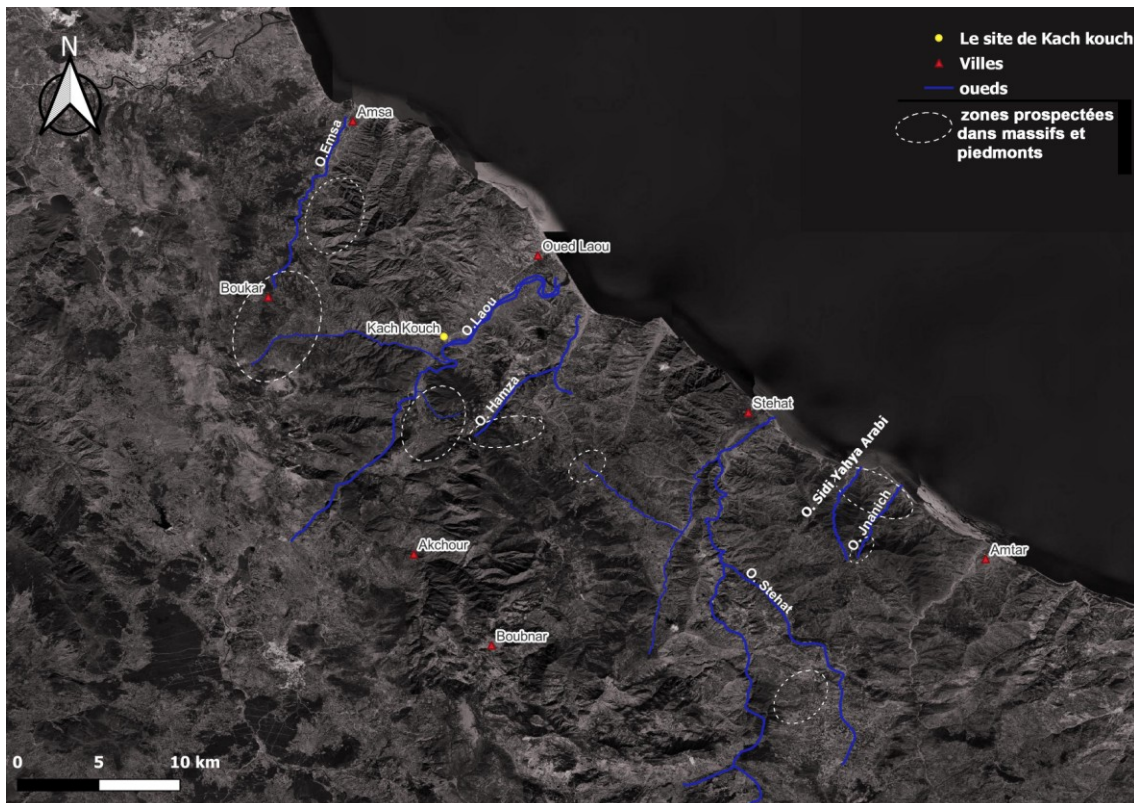


Fig. 1 : carte de la zone de d'étude précisant la localisation des bassins fluviaux des oueds prospectés et les zones prospectées dans les massifs et piedmonts.

2.1.b) Le cadre géologique et métallogénique

D'un point de vue géologique, notre zone d'étude se rattache à l'arc de Gibraltar (Fig. 2). Situé à l'extrême Sud-Ouest de la Méditerranée occidentale, il s'étend sur plus de 600 km séparant l'Atlantique de l'Ouest de la Méditerranée et dessinant un arc à concavité vers l'Est dont le cœur est occupé par le bassin d'Alboran (Romagny, 2011, Poujol, 2014). Cet arc est constitué de deux chaînes celle des Bétiques au Nord et celle du Rif au Sud se rejoignant au niveau du détroit de Gibraltar (Chalouan, 1995 ; Samara, 1997 ; Romagny, 2011, Poujol, 2014). La région qui nous concerne précisément correspond au domaine d'Alboran (Fig. 2).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -

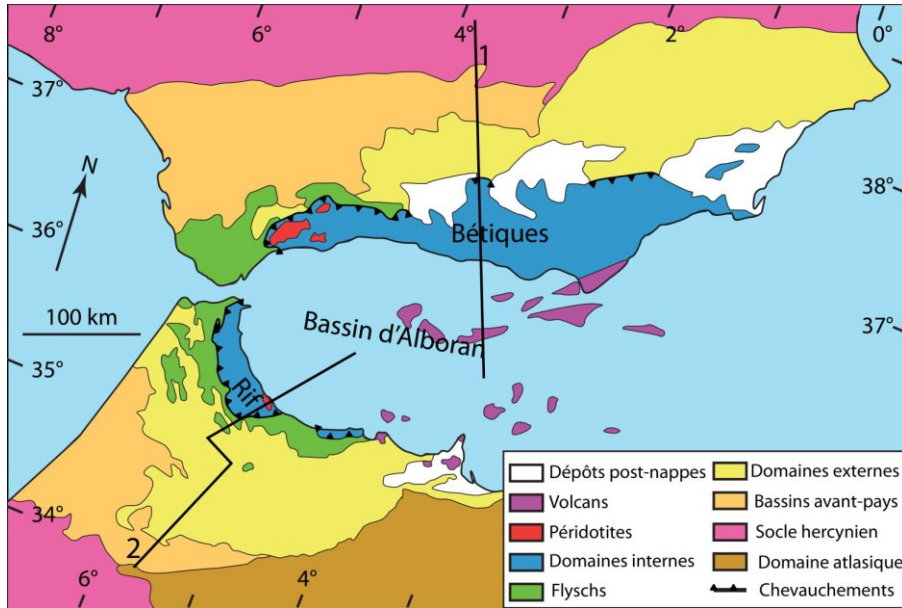


Fig. 2 : Carte structurale simplifiée de l'arc de Gibraltar (d'après A. Romagny, 2011)

2.1.b₁) La géologie du domaine d'Alboran

Le domaine d'Alboran appartient aux zones internes du Rif. Cette partie est constituée de formations correspondant au socle hercynien du domaine d'Alboran charriés sur les marges africaines (pour les Sebtides) et ibérique (pour les Alpujarrides) et de leur couverture sédimentaire (Ghomarides) dans le Rif et Malaguides dans les Bétiques (Figs. 2 & 3).

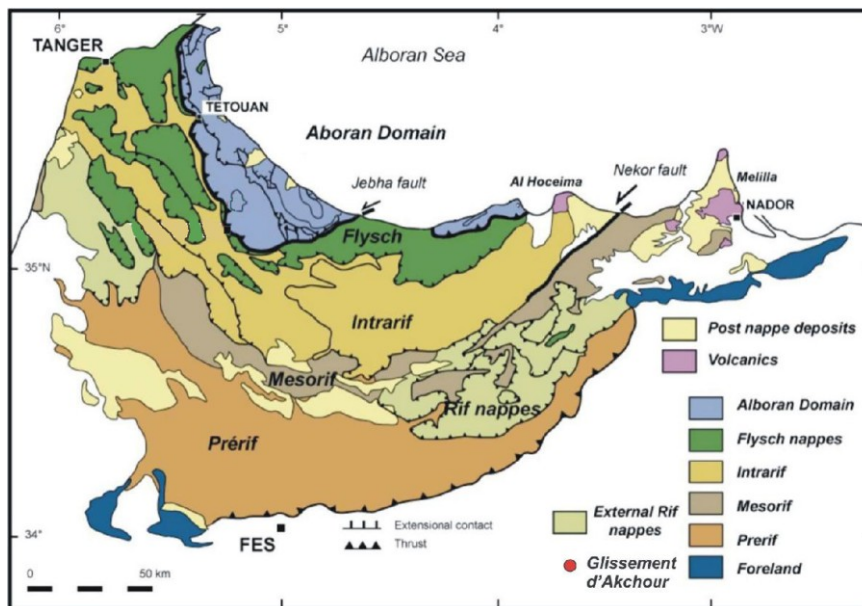


Fig. 3 : Unités géologiques du Rif (d'après Harmouzi et al., 2018)

Les zones internes correspondent à des unités de socle varisque déplacées vers l'Ouest sur plusieurs centaines de kilomètres. Deux unités se distinguent d'après leur degré métamorphique alpin.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -

L'unité inférieure, les Sebtides, est affectée par un métamorphisme de type schiste bleu/eclogite à schiste vert (Figs. 3 & 4). Elle est composée de micaschistes, de gneiss et également de kinzigites associées au massif de Beni Bousera (Figs. 3, 4 & 5).

Les unités supérieures, les Ghomarides (Figs. 3 & 4), sont constituées de schistes affectés par un faible métamorphisme alpin (Chalouan, 1995 ; Samara, 1997 ; Romagny, 2011, Poujol, 2014).

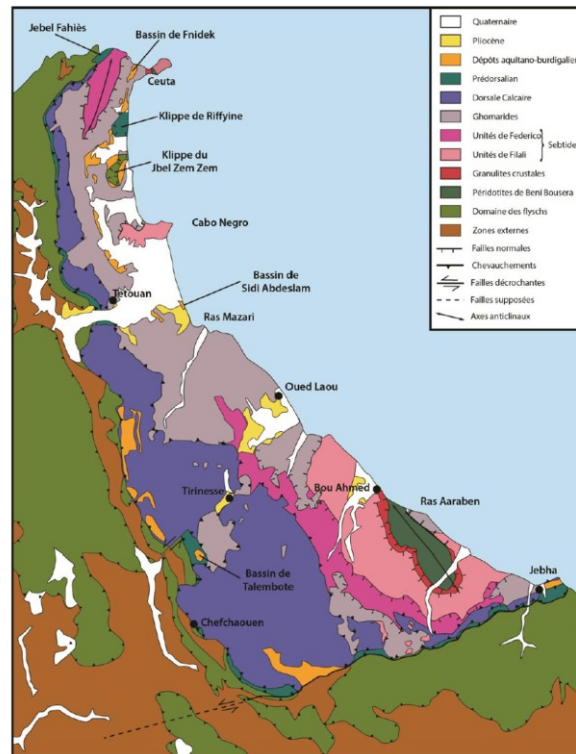


Fig. 4 : Carte géologique et structurale du Rif interne (d'après Poujol, 2014)

Les zones internes comprennent aussi des carbonates triaso-liasiques (dolomie, grès, calcaires liasiques) constituant la Dorsale Calcaire (Fig. 3 & 4). Elle correspond à des reliques de ce qu'était la marge passive sud de la Téthys (*ibidem*).

Le massif de Beni Bousera est également un élément géologique marquant pour le domaine d'Alborran (Fig. 5). Il se caractérise par des roches ultrabasiques : péridotite, harzburgites, dunites et des grenats (El Bakili, 2001 ; El Bakili *et al.*, 2020).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -

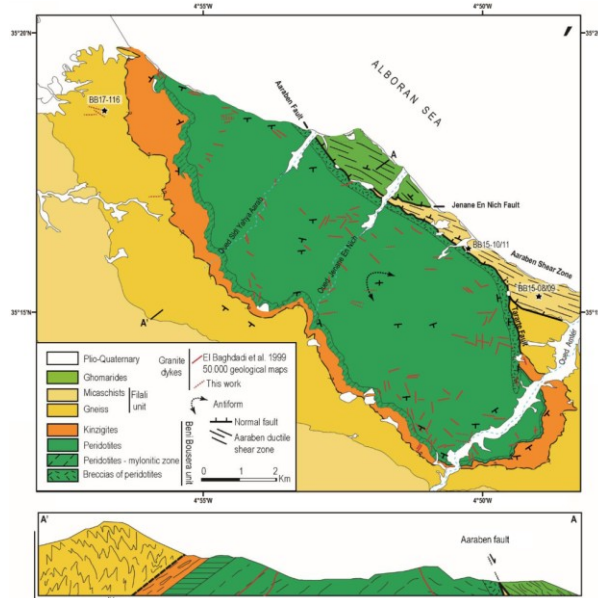


Fig. 5 : Carte et coupe géologique de la région de Beni Bousera (d'après El Bakili et al., 2020)

2.1.b₂) La tectonique du domaine d'Alboran

L'activité tectonique de la région Rif-Alboran résulte d'une combinaison de :

- 1- failles décrochantes dextres E-SE, failles senestres NE à N et failles inverses E-NE,
- 2- failles transtensives dextres E-O et
- 3- de failles transtensives senestres N-E/S-O (Chaluan et al., 1995 ; Poujol, 2014)

Deux failles majeures, Nekor et Jebha, orientées N-E/S-O, recoupent également de façon oblique la chaîne du Rif (Poujol, 2014).

L'activité tectonique de cette région a guidé les flux hydrothermaux à l'origine des minéralisations métallières dans de domaine d'Alboran.

2.1.b₃) La métallogénie

- Aspects généraux

Le domaine d'Alboran appartient à la province métallogénique du Rif. Contrairement aux autres région du Maroc, le Rif comporte très peu de gisements métallifères (Chalouan *et al.*, 2011). Actuellement le domaine d'Alboran n'est pas considéré comme une région attractive pour les industries exploitant les ressources métallières. Seuls les roches et minéraux industriels (dolomie, magnésie) sont aujourd'hui exploitées (sources OHNYM)

La province métallogénique du Rif est caractérisée par des gisements métallifères de type *Mississippi Valley Type* (MVT) correspondant principalement à des minéralisations de plomb-zinc (Fig. 6).

Il s'agit de gisements hydrothermaux qui se sont formés à basses températures avec des fluides de saumures denses. Ils constituent souvent le remplissage des karsts, sous forme d'amas syngénétiques de minéralisation sulfurés, ou sont situés dans des roches sédimentaires pas ou peu métamorphisés.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -

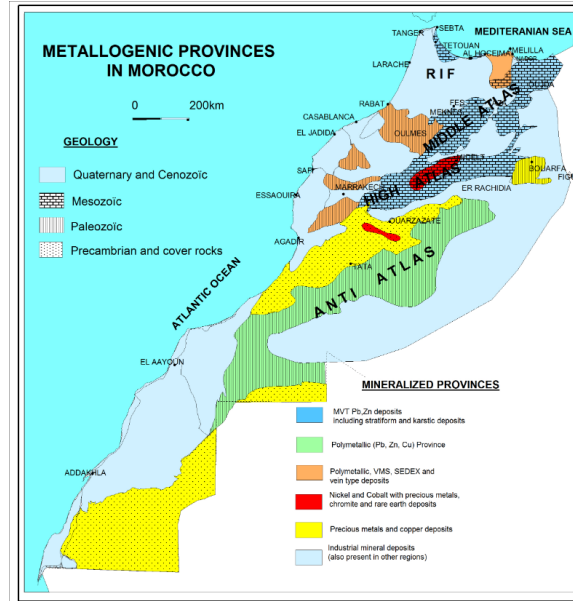


Fig. 6 : provinces métallogéniques du Maroc (d'après données publiques de l'ONHYM)

- Aspects détaillés

D'un point de vue plus détaillé, la zone d'étude est marquée par deux grandes sous-zones métallogéniques, qui sont datées entre le cambrien et le jurassique et se recoupent : plomb-zinc (Pb-Zn) et cuivre (Cu) (Fig. 7).

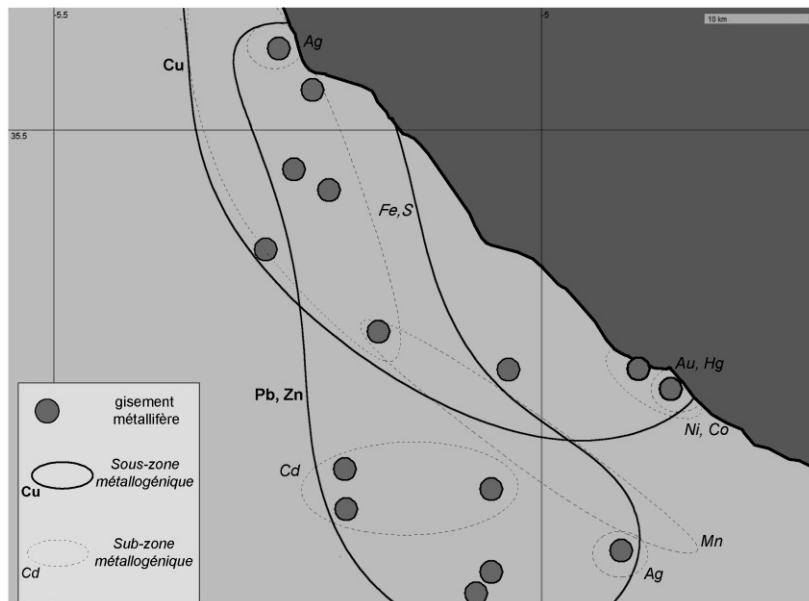


Fig. 7 : Sous-zones métallogéniques (Cu ; Pb, Zn) et sub-zones métallogéniques (Ag ; Au, Hg ; Ni, Co, Mn ; Cd ; Fe, S) du domaine d'Alboran au niveau de la zone de recherche (d'après Leblanc, 1986 ; El Hmaïdi *et al.*, 2003 ; Milesi *et al.*, 2004 ; Carrillo Rosúa *et al.*, 2013 ; et le Ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et du développement durable du Maroc)

- Sous-zone métallogénique de plomb-zinc

Cette sous-zone métallogénique émerge du Sud, légèrement à la marge de notre zone d'étude, au niveau d'Agouil, et remonte vers le Nord en direction de Tétouan. Elle recoupe la

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -

sous-zone cuprifère (Figs. 7 & 8). Au niveau de ce chevauchement les gisements sont polymétalliques (cuivre, plomb et zinc). Par contre les gisements au Sud sont plutôt bimétalliques (plomb, zinc).

Cette sous-zone est traversée par deux sub-zones, l'une de cadmium et la seconde de magnésium (Figs. 7 & 8). Un épiphénomène de minéralisation d'argent caractérise le gisement d'Iliane au sud-est de la sous-zone métallogénique.

Les minéralisations de plomb-zinc et plomb-zinc-cuivre sont sous la forme de filons, veines, amas (lentille, nid) ou de masses stratoïdes de minerais disséminés. Elles sont associées à des filons de quartz hébergés dans micaschistes, de gneiss métamorphisés (Sebtides) ou dans des péridotite, arzburgites, dunites (massif de Beni-Boussera), des schistes faiblement métamorphisés (Ghomarides) ou des carbonates triaso-liasiques (dorsale calcaire). Les minéralisations sont guidées par les failles du domaine d'Alboran orientées E-SE, N-E à N, E-NE, E-O et N-E/S-O

Les minerais de plomb correspondent à de la galène. Le zinc est minéralisé sous la forme de blende et de sphalérite.

- Sous-zone métallogénique de cuivre

La sous-zone de cuivre correspond à un vaste arc cuprifère allant du massif de Beni-Boussera jusqu'aux Bétiques. Dans ces deux zones, les gisements de cuivre présentent de fortes similitudes métallogéniques.

Cette sous-zone de cuivre comprend des sub-zones de fer associé à du soufre (pyrite, FeS) et de manganèse (Mn) (Figs. 7 & 8) ; L'association entre les minéralisations de cuivre et la pyrite est s'accroît en direction de l'Ouest, vers la pointe du Rif et devient la norme dans le massif des Bétiques. Le manganèse est plus fréquemment associé au cuivre en direction de l'Est.

Au sein de cette sous-zone métallogénique de cuivre, on note des épiphénomènes de minéralisations d'argent (Ag), au nord-ouest, et d'or associé au mercure (Au, Hg) et de nickel-cobalt (Ni, Co), au sud-est (Figs. 7 & 8).

Ces deux dernières sub-zones métallifères (Au, Hg ; Ni, Co) sont associées à la formation du massif de Beni-Boussera. Ces minéralisations se sont formées au sein de nappes ophiolitiques fortement métamorphisées (serpentine) issue de la fermeture de bassins marins. Ces deux sub-zones métallifères constituent un secteur complètement distinct de la sous-zone cuprifère (Milesi *et al.*, 2004 ; El Bakili *et al.*, 2020).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -

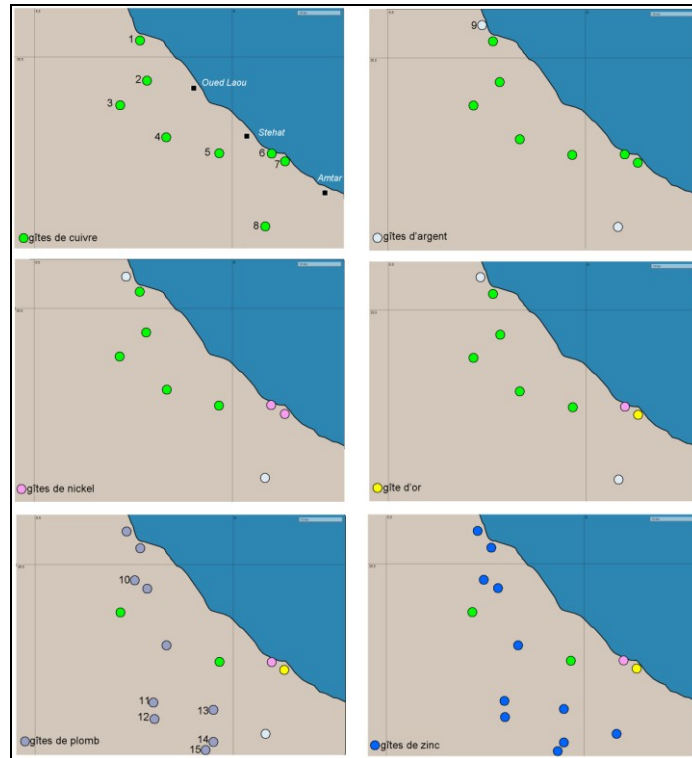


Fig. 8 : Dans la zone de recherche, cartes des gisements, présentant un potentiel minier et industriel exploitable. Les substances principales (*p*) et secondaires (*s*) sont indiquées dans les différentes cartes. 1- Mechkoura (*p* : Cu ; *s* : Pb, Zn), 2- Tikenzigouene (*p* : Cu ; *s* : Zn, Pb), 3- Ijoglan -jabran (*p* : Cu), 4- Tirinisse (*p* : Pb ; *s* : Cu, Zn), 5- Bou Jala (*p* : Cu), 6- Amasined (*p* : Pb ; *s* : Cu), 7- Tafart (*p* : Ni ; *s* : Co, Au, Cu), 8- Ililane (*p* : Cu ; *s* : Zn, Ag), 9- Beni maden (*p* : Pb, Zn ; *s* : Cu, Co, Ag), 10- Khemis (*p* : Ge ; *s* : Pb, Zn), 11- Aghermane (*p* : Zn ; *s* : Pb, Cd), 12- Azilane (*p* : Zn ; *s* : Pb, F, Cd), 13- Kadnar (*p* : Pb, Zn ; *s* : Cd), 14- Kharbouch (*p* : Pb ; *s* : Zn), 15 - Adeldal (*p* : Pb, Zn) (d'après les données publiques fournies par la direction de la géologie du Ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et du développement durable (<https://cartesgeoscientifiques.mem.gov.ma/gites/>) et d'après Milesi *et al.*, 2004).

Les types de minéralisations et leurs orientations sont similaires aux gisements de la sous-zone de plomb-zinc. Les minerais de cuivre sont : chalcopryrite, chalcosine, bornite, cuprite, malachite et azurite.

Selon les données publiques, la région d'étude compte huit gisements cuprifères, majoritairement polymétalliques (Fig. 9).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -



Fig. 9 : localisation des gites métallifères cuprifères identifiées selon les données publiques (d'après les données publiques fournies par la direction de la géologie du Ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et du développement durable (<https://cartesgeoscientifiques.mem.gov.ma/gites/>) et d'après Milesi *et al.*, 2004).

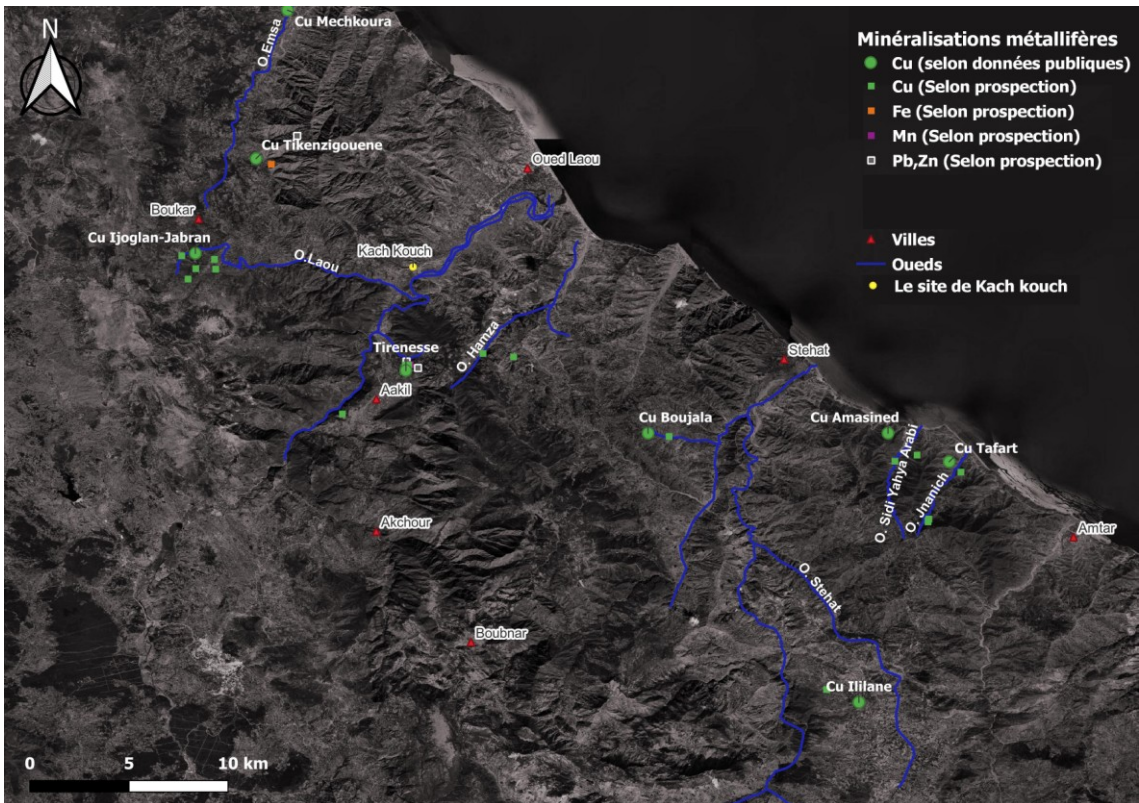


Fig. 10 : localisation des gites métallifères cuprifères identifiées selon nos prospections.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- cadres de l'étude -

Les prospections menées dans le cadre de cette mission ont permis d'identifier 28 affleurements et/ou minéralisations de cuivre non référencées dans les données accessibles dans le domaine public (Fig. 10). Contrairement aux gîtes métallifères signalés par les données publiques, ces indices de minéralisations ne sont pas mentionnés car il s'agit de gîtes ne présentant pas d'intérêt économique industriel. Toutefois pour la problématique qui nous intéresse, tout affleurement ou minéralisation secondaire de cuivre constitue un potentiel métallifère pour les premières métallurgies.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- problématique -

2.2) Problématique

Les recherches archéologiques dans la région de l'Oued Laou et les récentes fouilles sur le site de Kach-Kouch ont mis évidence quelques indices liés à la métallurgie du cuivre.

Ces données ont soulevée la question d'une ou des métallurgie(s) du cuivre dans la région. Cela pose les questions de la datation, de diachronie, d'origine (locale, influences) et dl'importance de cette activité au sein des groupes culturels locaux.

L'ensemble de ces questionnement nous amène à la problématique générale : « les métallurgies anciennes dans la région du Rif, des mines aux objets finis ».

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- notions générales sur les métallurgies de cuivre -

2.3) Notions générales sur les métallurgies du cuivre

Aborder une telle problématique nécessite de se saisir des grandes notions de la métallurgie du cuivre.

2.3.a) Terminologie

La métallurgie du cuivre comprend trois grands types corrélés par la chaîne opératoire : la métallurgie minière, la métallurgie extractrice et la métallurgie de mise en forme.

- La métallurgie minière

La métallurgie minière regroupe les étapes liées à l'extraction de la matière première (minerais) et aux premiers travaux à proximité des sites extractives comme la séparation de la matière utile (minerais) du stérile (roche) par concassage.

- La métallurgie extractive

La métallurgie extractive comprend l'ensemble des processus de transformation de la matière : de l'état minéralisé à l'état métallique.

La première étape consiste à broyer/concasser finement le minerai puis à le laver, par voie humide, afin d'obtenir un concentré.

La seconde étape, la réduction, consiste à transformer, dans un réacteur pyrométallurgique (four), les minerais en métal et en extraire le stérile sous la forme de scories.

La réduction comprends plusieurs processus complexes thermodynamiques faisant intervenir l'atmosphère (réductrice ou oxydante), la température, le type de réacteur, l'ajout de facilitateur de liquéfaction du stérile (un fondant), des céramiques techniques (creusets de réduction) et l'apport de ventilation forcée (soufflets, tuyères, chalumeaux). Ces processus de réduction et les produits résultants dépendent du type de minerais réduits.

- La métallurgie de transformation

La métallurgie de transformation rassemble les étapes de préparation et de mise en forme du métal. La première phase consiste à rassembler tous les éléments métalliques issus du processus de réduction (nodules, billes et billettes de métal) puis à les fondre ensemble dans un creuset de fonte afin d'obtenir un produit semi-fabriqués, appelé aussi demi-produit (ex. : un lingot). A partir de ce produit, des processus de mise en forme (martelage, recuits) permettent de réaliser des objets finis.

2.3.b) Une chaîne opératoire ?

Il existe autant de chaînes opératoires que de métallurgies de cuivre. Je propose ici une chaîne opératoire envisageable au regard de mes recherches en Mauritanie et au Maroc dans des sites préhistoriques (Courcier, 2019 ; Courcier *et al.*, 2019)

Les minerais cuprifères (malachite, azurite ?) sont extraits par abattage au feu et au maillet, ou au pic métallique pour des périodes plus récente, au niveau de sites d'extraction souterrains et fronts de taille situés dans les massifs montagneux de la région.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- notions générales sur les métallurgies de cuivre -

Des ateliers de broyage/concassage sont situés à proximité immédiate des lieux d'extraction. Ils sont destinés à réaliser une première séparation entre le minerais et le stérile.

La matière première est transportée jusqu'à des sites installés à proximité et proches d'un accès à l'eau. Les minerais sont de nouveau concassés, broyés et réduits en poudre. Le broyat est ensuite concentré. Des mouvements circulaires répétitifs permettent de séparer par gravité, avec l'aide d'une dynamique hydraulique, le minerai de la partie minérale stérile. Cette dernière, moins dense, est évacuée par la force centrifuge. Au terme de cette seconde phase de séparation, on obtient une poudre de minerai concentré.

Ce concentré est placé dans un creuset à l'intérieur d'un four de réduction alimenté par une ventilation forcée (pot à souffler « *pot-bellows* », chalumeaux, « *blow-pipe* » ou tuyère). Les dimensions de ces structures de réduction et les températures atteintes restent une inconnue. Un fondant est nécessaire afin de faciliter la liquéfaction des résidus stériles sous la forme de scories et la séparation avec le métal. Nous ignorons actuellement la nature de ce fondant et s'il est volontairement ajouté ou naturellement présent dans la gangue restante. Le processus de réduction permet de séparer le métal et le stérile, qui est évacué sous la forme de scories. Le métal obtenu est sous la forme de nodules et de billettes de cuivre piégées dans la scorie ou concentré au fond du réacteur pyrométallurgique. Des amas de scories brutes sont peuvent être découverts à proximité des fours métallurgiques de réduction.

Plusieurs artefacts (culots de fond de four, scories denses) peuvent illustrer des difficultés lors de cette étape de réduction. Ils traduisent des conditions de températures insuffisantes et/ou un manque d'apport de fondant siliceux. Nous n'excluons pas des tentatives de réduction de minerais cuprifères complexes à base de sulfures.

Si le processus de réduction est incomplet et n'a pas permis la séparation complète entre le stérile et le métal, les scories sont ensuite concassées afin de récupérer le métal piégé dans cette gangue stérile. Ces scories concassées correspondent à de petits fragments à bords irréguliers. Cette activité se caractérise par des macro-outils (meules passives et actives, percuteurs) et une zone d'épandage de scories concassées.

Si le processus est optimum, le métal se concentre au fond du réacteur pyrométallurgique, ou du creuset de réduction, et forme une loupe de métal.

Il n'est pas exclu à ce niveau de la chaîne opératoire de rassembler les objets en métal non fonctionnels afin qu'il soit recyclés lors de l'étape suivante.

L'ensemble du métal (billes, nodules, loupe, objets à recycler) est rassemblé et fondu probablement dans un creuset de fonte. Le métal est ensuite coulé dans une lingotière ou directement dans un sillon creusé dans le sol. Le demi-produit obtenu peut faire l'objet d'une thésaurisation, en vue d'une transformation future, ou il peut être destiné aux échanges interculturels.

Une partie du demi-produit peut être destiné à la mise en forme d'objet fini. Des alternances de martelage et de recuits de détente et/ou de consolidation permettent de réaliser des objets en métal de manufacture simple (alène, pointe de flèche, pointe de lance, anneau, etc.). Ces objets sont destinés, d'une part, à un usage local, et d'autre part, aux échanges interculturels. Dans le premier cas, les objets usés sont souvent recyclés. Dans le second cas, les objets circulent puis seront recyclés aux périodes plus récentes. Ces deux usages expliquent qu'il est rare de trouver des objets finis en métal dans les sites archéologiques.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- démarche de recherche -

2.4) La démarche de recherche

La problématique relative à la métallurgie implique de se focaliser en premier lieu sur les matières premières nécessaires (roches et minerais) puis d'intégrer les ressources naturelles essentielles à la métallurgie (eau et bois) et enfin de corréliser l'ensemble de ces données aux indices archéologiques liés aux activités métallurgiques.

Une grande partie de la recherche consiste à renseigner la géologie et la métallogénie de la zone d'étude. Puis dans un second temps, il s'agit de rechercher les indices archéologiques liés à la métallurgie qui sont directement dépendant des matières premières et ressources naturelles disponibles dans la zone.

2.4.a) Données publiques

Nos recherches se sont appuyées sur le socle de données scientifiques fournies par la direction de la géologie du Ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et du développement durable (<https://cartesgeoscientifiques.mem.gov.ma/gites/>).

Nous avons également utilisées les données publiques fournies par l'agence civile *United States Geological Survey - USGS* (<https://mrdata.usgs.gov/general/map-global.html#home>).

Enfin, nous avons consulté les informations géologiques et métallogéniques de la base de données du SIG Afrique établie par le BRGM (Milesi *et al.*, 2014).

Ces données publiques ont permis de déterminer des points précis et/ou des zones correspondant à des gîtes et/ou groupement de minéralisations cuprifères. Ces secteurs ont été ciblés initialement pour les recherches de terrain.

L'ensemble de ces données constituent également des sources d'informations géologiques et métallogéniques qui permettent de mettre en perspectives nos observations de terrain et d'infirmer ou confirmer les hypothèses de travail.

2.4.b) Enquêtes locales

A proximité des gîtes cuprifères localisés grâce aux données publiques, nous avons mené des enquêtes auprès des populations locales afin d'affiner la localisation des sites d'extraction.

Notre questionnaire visait à demander si des mines ou des travaux miniers sont connus dans la zone. Nous avons également sensibilisé la population locale aux types de minéralisations recherchées. Nous leur avons montré des échantillons de minerais cuprifères (malachite, azurite) et demandé s'ils en avait déjà vu dans la zone.

Ces enquêtes locales ont permis à de nombreuses reprises d'obtenir des informations essentielles pour les recherches de terrain. Les populations locales nous ont indiqués des localisations de mines modernes non référencées dans les données publiques. Elles nous ont également apporté des informations relatives à l'histoire moderne de leur exploitation et aux types de minerais extraits.

Ces informations permettent, d'une part, de localiser des sites d'extraction mais également des minéralisations métallifères et de ce fait de mieux comprendre la minéralisation dans le secteur. Généralement des sites d'extraction anciens se situent souvent

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- démarche de recherche -

à proximité des mines modernes de cuivre. Localiser ces dernières permet donc de découvrir des sites archéologiques.

Les informations relatives à l'histoire de l'extraction de la mine moderne permettent souvent de connaître le nom de la société ou à défaut la période d'activité de la concession. Ces données peuvent être recoupées avec celles conservées au Ministère des mines du Maroc ou avec celle de l'Office National des Mines et des Hydrocarbures. In fine, on peut compléter des informations métallogéniques et parfois obtenir des informations archéologiques mentionnées dans les rapports d'ingénieurs des compagnies minières.

2.4.c) Prospections

Les prospections ont été menées dans les hautes, moyennes et basses vallées des oueds (Emsa, Laou, Stehat, Hamza, Sidi Yahya Aarabi et Jnan Nich) ainsi que dans les massifs montagneux de ces bassins.

L'approche des zones visées par les prospections s'est faite à l'aide d'un véhicule léger. La poursuite de la prospection a été pédestre. A plusieurs reprises, l'équipe a été scindée en deux groupes afin de couvrir une plus grande zone. Les prospections ont été exhaustives et systématiques.

Dans les massifs et piedmonts, l'étude prospective consista en une approche géologique et métallogénique. Les données géologiques (terrains, nappes, intrusions, altérations, etc.) et métallogéniques (roche encaissante, minéralisations, orientations, etc.) ont été notifiées. Les mines modernes et sites extractifs anciens ont été géoréférencés, caractérisés et décrits.

Dans les vallées des oueds, les prospections ont visées à saisir les voies d'accès entre les zones d'extraction de matières premières (massifs et piedmonts) et les zones d'occupation anthropiques (les vallées). L'orogénie et la topographie ont été de fait prises en compte. Afin d'appréhender les sites comportant des activités métallurgiques, des secteurs à fort potentiel ont été définis. Il s'agit de secteurs présentant des connexions directes et topographiquement accessibles avec les ressources métallifères et naturelles. Dans ces secteurs des prospections intensives ont été menées.

2.4.d) Enregistrement cartographique sur SIG

A l'issue des prospections et de façon journalière, les données géoréférencées étaient transmises à Hassan Hachami, doctorant à l'INSAP, afin qu'elles soient compilées dans un SIG. La projection cartographique permettait d'être proactif et efficient. Nous étions en mesure de réajuster les hypothèses et les perspectives pour les jours à venir.

2.4.d) Etude du matériel conservé à l'INSAP et confrontation avec les données de prospections

Au regard de l'ensemble des données géologiques et métallogéniques collectées lors de la prospection, nous avons réétudié le matériel des fouilles du site de Kach-Kouch.

Cette étude selon un éclairage géologique et métallurgique a permis d'identifier de nombreux artefacts comme autant d'indices d'activités métallurgiques sur le site de Kach-Kouch (voir ci-après).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- démarche de recherche -

2.4.e) Retour vers le département de géologie du Ministère des mines et vers l'ONHYM

Au retour des recherches de terrain, nous avons sollicité un entretien avec M. Zoubir Skalante, chef du service des publications et des SIG du département de géologie, au Ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et du développement durable.

Il s'agissait de compléter des informations relatives à des gîtes métallifères et de se renseigner concernant la démarche pour accéder à des rapports précis dans les archives du ministère.

Il nous a informés qu'une partie des données était archivée au ministère mais que l'essentiel était à l'Office National des Hydrocarbures et des Mines (ONHYM).

Issu de fusion du Bureau de Recherches et de Participations Minières (BRPM) et de l'Office National de Recherche et d'Exploitations Pétrolières (ONAREP), l'ONYM rassemble l'ensemble des rapports de terrain et analyses des gîtes métallifères dont des concessions ont été vendues à des compagnies minières. Avec l'introduction de M. Zoubir Skalante, nous avons contacté l'ONHYM pour solliciter un entretien. Celui-ci n'a pu se réaliser car les délais étaient trop contrains. Nous avons décidé de reporter cet entretien à la prochaine mission de recherche.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- Objectifs -

2.5) Objectifs visés

2.5.a) Déterminer les matières premières locales liées à la métallurgie

- Les roches locales

Cet objectif vise à recenser les roches disponibles dans la zone de recherche. Il s'agit d'identifier les roches susceptibles d'être utilisées pour réaliser des macro-outils lithiques nécessaires à l'extraction des minerais (percuteurs) et à leur broyage et concassage (molette, meule, pilon, pierre à cupule, mortier). Dans les sites archéologiques, nous sommes de fait en mesure de déterminer si les macro-outils lithiques découverts *in-situ* ont nécessité des pierres locales ou importées. On aborde ici les questions de provenances de matières premières.

Ce recensement géologique vise également à identifier les roches qui abritent les minéralisations métallifères (les roches encaissantes). À l'issue de ce travail, on est à même de repérer et d'identifier, lors d'observations macroscopiques, les restes d'encaissants (stérile) dans les scories, découvertes sur les sites archéologiques. Et ainsi d'estimer si les minerais réduits sont d'origine locale ou non.

Enfin, la connaissance des roches locales permet de déterminer si le dégraissant minéral utilisé dans une céramique technique (creuset, moule, tuyère, buse) est d'origine locale ou non. On se pose ici la question du réemploi de matière issue du concassage des minerais ou de l'importation de roches spécifiques essentielle pour les capacités mécaniques et technique de la céramique.

- Les minerais locaux

Pour les questions relatives à la métallurgie, la connaissance la plus exhaustive possible des minerais locaux est essentielle. Il s'agit de connaître la forme du gisement (amas, lentille, filonnet, filon, *etc.*) qui détermine en partie le type d'extraction.

Il convient de renseigner la nature des minerais (primaire, réduits, oxydés, carbonatés, hydrocarbonaté) (Fig. 11). Cela renseigne sur la zone du filon qui a été visée par l'extraction minière. Les minerais primaires (sulfurés) sont plus complexes à réduire que les minerais de la zone oxydante. L'identification de la nature des minerais permet d'estimer les processus nécessaires pour la réduction des minerais et indirectement de conjecturer sur la datation du site d'extraction.

Il est également nécessaire d'identifier la minéralisation principale et les minéralisations associées. Ces informations renseignent sur les substances métallifères susceptibles d'être extraits et les compositions qualitatives des minerais. Idéalement, il est nécessaire de connaître les minéralisations spécifiques à un gisement (ex. : chrome, niobium, titane). Cette information permet souvent de discriminer un gisement d'un autre. Ces données sont nécessaires pour l'interprétation des résultats d'analyse chimiques des objets en métal et facilite les hypothèses relative à la provenance des matières premières.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- Objectifs -

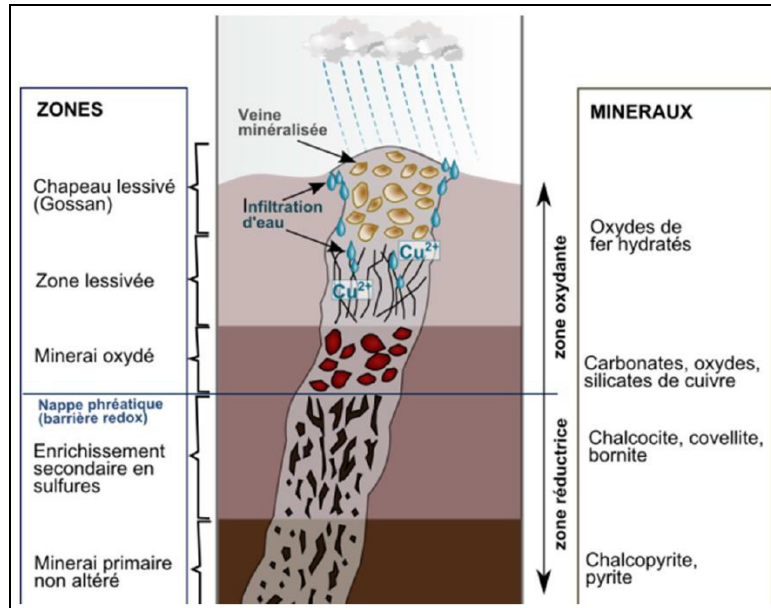


Fig.11 : Profil d'altération classique d'une structure minéralisée sulfurée (source BRGM, Menard, 2019)

2.5.b) Caractériser les sites extractifs : description, estimation date exploitation

Le second objectif vise à identifier, géoréférencer et décrire les sites d'extractions dans la zone de recherche.

Chaque site est caractérisé : minéralisation extrait, type de méthode d'extraction et données métriques. Au regard de ces caractéristiques, une datation relative peut être avancée. La confrontation avec les données archéologiques permet dans certains cas d'affiner cette datation

2.5.c) Prélèvement d'échantillons

Au niveau de chaque site extractif identifié, un prélèvement d'échantillon de minerais a été effectué.

A terme, l'objectif est de l'analyser afin de caractériser sa signature chimique voire isotopique. Puis de comparer cette composition avec celle d'objets en métal découverts dans des sites archéologiques et ainsi proposer des hypothèses de provenance de matière premières.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

2.6) Les sites d'extraction de cuivre

Au regard des données publiques et de nos prospections, 36 affleurements et ou minéralisations de cuivre caractérisent la zone d'étude (Figs. 9 & 10). La région comporte un potentiel métallifère de cuivre important qui a probablement été exploité dès les débuts des métallurgies de cuivre, encore mal connus au Maroc.

A l'exception de la mine de plomb de Mechkhura, datée de l'époque romaine, aucune mine ou site d'extraction ancien n'était connu dans la région, faute de recherche archéologique.

Les prospections menées dans le cadre de cette étude ont permis d'identifier au total 27 sites : 7 mines modernes, 11 mines modernes comportant un secteur d'extraction ancien et 9 sites d'extraction anciens (Fig. 12).

Selon les données publiques et les enquêtes locales, les mines modernes sont datées entre 1920 et 2000. En l'absence d'indices de datation (restes organiques pour datation radiocarbone), il est difficile de dater précisément l'exploitation des sites extractifs anciens découverts. Dans certains cas, le type d'extraction, identifié par les traces laissées au niveau du front de taille, permet d'affiner la période ancienne d'extraction.

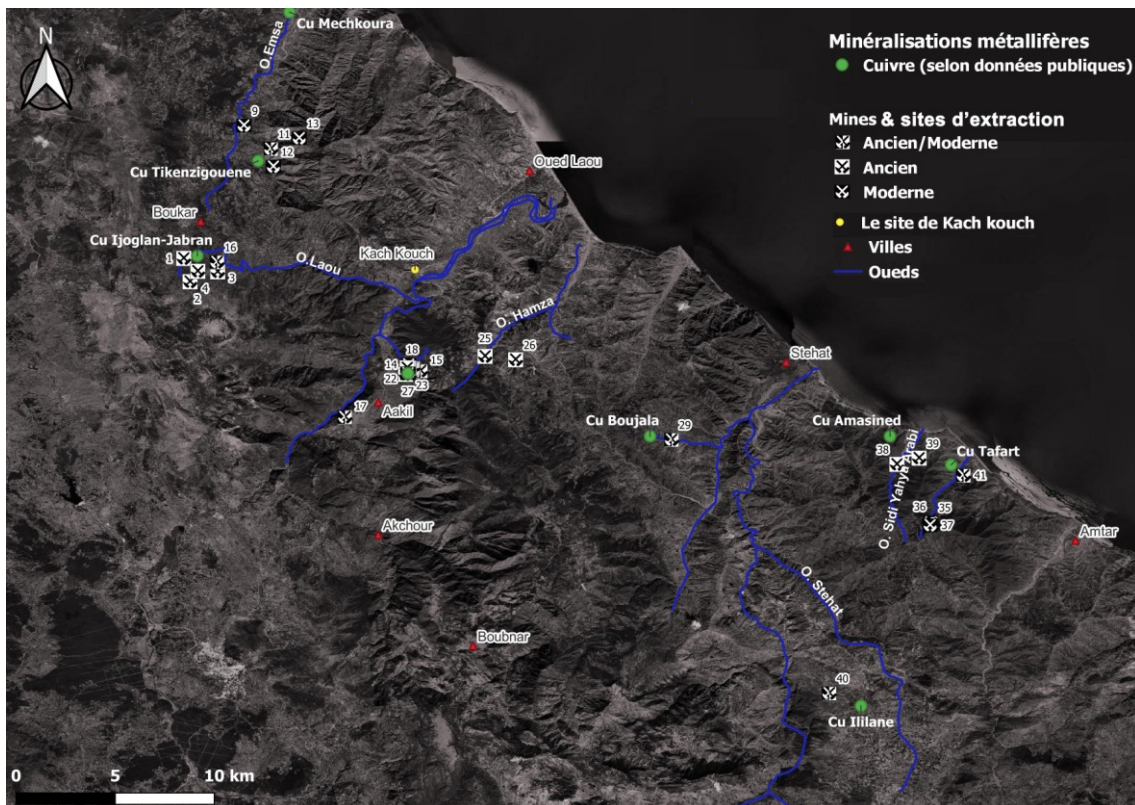


Fig. 12 : cartographie de l'ensemble des mines et sites d'extraction anciens découverts lors des prospections. Mines dans le bassin de l'Oued Emsa : O-E-M-# ; mines dans le bassin de l'Oued Laou : O-L-M-# ; mines dans le bassin de l'Oued Stehat : O-S-M-# ; mines dans le bassin de l'Oued Hamza : O-H-M-# ; mines dans le bassin de l'Oued Sidi Yahya Aarab : O-S-Y-A-M-# ; mines dans le bassin de l'Oued Jnan Nich : O-J-N-M-#.
Mines découvertes : 1- O-E-M-1, 2- O-E-M-2, 3- O-L-M-1, 4- O-E-M-3, 9- O-E-M-4, 11- O-E-M-5, 12- O-E-M-6, 13- O-E-M-7, 14- O-L-M-2 ; 15- O-L-M-3, 16- O-L-M-4 ; 17- O-L-M-5, 18- O-L-M-6, 19- O-L-M-7, 20- O-L-M-8, 21- O-L-M-9, 22- O-L-M-10, 23- O-L-M-11, 25- O-H-M-1, 26- O-H-M-2, 27- O-L-M-12, 29- O-S-M-1, 35- O-J-N-M-1, 36- O-J-N-M-3, 37- O-J-N-M-4 ; 38- O-S-Y-A-M-1, 39- O-S-Y-A-M-2, 40- O-S-M-2, 41- O-J-N-M-2.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

Fig. 13 : Tableau récapitulatif des mines et sites d'extraction anciens découverts

Bassin	nom	n° carte (Fig.13)	détails géologiques et métallogéniques							indices d'extraction minière	Période d'exploitation	Latitude N	Longitude O
			Substance(s) utile(s)		gîte métallifère								
			principale	secondaires	minéralisation	minerais	puissance (cm)	orientation	encaissant				
Oued Emsa	O-E-M-1	1	Cu	—	filon	malachite	5-8	S-N	calcaire	vaste zone comprenant de nombreuses alvéoles dont certaines forment voutes sur le front de taille. Deux alvéoles communiquent par un puit d'accès. Traces claires d'abattage au feu et quelques traces d'extraction au pic. Front de taille sur falaise: 20-25m de long, 10-12m de haut.	ancien	35°23'46"	05°17'28.1"
Oued Emsa	O-E-M-2	2	Cu	—	filon	malachite	5-8	O-E	calcaire	Front de taille avec succession d'alvéoles d'abattage au feu formant un abris sous roche. 4 boyeaux de recherche. Front de taille : 8-10m de long, 1-1,20 m de haut.	ancien	35°25'4.18"	05°17'15.64"
Oued Laou	O-L-M-1	3	Cu	—	n.d.	n.d.	n.d.	O-E	calcaire	Front de taille avec succession d'alvéoles d'abattage au feu. Front de taille : 6-8-m de long, 3-4 m de haut.	ancien	35°23'19.24"	05°14'20.43"
Oued Emsa	O-E-M-3	4	Cu	—	n.d.	n.d.	n.d.	S-N	calcaire	Font de taille avec succession d'alvéoles d'abattage au feu. Front de taille : 30-40m de long, 5-7m de haut. Une des alvéoles présente deux boyeaux de recherche. Plusieurs autres alvéoles supposées au Sud.	ancien	35°23'20.26"	05°17'0.11"
Oued Emsa	O-E-M-4	9	Zn	Fe, Pb, Cu	stockwerk	blende, galène, pyrite, chalcopryrite	n.d.	O/N-O	quartz, quartzite, schistes	Mine en galerie (1980) présentant une halde de stérile. 3 galeries visant la minéralisation vers O, O/NO, N sur 100m, 50m et 300m.	moderne	35°28'10.5"	05°15'28.3"
Oued Emsa	O-E-M-5	11	Fe ?, Cu ?	Pb, Zn, Cu	filon	pyrite, pyrrhotite, blende, galène, pyrite, chalcopryrite	4-6	N-S	schistes greseux	Deux fronts de taille exploitant le filon avec traces de pic. l'ouest de cette exploitation ancienne, galerie moderne (1980) réexploitée jusqu'à il y a 5 ans.	ancien/moderne	35°27'24.21"	05°14'35.64"
Oued Emsa	O-E-M-6	12	Zn	Fe, Pb, Cu	filon	pyrite, pyrrhotite, blende, galène, pyrite, chalcopryrite	n.d.	O-E	schistes	Mine (1980) exploitant un filon. Haldes indiquant leur localisation précise.	moderne	35°26'48.71"	05°14'29.75"
Oued Emsa	O-E-M-7	13	Zn	Fe, Pb, Cu	filon	pyrite, pyrrhotite, blende, galène, pyrite, chalcopryrite	n.d.	O-E	schistes	4 Mines (1980) exploitant le filon. Haldes indiquant leur localisation précise.	moderne	35°27'45.38"	05°13'38.23"
Oued Laou	O-L-M-2	14	Pb	Fe, Zn	filon	pyrite, pyrrhotite, blende, galène, pyrite, chalcopryrite	5-8	O-E	calcaire, grès, schistes	mine (avant protectorat espagnol) caractérisée par une entrée circulaire de 60 cm de diamètre, pendage 35°. Possible structure (front de taille) plus ancien.	moderne	35°20'14.9"	05°10'00.3"
Oued Laou	O-L-M-3	15	Cu	Fe, Zn, Pb	filon	chalcopryrite, malachite, azurite	8-21	N-S	quartz, schistes	A l'origine, deux affleurements de quartz parallèles. Possible extraction ancienne (pas de trace visible), extraction moderne ayant exploité l'affleurement de quartz à l'Est	ancien/moderne	35°20'02.1"	05°09'37.5"
Oued Laou	O-L-M-4	16	Cu	Au, Ag ?	nid, lentille, stockwerk	chalcopryrite	0,2-1,5	N-O/S-E	quartz, calcaire gréseux, schiste	La minéralisation avec un pendage de 43°. Même orientation que O-L-M-1. Pas de traces d'exploitation ancienne mais probablement altérée par l'exploitation moderne	ancien/moderne	35°23'38.75"	05°16'22.93"
Oued Laou	O-L-M-5	17	Mn	Cu ?	amas, lentille	psilomélane	n.d.	N-O/S-E	dolomie, marbre	Exploitation (protectorat espagnol) sous la forme de front de taille, galerie. Secteur pouvant abriter du cuivre, possible exploitation ancienne	ancien/moderne	35°18'30.3"	05°12'08.2"
Oued Laou	O-L-M-6	18	Cu	Fe, Zn, Pb	filon	malachite, chalcopryrite, galène, blende, sphalérite, pyrite, pyrrhotite	n.d.	N-S	quartz, quartzite, schistes greseux	Secteur d'extraction en contrebas de O-L-M-03. Exploitation moderne mais possible exploitation ancienne	ancien/moderne	35°20'08.8"	05°09'53.0"
Oued Laou	O-L-M-7	19	Cu	Fe, Zn, Pb	filon	malachite, azurite, chalcopryrite, blende, sphalérite, galène	20-30	N-E/S-O	quartz, calcaire greseux	Exploitation dans l'alignement de O-L-M-03 et O-L-M-06, avec un pendage de 37°. Mine moderne caractérisée par une tranchée de test, une cavité de test et un boyeau menant à une cavité d'extraction. A 5 m en haut de cette mine moderne, front de taille ancien exploitant une minéralisation de cuivre (puissance 8-9 cm) dans une veine de quartz orienté O-E. Peu de traces de minéralisation.	ancien/moderne	35°20'07.9"	05°09'56.0"
Oued Laou	O-L-M-8	20	Cu	Fe, Zn, Pb	n.d.	n.d.	n.d.	N-S	quartz	Dans le prolongement de O-L-M-03, O-L-M-06 et O-L-M-07. Front de taille ancien avec tyraçes d'extraction au pic lithique ou métallique	ancien	35°20'07.1"	05°09'59.2"
Oued Laou	O-L-M-9	21	Cu	Fe, Zn, Pb	filonnets, stockwerk	malachite, chalcopryrite, chalcocine, pyrite, blende, sphalérite, galène	n.d.	n.d.	quartz	Blocs éparses au sol. Possibilité de ramassage comme mode d'extraction	ancien	35°20'07.5"	05°10'00.7"
Oued Laou	O-L-M-10	22	Cu	Fe, Zn, Pb	mouchetage	malachite, blende, sphalérite, galène	n.d.	n.d.	quartz	Affleurement de blocs avec minéralisation de cuivre, Possibilité de ramassage comme mode d'extraction	ancien	35°20'8.02"	05°10'2.95"
Oued Laou	O-L-M-11	23	Cu	Fe, Zn, Pb	filonnets	malachite, chalcopryrite, blende, sphalérite, galène	5	N-E/S-O	quartz	Mine ancienne dans talweg. Traces d'extraction au pic métallique (moderne?). Possible 2 ou 3 fronts de taille, 1 seul contrôlé. Extraction ancienne non exclue mais aucune traces visible	ancien/moderne	35°19'55.16"	05°10'6.35"
Oued Hamza	O-H-M-1	25	Cu	Ag (?)	n.d.	azurite, malachite, chalcopryrite	n.d.	N-O/E	quartz	Affleurement de cuivre	indéterminé	35°20'30.95"	05°7'27.92"
Oued Hamza	O-H-M-2	26	Cu	—	nid, lentille, stockwerk	malachite, azurite, chrysocolle, chalcopryrite	n.d.	O-E	quartz	Affleurement de cuivre	indéterminé	35°20'24.2"	05°06'27.00"
Oued Laou	O-L-M-12	27	Pb, Zn	Cu ?	filon	blende, sphalérite, galène	n.d.	n.d.	quartz, schiste métamorphisé	Mine moderne	moderne	35°19'57.2"	05°10'01.6"
Oued Stehat	O-S-M-1	29	Cu	Cr	filon	chalcopryrite, pyrite, malachite, chromite	30-40	N-S	quartz, quartzite, schiste métamorphisé micassé, péridotite, harzburgites et dunités	Mine moderne (protectorat espagnol) sous la forme d'une galerie suivant le filon (H: 1,3 m, L : 1 m, P : 7m). Exploitation ancienne non exclue	ancien/moderne	35°17'45.23"	05° 1'17.28"
Oued Jnan Nich	O-J-N-M-1	35	Cu	Zn, Ag	filon	spaniolite, bornite, cuprite, malachite, azurite, limonite.	n.d.	N-O/S-E	porphyre, chiste, roches magmatiques ultrabasique, graphyte, népouite	Mine moderne exploitée au cours du protectorat espagnol	moderne	35°15'00.6"	04°52'39.5"
Oued Jnan Nich	O-J-N-M-3	36	Cu	Zn, Ag	filon	spaniolite, bornite, cuprite, malachite, azurite, limonite.	n.d.	N-O/S-E	porphyre, quartz, schiste métamorphisé, serpentine, verre volcanique (obsidienne ?)	Deux galeries modernes effondrée. mine plus ancienne non exclue	ancien/moderne	35°14'57.78"	04°52'41.35"
Oued Jnan Nich	O-J-N-M-4	37	Cu	Zn, Ag	filon	spaniolite, bornite, cuprite, malachite, azurite, limonite.	n.d.	N-O/S-E	porphyre, quartz, schiste métamorphisé, serpentine, verre volcanique (obsidienne ?)	Mine de cuivre au dessus de O-S-M-2 & O-S-M-3	moderne	35°14'54.88"	04°52'41.30"
Oued Sidi Yahya Aarab	O-S-Y-A-M-1	38	Cu	Ni, Co	filonnets	malachite, pentlandite, chalcopryrite, pyrrhotine, magnétite, violarite, cobaltine, makinovite, chalcocine, bornite.	n.d.	n.d.	quartz, pyroxene, pyroxénite, herzolite, péridotite	Blocs de quartz avec minéralisation de cuivre. Possibilité de ramassage comme mode d'extraction	ancien	35°16'56.02"	04°53'47.33"
Oued Sidi Yahya Aarab	O-S-Y-A-M-2	39	Cu	Ni, Co	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Deux extractions anciennes au niveau d'un affleurement rocheux au sommet. Repérées au téléobjectif. Probablement des alvéoles d'abattage au feu	ancien	35°17'8.29"	04°53'3.13"
Oued Stehat	O-S-M-2	40	Cu	Ag, Zn	filonnets, nids	malachite, azurite, cuprite, bornite	20-35	E-O	quartz, quartzite, schiste détritique micassé	Exploitation moderne (protectorat espagnol) par mine à ciel ouvert (l: 4m, L : 5 m), et probable exploitation ancienne sur front de taille au niveau d'un affleurement de cuivre de 8m de long pour 4 m de large. M	ancien/moderne	35°09'58.3"	04°55'22.2"
Oued Jnan Nich	O-J-N-M-2	41	Cu	Ni, Cr (?)	filon	chalcopryrite, malachite, bornite?, cuprite?	30-45	N-O/S-E	quartz, roches ultrabasique avec phénocristaux de mica (porphyre?)	2 galeries superposées communicantes, exploitation moderne (protectorat espagnol). Au regard de la facilité d'extraction possible site d'extraction ancien	ancien/moderne	35°16'34.1"	04°51'35.8"

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

L'ensemble des mines modernes et des sites d'extraction anciens sera détaillé bassin fluviatile par bassin.

2.6.a) Le bassin de l'Oued Emsa



Fig. 14 : Localisation des sites d'extraction anciens et des mines moderne dans le bassin fluviatile de l'oued Emsa.

2.6.a₁) Les mines modernes

- O-E-M-4

Il s'agit d'une mine moderne exploitée par une compagnie américano-hollandaise dans les années 1980. La substance utile exploitée est le zinc, qui est minéralisée sous la forme de blende, appelée aussi sphalérite (ZnS), associée à de la galène (PbS) et de la pyrite (FeS), dans un encaissant de schiste et de quartz (Fig. 16).

Le type d'extraction consistait en trois galeries suivant les filons de minerais, orienté N-S, O-E, O/N-O. Ces galeries sont aujourd'hui effondrées. Il ne subsiste que le cône de déjection du stérile et des minerais pauvres, la halde (Fig. 15).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -



Fig. 15 : vues générale et de détail de la mine moderne O-E-M-4. Au second plan, la halde est visible. Les fronts de tailles se situent au dessus et à gauche de la halde.

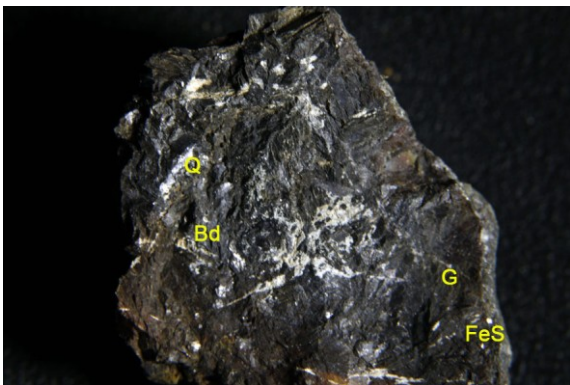


Fig. 16 : photo macro de type de minerais polymétallique extrait dans la mine moderne O-E-M-4 : Q- quartz, Bd- Blende, G- galène, FeS : pyrite.

- O-E-M-6 et O-E-M-7

Il s'agit également de mines modernes exploitées dans les années 1980. L'exploitation, sous la forme de galeries extrayait du zinc minéralisé sous la forme de minerais polymétalliques (Zn, Pb, Cu). En contrebas des entrées des galeries, des haldes sont encore parfaitement visibles (Fig. 17)



Fig. 17 : vues générale et de détail de la mine moderne O-E-M-7. Les haldes correspondent au cônes de déjection en gris.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

2.6.a₂) La mine moderne avec indices d'extraction anciens

- O-E-M-5

Il s'agit d'une mine moderne exploitée dans les années 1980. Les minerais extraits étaient de la pyrite et pyrrhotite ($Fe_{1-x}S$). Le filon est compris dans un encaissant de schiste gréseux pyriteux. Le type d'exploitation correspond à une galerie, qui suit la minéralisation N-S, exploitée de façon mécanique et à l'explosif.

A l'Est de cette mine moderne, un front de taille en gradin a été identifié. Il s'agit d'un site d'extraction plus ancien caractérisé par un mode d'extraction au pic-métallique. Le front de taille suit une minéralisation N-O/S-E en filonnets, proche d'un type stockwerk.

Le type de minerais extrait n'a pas été identifié, il peut s'agir de minerais de fer ou de cuivre. Une extraction de chalcoppyrite ($CuFeS_2$) ou de bornite (Cu_5FeS_4) ne peut être exclue car l'affleurement se situe dans la sou-zone métallogénique de cuivre (Fig. 18), à moins de 1 km au Nord du gisement cuprifère de Tikensigouene caractérisé par des minéralisations de chalcoppyrite (Milesi *et al.*, 2004)



Fig. 18 : vues générale et de détail de la mine moderne O-E-M-5 présentant un secteur d'extraction plus ancien, à gauche de la zone moderne.

2.6.a₃) Les mines anciennes

Contrairement aux mines précédentes, ces sites d'extraction anciens se situent en amont de l'Oued Emsa (Fig. 14). Ce secteur comprend probablement les sites d'extraction les plus anciens de la zone de recherche. L'ensemble de ces sites se caractérise par un type d'extraction par abattage au feu.

L'abattage au feu consiste à faire éclater la roche par un choc thermique. La roche est chauffée par l'action d'un feu puis brutalement refroidie par aspersion d'eau ; Cette

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

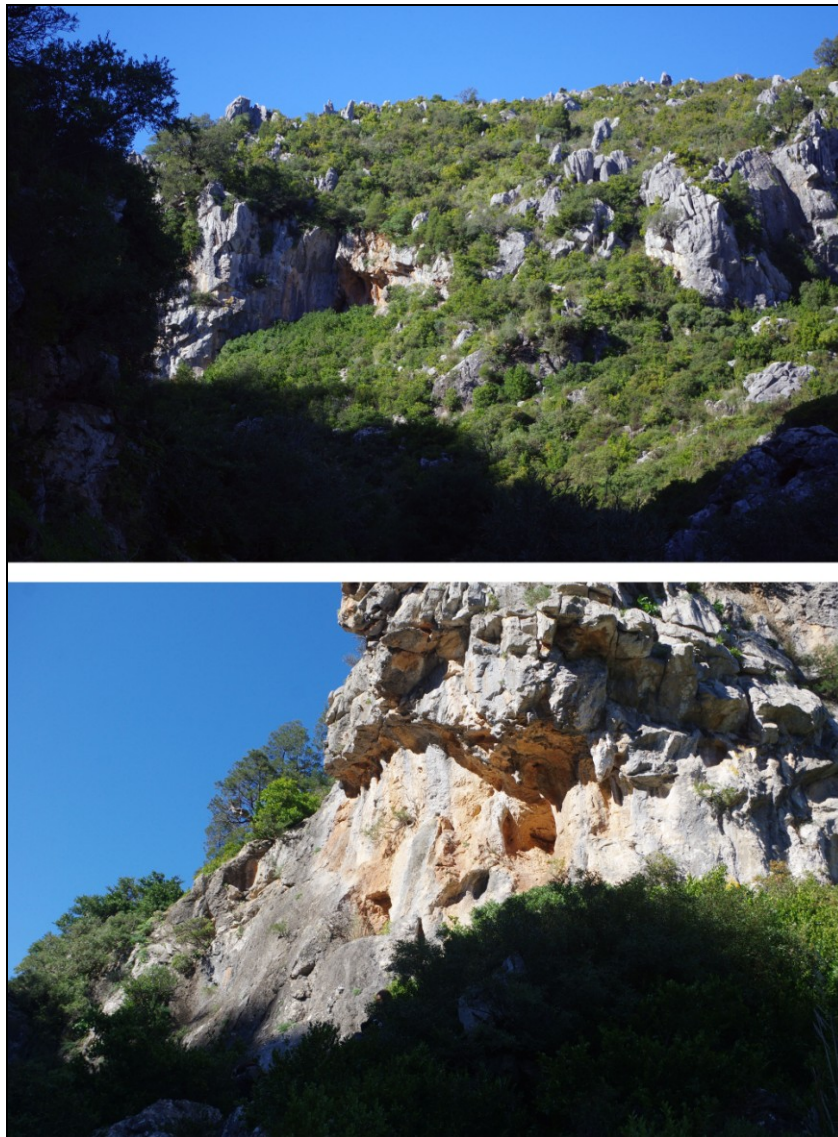
- les sites d'extraction de cuivre découverts -

combinaison conduit à étonner la roche qui se fracture. L'action de percuteurs lithiques permet ensuite de séparer les blocs de roches contenant du minerai. Cette technique d'abattage conduit à la formation de structures alvéolaires caractéristiques au niveau des parois.

- O-E-M-1

Situé au pied d'une falaise d'un plateau calcaire, le site d'extraction O-E-M-1 correspond à un vaste front de taille, long de 6 à 8 m et haut de 3 à 4 m, exploité par abattage au feu (Fig. 19). L'intensité de l'extraction a conduit les alvéoles à former une structure sous voûte. Certaines alvéoles ont générées des cavités d'extraction, dont certaines communiquent entre elles par des boyaux. Les minerais exploités est cuprifères selon les données métallogéniques de la zone. Toutefois, aucune minéralisation de cuivre n'a été observée.

La densité du couvert végétal n'a pas permis une prospection intensive. Néanmoins, il est fort probable que de nombreux macro-outils d'extraction se trouvent encore en contrebas du front de taille.



La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

Fig. 19 : vue générale et de détail du site d'extraction ancien O-E-M-1. Il se caractérise par de nombreuses alvéoles d'abattage au feu qui ont formé, au regard de l'intensité de l'extraction, une structure sous-voûte.

- O-E-M-2



Fig. 20 : Vue générale et de détail du site d'extraction ancien O-E-M-2.

Il s'agit d'un site d'extraction ancien, au niveau d'une falaise, dont le principe d'extraction est similaire au site d'extraction O-E-M-1. Il s'agit d'abattage au feu dont l'intensité à fini par créer une cavité artificielle, semblable à un abri sous roche (Fig. 20).

Les fronts de taille suivent trois filons : l'un orienté N-S et deux autres O-E (Fig. 21). Les minerais extraits sont fort probablement cuprifère selon les données métallogéniques de la zone. Aucun indice de minéralisation de cuivre n'a été observé.



Fig. 21 : Vue de détail des alvéoles d'abattage suivant le filon N-S (à gauche) et les deux filon O-E (à droite).

- O-E-M-3

Ce site d'extraction, au pied d'une falaise, est alignée avec O-E-M-2, il est fort probable qu'il s'agit du même filon de cuivre. Les formes des structures arrondies suggèrent un abattage au feu (Fig. 22). L'accès au site s'est avéré très compliqué et inaccessible en raison du couvert végétal dense et du relief accidenté.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -



Fig. 22 : Vue générale et de détail du site d'extraction ancien O-E-M-3

2.6.b) Le bassin de l'Oued Laou



Fig. 23 : Localisation des sites d'extraction anciens et des mines moderne dans le bassin fluvial de l'oued Laou.

2.6.b₁) Les mines modernes

- O-L-M-2

Il s'agit d'une mine moderne exploitée avant le protectorat espagnol puis réexploitée dans les 1990-2000. Dans un encaissant de calcaire gréseux et de schiste, la galerie suit le filon selon une orientation E-O et un pendage de 30°-35°. Selon les sources locales, les minerais extraits seraient de la galène.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

- O-L-M-12

Au niveau d'un affleurement de schistes métamorphisés, deux filons de galène associés à de la sphalérite ont été exploités mécaniquement par front de taille selon une orientation E-O. Cette mine moderne remonterait à l'époque du protectorat espagnol.

2.6.b₂) Les mines modernes avec indices d'extraction anciens

- O-L-M-3

L'affleurement massif de quartz orienté N-S héberge des filons de cuivre d'une puissance de 15 à 17 cm, orientés O-E. Les minerais cuprifères sont : la chalcoppyrite, la bornite, la malachite et l'azurite (Fig. 24). A l'origine, deux filons massifs de quartz existaient (Fig. 23). Une mine moderne a exploité et détruit dans les années 2000 l'affleurement à l'Est.



Fig. 23 : vue générale et de détail de l'affleurement massif de quartz subsistant et abritant la minéralisation cuprifère.

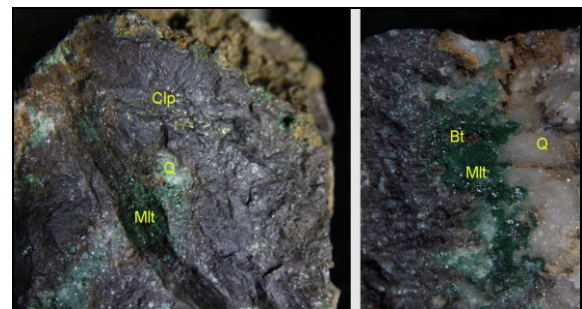


Fig.24 : fragment de minerais cuprifère collecté in situ au niveau du site d'extraction ancien O-L-M-3. Q : quartz, Clp : chalcoppyrite, Mlt : malachite, Bt : bornite.

Au niveau l'affleurement de quartz subsistant, des traces d'extraction anciennes au pic métallique ont été observées au niveau de plusieurs fronts de taille exploitant des filons cuprifères (Fig. 23). Au regard de la puissance de la minéralisation cuprifère, ce site d'extraction ancien devait constituer une ressource importante en minerais pour les métallurgies anciennes dans la région du Rif.

- O-L-M-4

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

Une mine moderne a exploitée par front de taille dans les années 2000 un filon de cuivre (chalcopyrite), sous la forme de stockwerk, hébergé dans une veine de quartz associée à un affleurement de schistes et de calcaires gréseux.



Fig. 25 : vue générale et de détail de la mine moderne avec indice d'extraction ancien O-L-M-4.



Fig. 26 : vue de détails des zones présentant des traces d'extraction ancienne au pic métallique.

A plusieurs endroits, des traces d'extraction plus anciennes ont été observée au niveau de fronts de taille situés le long des veines de quartz (Figs. 25 & 26). La chalcopyrite reste un minerai complexe à réduire, ce site d'extraction ne serait pas en lien avec les premières métallurgies mais plutôt avec des métallurgies de technologie avancées (pré-antique ?).

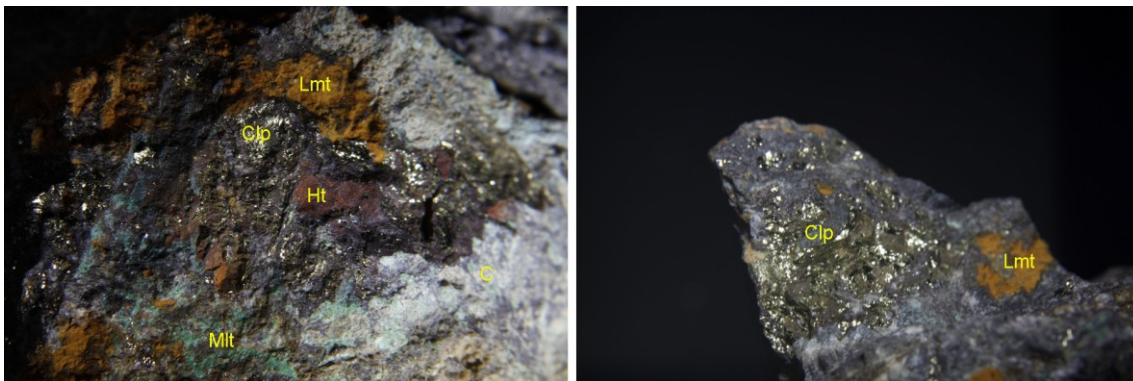


Fig. 27 : Photos macroscopiques des minerais de cuivre du filon. Lmt : limonite, Clp : chalcopyrite, Ht : hématite, Mlt : malachite.

- O-L-M-5

Sur le versant oriental, au niveau de la cluse de l'oued Laou, à l'extrémité occidentale de la sub-zone métallogénique de manganèse, une mine moderne a été identifiée. Elle remonte

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

à la période du protectorat espagnol, et exploitait par fronts de taille des minerais de psilomélane (MnO_2).

Plusieurs structures anthropiques, très proches d'alvéoles d'abattage au feu, ont également été repérées à proximité. Si il est peu probable qu'elles sont associées à l'exploitation de manganèse, nous n'excluons pas qu'elles sont en lien avec l'extraction de minerais de cuivre. Ces indices sont situés dans la sous-zone métallogénique de cuivre. Il n'est donc pas exclu que des minéralisations cuprifères secondaires caractérisent également ce gîte de manganèse. Le cuivre ne serait pas référencé car il ne représente aucun intérêt industriel.

- O-L-M-6 à O-L-M-10

Il s'agit d'un chapelet de mines modernes présentant des indices d'extraction ancien en lien avec le site O-L-M-3 (Fig. 28). Ces sites d'extraction de minerais de cuivre suivent probablement un filon de cuivre orienté O-E. Les minéralisations de cuivre (chalcopryrite, malachite, azurite), sous la forme de filons et filonnets, associées à de la pyrite, sont portées par une veine de quartz-quartzite hébergée dans des schistes et des calcaires gréseux (Figs. 29 & 30).

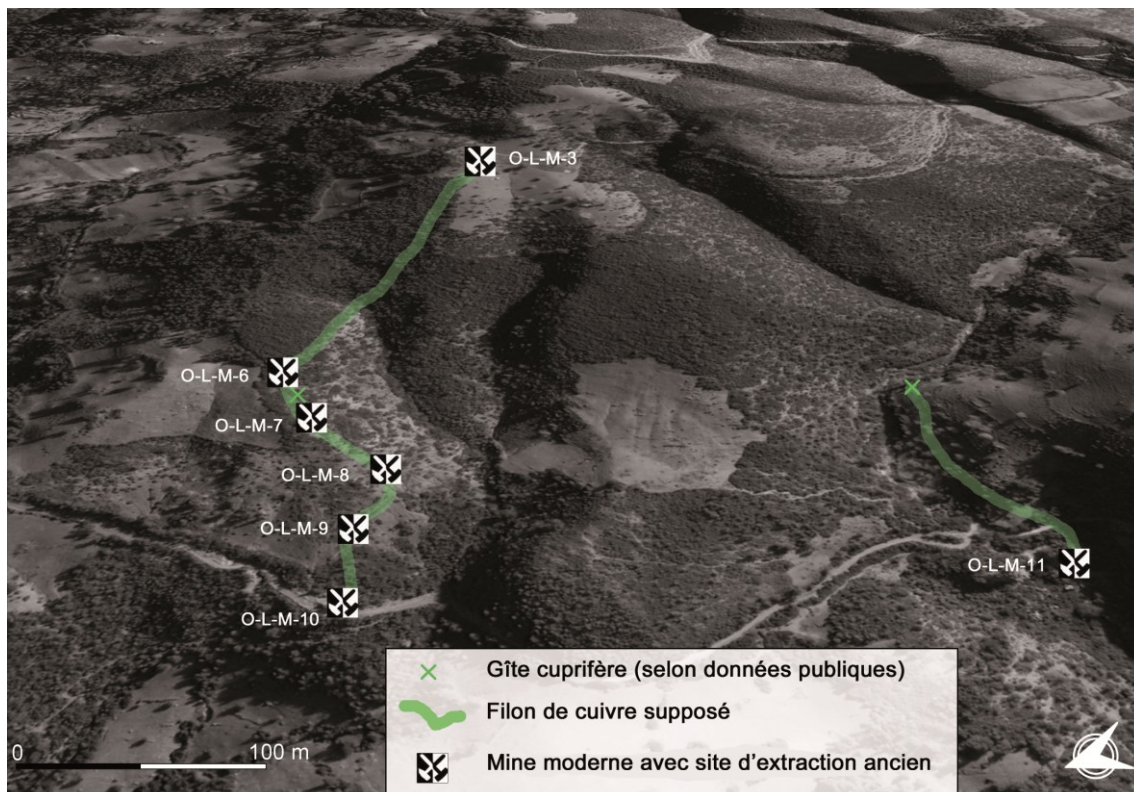


Fig. 28 : cartographie schématique de la répartition des mines modernes avec site d'extraction ancien O-L-M-6 à O-L-M-10 et leur positionnement par rapport à O-L-M-3 et O-L-M-11 ainsi qu'avec le filon cuprifère supposé.

Les mines modernes correspondent à des fronts de taille, parfois des boyaux, exploités mécaniquement. Ces mines comportent toutes un secteur caractérisé par des traces anciennes d'extraction. Il s'agit de traces d'extraction au pic-métallique (Fig. 29).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -



Fig. 29 : Vue générale (en haut) de la mine moderne avec indices d'extraction ancien O-L-M-7. Vue de détail (à gauche) de la mine moderne exploitée par boyau et vue de détail (à droite) du front de taille ancien exploité par pic métallique.

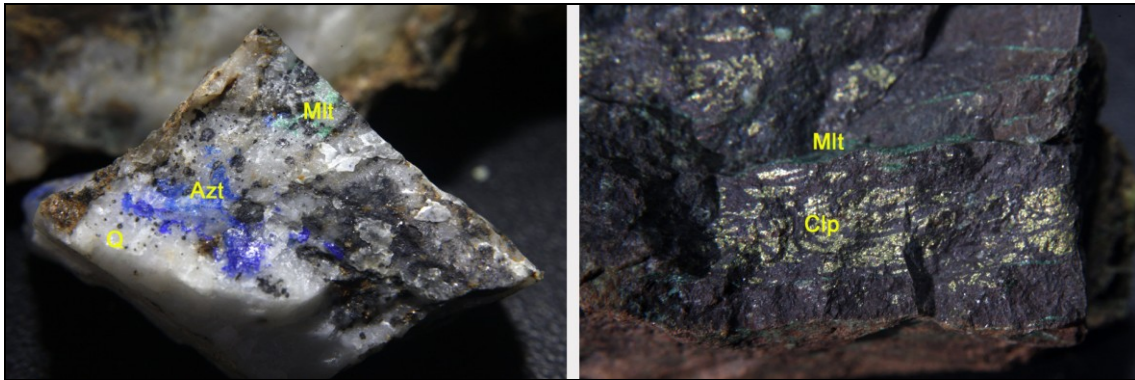


Fig. 30 : exemples de minerais cuprifères minéralisés dans les sites O-L-M-6 à O-L-M-10. Q : quartz, Azt : azurite, Mlt : malachite, Clp : chalcopyrite.

- O-L-M-11

Ce site, situé au Sud du chapelet de mines O-L-M-6 à O-L-M-10 (Fig. 28), est l'un des plus difficile d'accès (Fig. 31). Sa reconnaissance a nécessité l'intervention de spéléologues professionnels.

La minéralisation, orientée O-E, correspond a de fins filonnets de malachite et des imprégnations d'atcamite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) (Fig. 32). Au regard des minéralisations observées dans le secteur, nous ne pouvons exclure la présence de chalcopyrite. Il s'agit d'ailleurs probablement du type de minerai extrait au niveau de la mine moderne.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -



Fig. 31 : vue générale de la mine moderne avec indice d'extraction ancien O-L-M-11. La mine moderne est en contrebas de la falaise (photo générale en bas à droite, photo de détail en bas à droite), les deux secteurs d'indices d'extraction anciens sont au milieu de la falaise (photo générale au milieu à droite, photo de détail en haut à droite).

La mine moderne se situe en contrebas de la falaise. Elle correspond à un front de taille avec extraction mécanique au pic (Fig. 31).

Le site d'extraction ancien correspond à deux secteurs (Fig. 31). Il s'agit d'une alvéole d'abattage au feu située un peu plus haut à gauche de la mine moderne. Le second secteur est une cavité surplombant l'alvéole. Ce second secteur n'a pu être étudié en détail en raison de son accès extrêmement difficile.

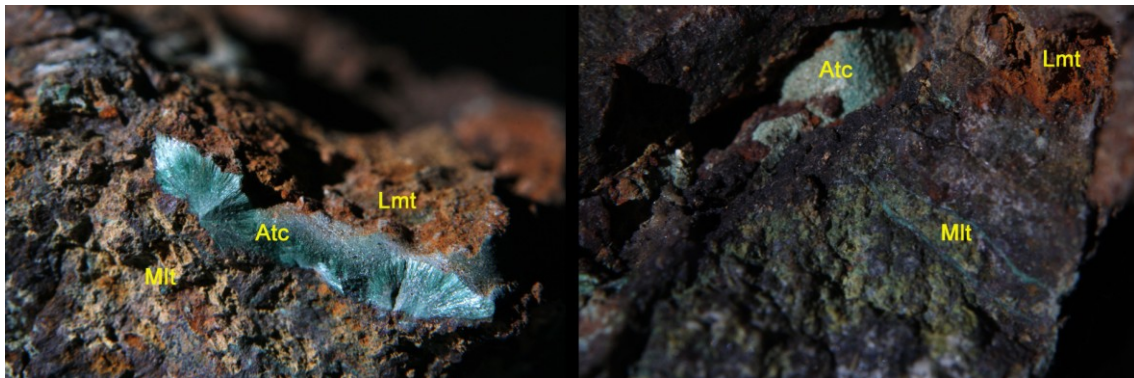


Fig. 32 : exemples de minerais cuprifères minéralisés dans le site O-L-M-11. Mlt : malachite, Atc : atacamite, Lmt : limonite.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

2.6.c) Le bassin de l'Oued Stehat

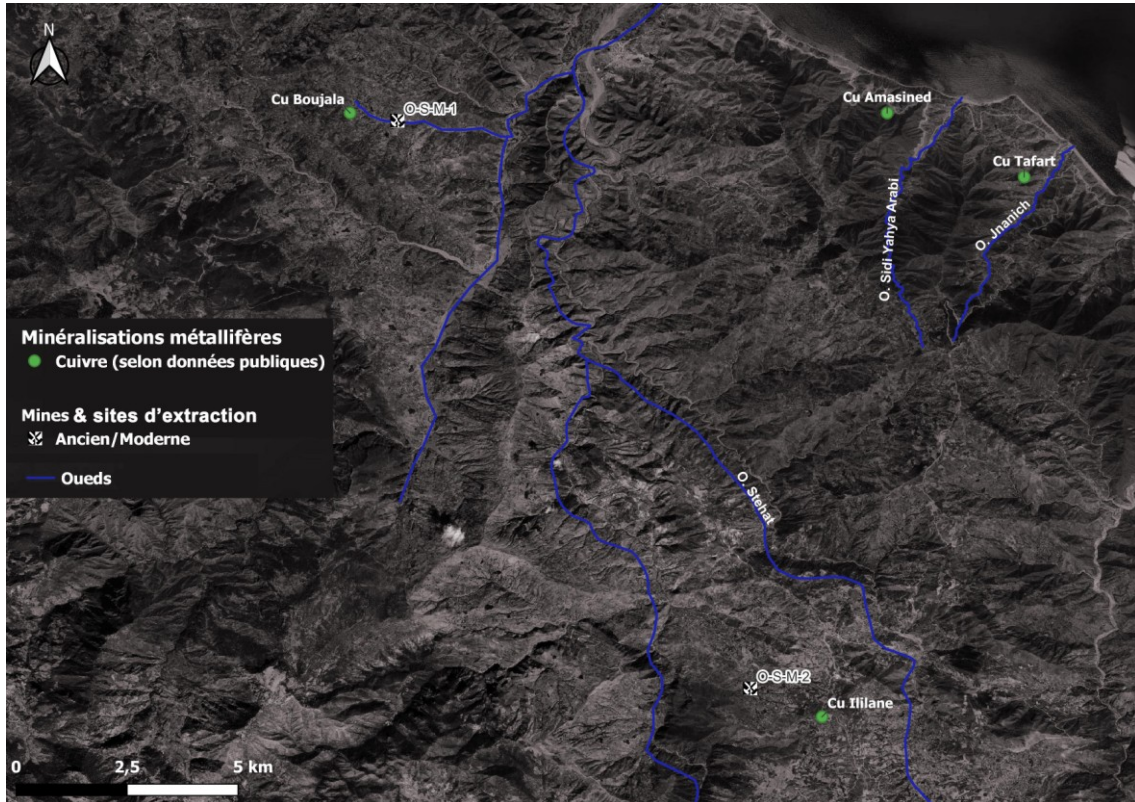


Fig. 33 : Localisation des sites d'extraction anciens et des mines moderne dans le bassin fluviatile de l'oued Stehat.

Au niveau de ce bassin, deux mines modernes présentant des indices d'extraction anciens ont été identifiées.

- O-S-M-1

La mine moderne, remontant au protectorat espagnol, a poursuivi une exploitation plus ancienne. L'amorce de la galerie moderne est visible au niveau de la saillie verticale sur la paroi Ouest (Fig. 34). L'entrée a été élargie lors de la mine moderne. Il ne subsiste que peu d'indices de l'extraction ancienne. Quelques traces de pic métallique ont été observées sur la paroi Est du travers-banc.

Les exploitations suivaient un filon de cuivre, orienté N-S, d'une puissance de 37 cm. La minéralisation est portée par une veine de quartz hébergée dans des schistes micacé métamorphisés comprenant des péridotites, harzburgites et dunités. Le minerai correspond à de la chalcopryrite et de la malachite associés à des chromites et de la pyrite (Fig. 35).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -



Fig. 34 : vue générale de la mine moderne avec indice d'extraction ancien O-S-M-1. Sur la photo de droite, au second plan, au niveau de l'entrée, la saillie verticale sur la paroi de droite marque le début de la mine moderne qui s'est alignée dans les travaux d'extraction plus ancien.

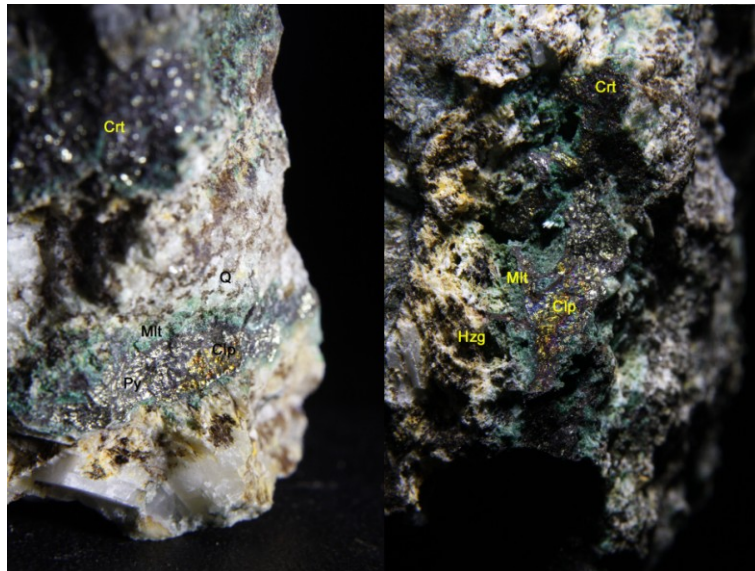


Fig. 35 : exemples de minerais cuprifères minéralisés dans le site O-S-M-1. Q : quartz, Clp : chalcopyrite, Mlt : malachite, Cr : chromite, Py : pyrite, Hzt : harzburgite.

- O-S-M-2

Il s'agit de la mine la plus méridionale de la zone d'étude. La mine moderne a exploitée par un front de taille à ciel ouvert une minéralisations cuprifère, orientée E-O, portée par des veines de quartz hébergée par des schistes détritiques micacé.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -



Fig. 36 : vue du côté sud de l'affleurement de cuivre. Ce secteur présente des traces de pic métallique qui suggèrent une exploitation ancienne.

La mine moderne est située en contrebas de l'affleurement, sur sa face Est. Au niveau du côté Sud, un front de taille a été également exploité. Les quelques traces de pic métallique suggèrent qu'il s'agit d'une exploitation ancienne (Fig.36)

Les minerais cuprifères correspondent à de la malachite, azurite, bornite, cuprite associés à de la sphalérite et de l'argent natif (Fig.37).

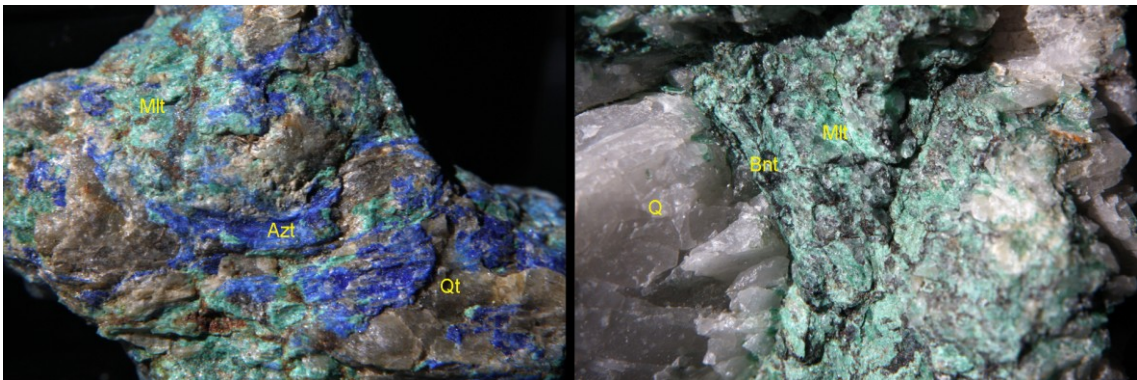


Fig. 37 : exemples de minerais cuprifères minéralisés dans le site O-S-M-2. Qt : quartzite, Mlt : malachite, Azt : azurite, Bnt : bornite.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

2.6.d) Le bassin de l'Oued Hamza

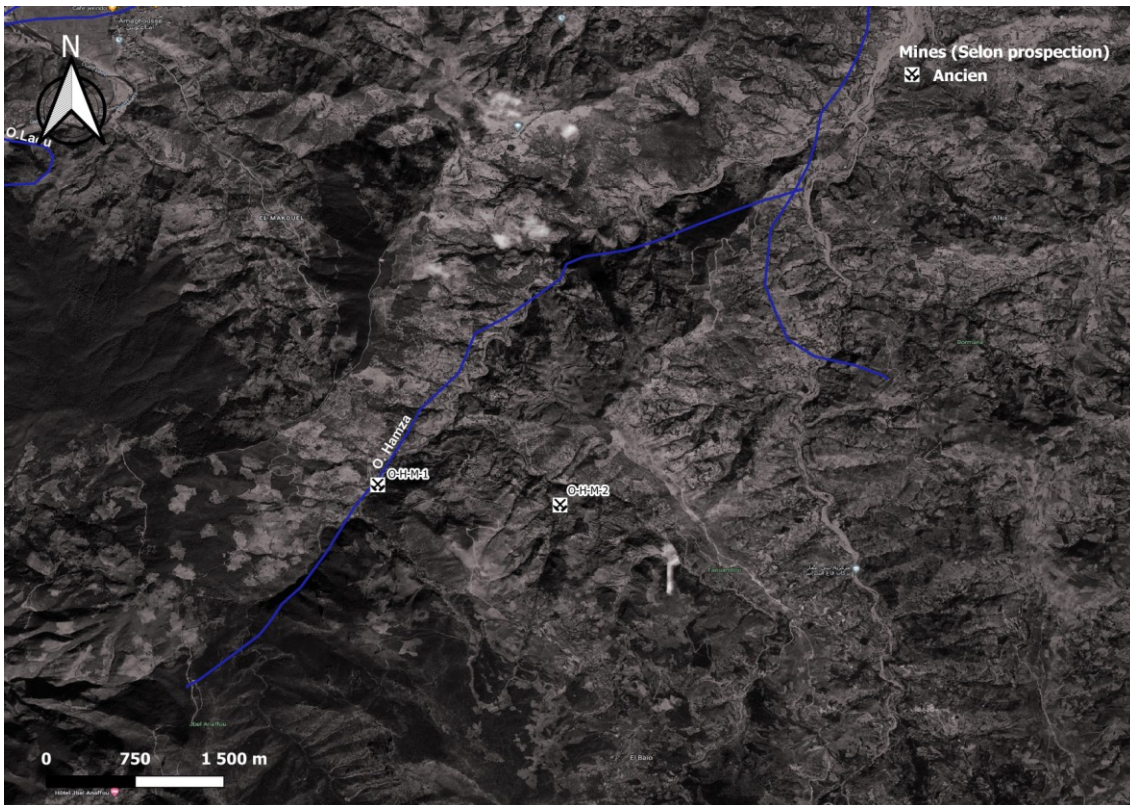
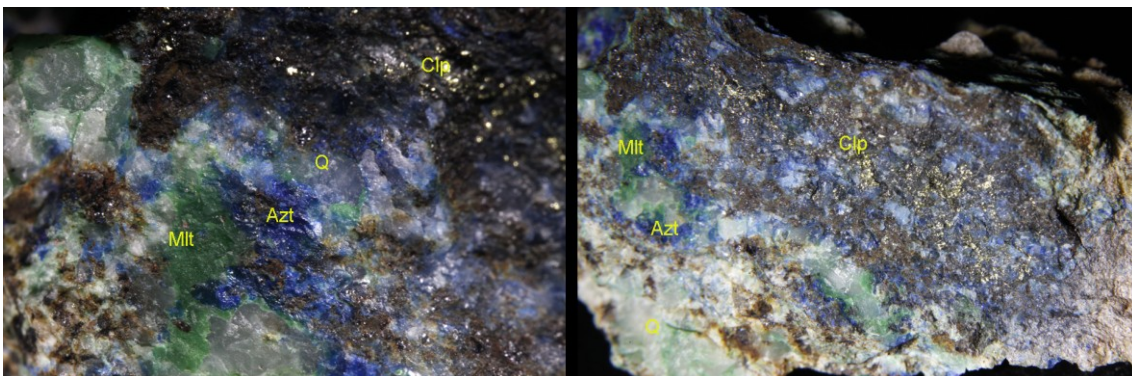


Fig. 38 : Localisation des sites d'extraction anciens et des mines moderne dans le bassin fluvial de l'oued Hamsa.

Les sites d'extraction O-H-M-1 et O-H-M-2 correspondent à des exploitations au niveau d'affleurements de cuivre portés par des veines de quartz au sein de schistes fortement métamorphisés et comprenant de la serpentine.

O-H-M-1 correspond à une exploitation par front de taille directement sur la minéralisation de cuivre. Des traces d'extraction au pic sont visible au niveau des veines de malachite.

Le second site, O-H-M-2, se situe au niveau d'un affleurement de cuivre en surface. Les blocs de schiste et de quartz portant la minéralisation de cuivre (chalcoppyrite, chrysocole, malachite, azurite) affleurent au sol. L'extraction des minerais correspond à une collecte de ces blocs minéralisés.



La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

Fig. 39 : exemples de minerais cuprifères minéralisés dans le site O-H-M-2. Q : quartz, Mlt : malachite, Azt : azurite, Clp : chalcopryrite.

2.6.e) Le bassin de l'Oued Sidi Yahya Aarabi

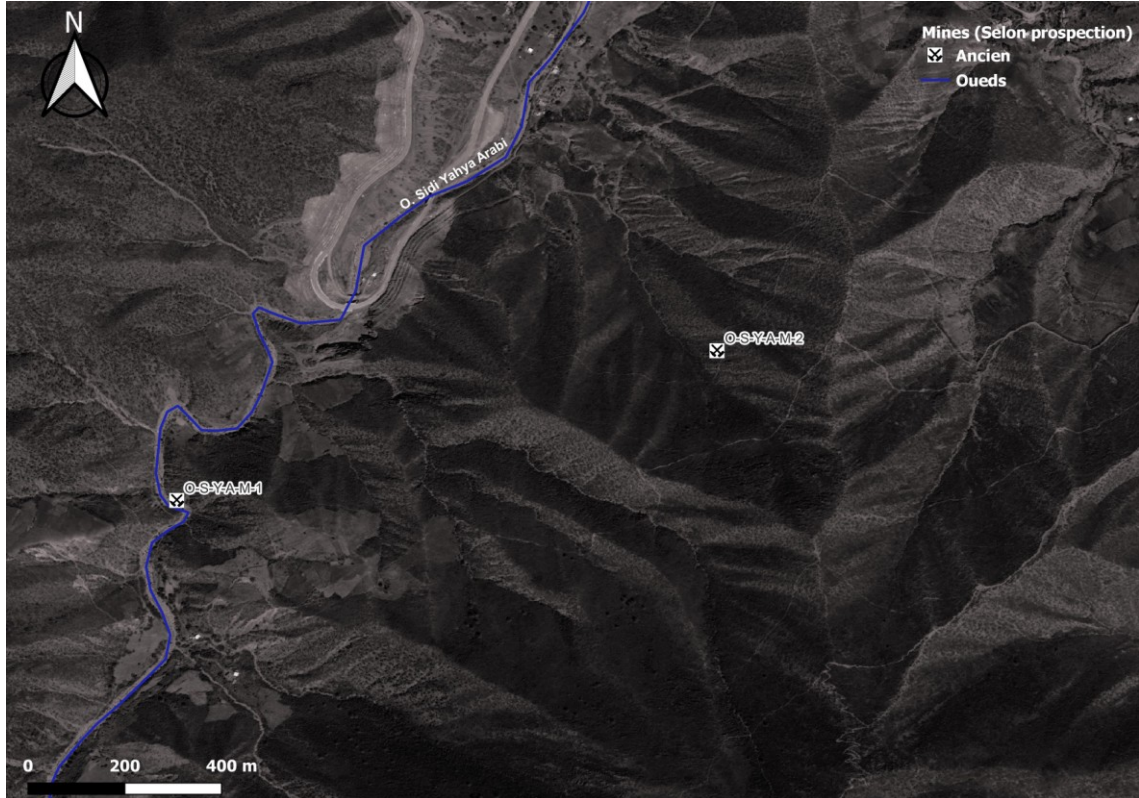


Fig. 40 : Localisation des sites d'extraction anciens et des mines moderne dans le bassin fluvial de l'oued Sidi-Yahia-Aarabi

Des blocs de quartz associés à de la serpentine portant des minéralisations de cuivre (malachite, azurite) ont été identifiés à proximité du cours de l'oued. De nouveau, pour le site O-S-Y-A-M-1 l'extraction des minerais correspond à une collecte de ces blocs minéralisés.

Un alignement de cavités, résultant probablement d'une extraction par abattage au feu, a été observé au téléobjectif au niveau d'un affleurement rocheux. Il semble qu'il s'agissent de sites d'extraction ancien au niveau d'une minéralisation de cuivre (Fig. 41). La difficulté d'accès et la distance importante ont été des freins à l'étude ce site O-S-Y-A-M-2.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -



Fig. 41 : Vue au téléobjectif de l'alignement de cavités (au second plan), résultant probablement d'une extraction par abattage au feu.

2.6.f) Le bassin de l'Oued Jnan Nich

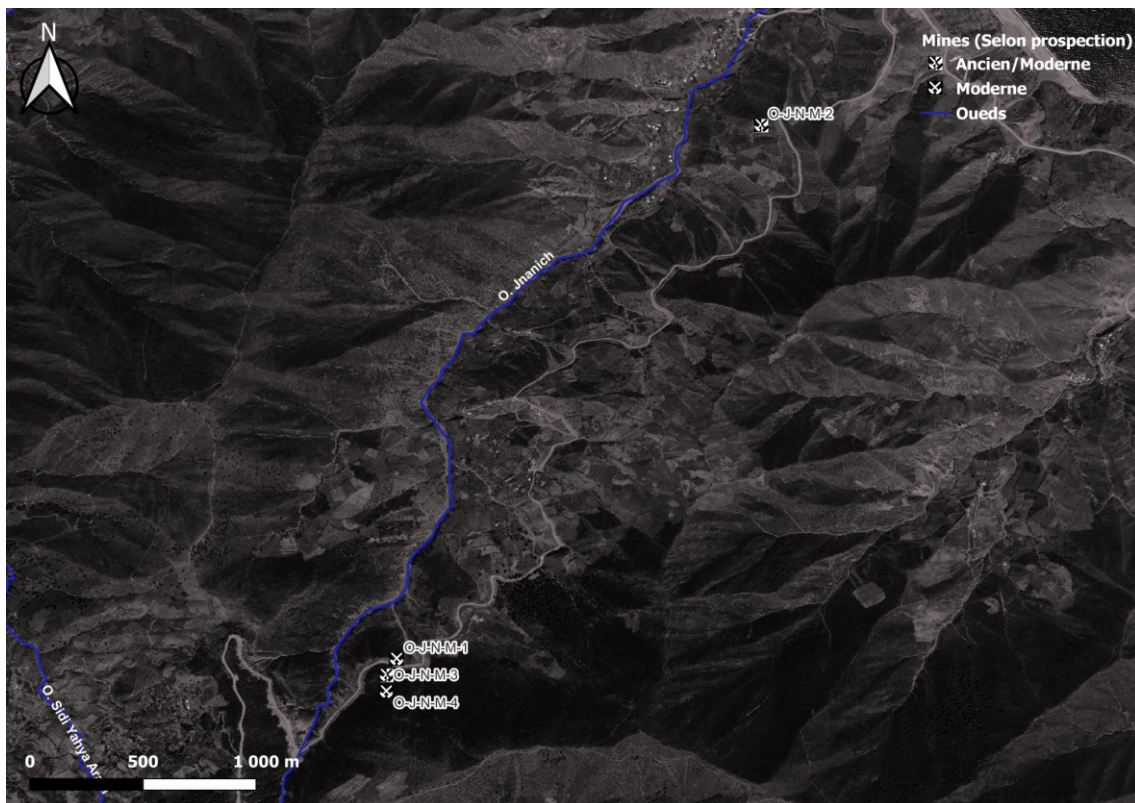


Fig. 42 : Localisation des sites d'extraction anciens et des mines moderne dans le bassin fluvial de l'oued Jnan-Nich.

2.6.f₁) Les mines modernes

- O-J-N-M-1 et O-J-N-M-4

Il s'agit de deux mines modernes exploitées pour le cuivre au cours du protectorat espagnol. Le minerai de cuivre de ce secteur est complexe car polymétallique (cuivre, zinc et

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -

argent) et hébergé dans des roches fortement métamorphisées (schistes, serpentine, népouite) (Fig. 43). L'extraction du minerai de ce type d'encaissant est complexe et nécessite des techniques d'abattage mécanisés et/ou à l'explosif.

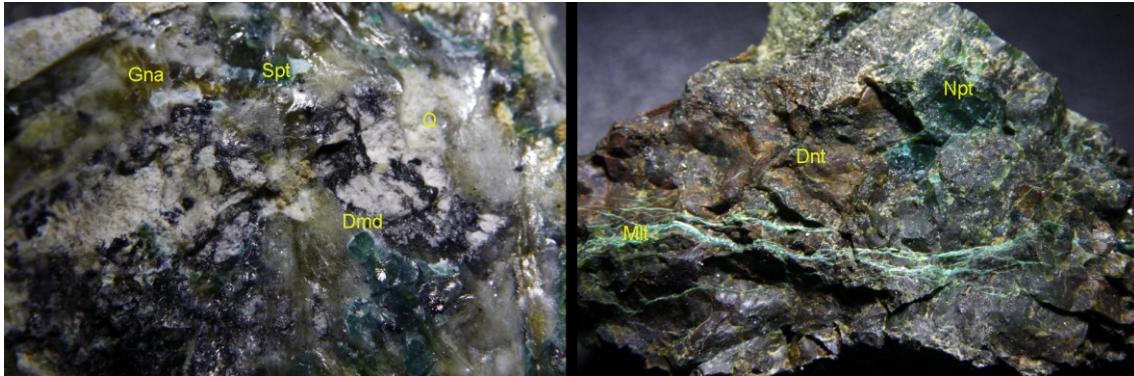


Fig. 43 : exemples d'encaissant (à gauche) et de minerai cuprifère (à droite) minéralisés dans le site O-J-N-M-1. Q : quartz, Gna : grenat, Dmd : demantoïde (famille des grenats), Spt : serpentine, Mlt : malachite, Dnt : dunité, Npt : népouite.

De plus, le cuivre est minéralisé sous forme de filonnets disséminés dans cet encaissant (Fig. 43) . De ce fait, il faut concasser un volume important de minerais pour obtenir une certaine quantité de concentré.

La géologie de ce secteur ne permet pas l'extraction de cuivre aux époques préhistoriques.

2.6.f₂) Les mines modernes avec indices d'extraction anciens

- O-J-N-M-3

Cette mine moderne surplombe O-J-N-M-1 et O-J-N-M-4. Elle a également été exploitée au cours du protectorat espagnol. Mais contrairement aux deux précédentes, elle se situe au niveau de la zone lessivée et du gossan du filon de cuivre (Fig. 11). L'encaissant est altéré et les minerais cuprifères sont (hydro-) carbonatés et/ou oxydés (azurite, bornite, cuprite, spaniolite, malachite).

Ce type de minerais et l'encaissant dégradé sont plus facile à extraire à des périodes anciennes. A 3 m à l'Ouest de la mine moderne, des traces d'extraction anciennes au pic ont été identifiées sur un front de taille.- O-J-N-M-2

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les sites d'extraction de cuivre découverts -



Fig. 44 : Vue de la galerie inférieure du site O-J-N-M-2 (photo de gauche). Au dessus de la galerie creusée à l'époque du protectorat espagnol, les traces d'une extraction plus ancienne (symbole mine sur fond blanc). Vue du filon de cuivre d'une puissance de 50 cm (photo en haut à droite), vue de détail de la minéralisation de cuivre (malachite) dans un échantillon de minerais (photo en bas à droite).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -

2.7] Les indices métallurgiques au niveau des sites

2.7.a) Kach-Kouch

La reprise des fouilles sur le site a permis la découverte d'indices majeurs liés à la métallurgie extractrice de cuivre.

2.7.a₁) Unité stratigraphique 12

Les indices découverts dans cette unité stratigraphique illustrent une grande partie de la chaîne opératoire de la métallurgie de réduction de cuivre (Fig. 45).

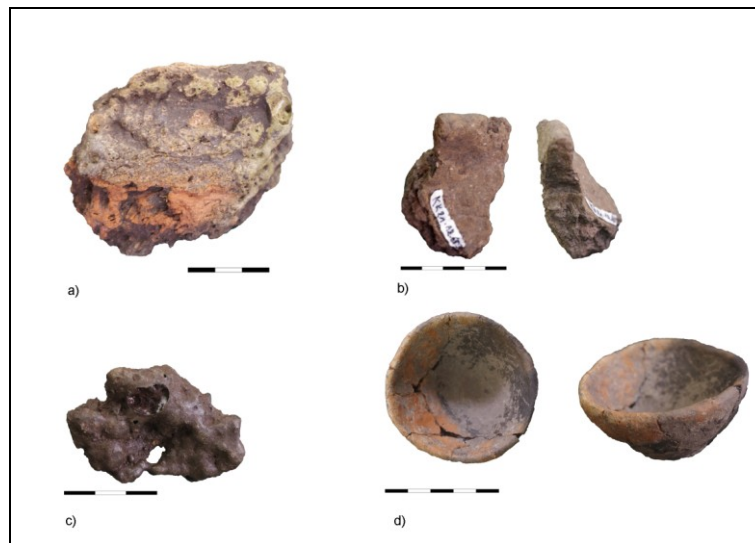


Fig. 45 : indices métallurgiques découverts dans l'US 12 de Kach-Kouch : a) fragment de paroi de four métallurgique scoriacé, b) fragment de céramique technique : creuset de réduction, c) scorie de réduction, d) céramique technique : creuset de fonte.

- fragment de paroi de four scoriacé

Il s'agit d'un fragment de la paroi supérieure d'un four de réduction (Fig. 45 n°a). L'épaisseur de la paroi est de 3,5 cm. La zone scoriacée vitreuse suggère des températures de l'ordre de 1200°-1400°C. La présence de scorie permet de supposer l'usage d'un système de ventilation forcée (pot à souffler « *pot-bellows* », chalumeaux, « *blow-pipe* » ou tuyère ?) qui devait être à proximité de cette partie du four. En effet, c'est à la proximité immédiate de la sortie de l'outil de ventilation forcée que se forme la scorie.

- fragment de creuset de réduction

Cette céramique technique se caractérise par un dégraissant au 3/4 végétal et 1/4 minéral (quartz) (Fig. 45 n°b). Son diamètre est estimé à 12 cm. Son volume est de l'ordre de 100 cm³. Au regard de sa forme, du type de dégraissant et du contexte de découverte, cette céramique technique est probablement un creuset de réduction.

- scorie de réduction

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -

Il s'agit d'une scorie brun sombre fortement bulleuse et légère (5,45 g) (Fig. 45 n°c). L'un de ses côtés est convexe. Cette caractéristique suggère que cette scorie tangentait le bord concave d'un creuset de réduction.

- creuset de fonte

Cette petite céramique technique, d'un diamètre de 7 cm, présente un volume de 45 cm³ (Fig. 45 n°d). Une partie de la lèvre et l'intérieur du creuset présente un fin encroutement scoriacé. Il s'agit de la face qui a reçu directement la ventilation forcée. Ce creuset devait être destiné à fondre les billettes, nodules et fragments de métal recueillis après la réduction (cf. § « chaîne opératoire »)

2.7.a₂) Unité stratigraphique 18-510

Cette céramique technique est un fragment de l'extrémité d'un système de ventilation forcée : une tuyère coudée (Fig. 46). Il s'agit de la buse qui est à 90° par rapport au tube, cassé et disparu.



Fig. 46 : Fragment d'un système de ventilation forcée. Buse de tuyère coudée.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -

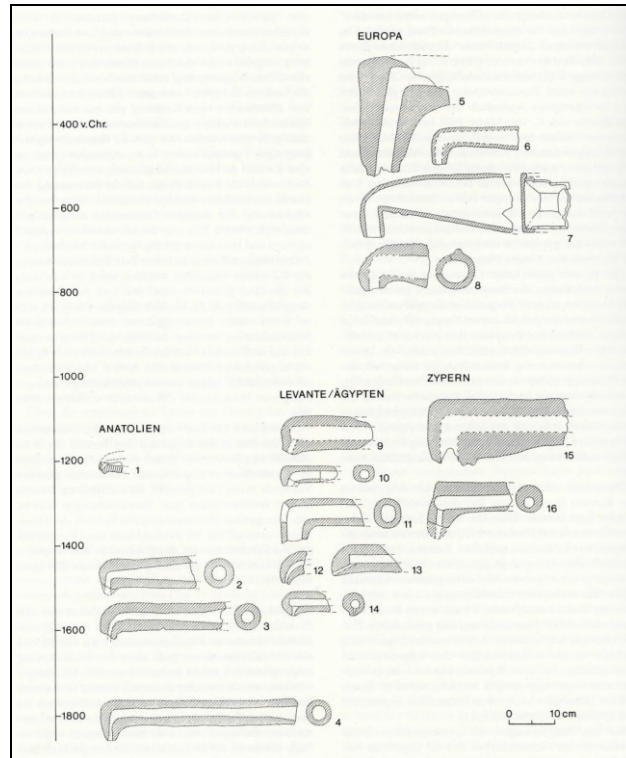


Fig. 47 : typologie des tuyères coudées (d'après Müller-Karpe, 1994 : 116)

Le principe de cet outil est d'injecter de l'air directement au dessus d'un creuset de réduction afin d'augmenter la température en un point précis. Ce type de tuyère est souvent connecté à un pot à soufflet (Figs. 47, 48 & 49).

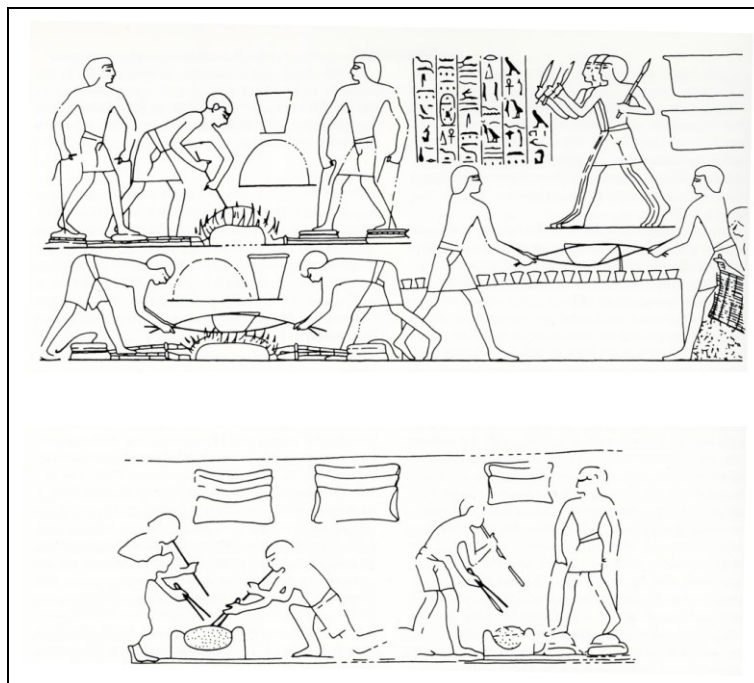


Fig. 48 : reproduction de bas-reliefs égyptiens représentant des métallurgistes (d'après Müller-Karpe, 1994 : 120).

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -



Fig. 49 : fragments de *pot-bellows* découverts dans un site de l'âge du bronze en Autriche et reconstitutions expérimentale de la production et du fonctionnement du *pot-bellows* (Töchterle U. et al., 2013).

2.7.a₃) Unité stratigraphique 26

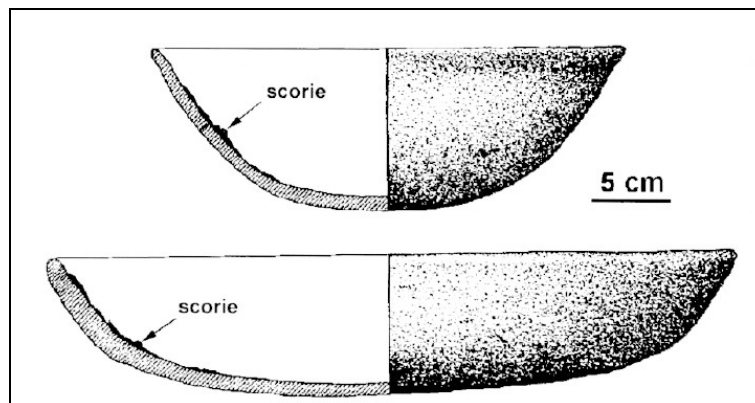
- vase-four

Il s'agit d'une céramique technique liée à la métallurgie comme le suggère la partie scoriacée au niveau du bord (Fig. 50). La forme de cette céramique laisse à penser qu'il puisse s'agir de vase destiné à réduire le minerai (Fig. 51).



Fig. 50 : Fragments de céramique technique : vase-four destiné à réduire du minerai.

Les vases fours sont bien connus en péninsule ibérique, notamment dans le Sud-Est de l'Espagne. Leur utilisation remonterait à la première moitié du 5e millénaire et se poursuivrait jusqu'au 2e millénaire avant notre ère (Roviera *et al.*, 1993)



La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -

Fig. 51 : Formes de vase à réduire le minerai (d'après Roviera et al., 1993)

- scories

Deux petites scories, présentant des bords irréguliers, ont été découvertes dans cette US (Fig. 52). Il s'agit de scories de réduction qui ont été concassées afin de récupérer les billes de métal piégées dans cette gangue de stérile (*cf.* § « chaîne opératoire »).

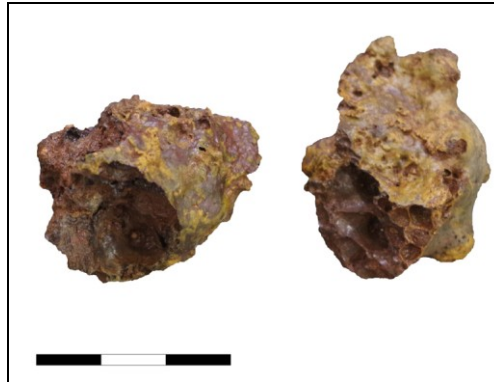


Fig. 52 : Fragments de scories de réduction concassées

2.7.a₄) Unité stratigraphique 49

Un fragment de vase-four, avec un encroûtement scoriacé au niveau du bord, a également été découvert dans cette US (Fig. 53). Il confirme l'usage de vase-four pour la métallurgie de réduction à Kach-Kouch.

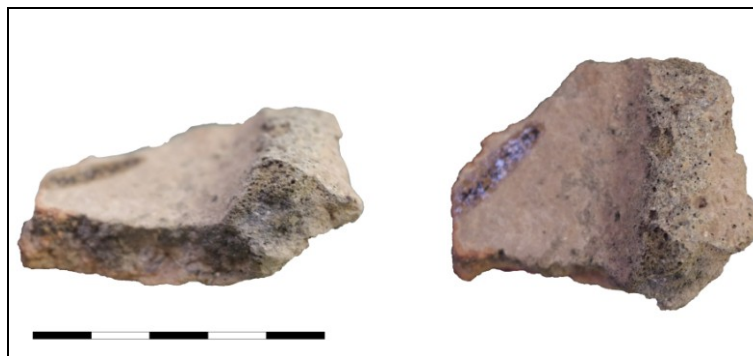


Fig. 53 : Fragments de céramique technique : vase-four destiné à réduire du minerai

2.7.a₅) Unité stratigraphique 111

Une scorie brun-verdâtre, d'un poids de 8,12g, a été découverte dans cette US. L'un de ses bords est convexe. Il s'agit probablement d'une scorie de réduction surnageant dans un creuset de réduction

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -

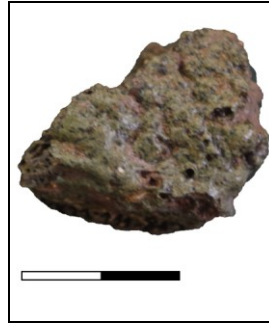


Fig. 54 : Scorie de réduction présentant un bord convexe.

2.7.b) Le site métallurgique de Stehat-22

Les prospections dans le bassin de l'oued Stehat ont permis d'identifier un site anthropique datant probablement de la fin du 1^{er} millénaire avant notre ère (latitude : 35°20'7.80"N, longitude : 4°57'31.00"O).

Ce site est caractérisé par une zone métallurgique au niveau du versant nord-est. Elle comprend des scories et des fours métallurgiques (Fig. 55).



Fig. 55 : Vue depuis l'Est du site Stehat-22. La zone de concentration d'indices métallurgiques est marquée par l'ellipse en pointillées rouges

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -



Fig. 56: vue depuis l'Est de la zone des foyers en batterie.

Les fours ont été identifiés par leur parois qui affleurent en surface. Ils sont en batterie de quatre au cinq fours (Figs. 56 & 57). Leur dimensions semblent identiques ; les parois mesurent 2,5 cm à 3,5 cm d'épaisseur et le diamètre des fours est compris entre 22 et 24 cm. Ces caractéristiques sont proches de celle observée en Mauritanie au niveau de fours métallurgiques dans des sites datés du 1^{er} millénaire avant notre ère (Courcier, 2019 ; Courcier et al., 2019).

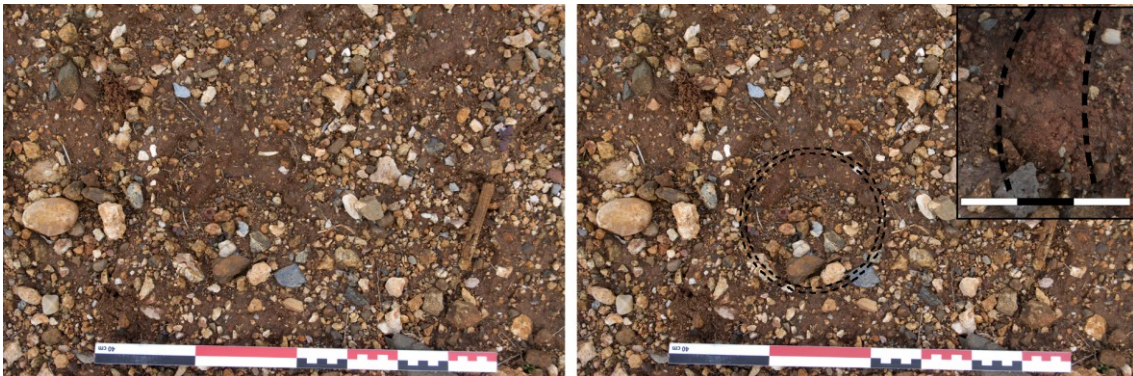


Fig. 57 : vue en détail d'un des foyers métallurgiques et vue en plan rapproché de la paroi (photo en haut à droite)

Plus de 3,7 kg de scories ont été collecté au niveau de la zone métallurgique (Fig. 58).



Fig. 58 : exemple de quelques une des scories découvertes au niveau de la zone métallurgique du site Stehat-22.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -

Un bloc scoriacé de 2,4kg, long de 16 cm et large de 13 cm a également été découvert (Fig. 59). Il se caractérise par une quantité importante de gangue minérale dont la maille atteint 3-4 cm. Ce bloc illustre un problème dans le processus de réduction.



Fig. 59 : bloc scoriacé massif scories découvertes au niveau de la zone métallurgique du site Stehat-22.

A l'exception de cette masse scoriacée, les scories sont de quatre types : incluant une quantité importante de gangue minérale (51%), vitrifiée (20%), bulleuses (15%) et concassées (14%). Les trois premiers types correspondent à des scories de coulée issues de la réduction de minerais de cuivre. Leurs données métriques ne sont pas standardisées. Par contre les scories concassées ont toutes les mêmes dimensions (l. : 1,2-2,3 cm ; L. : 1,1-2,2 cm) et poids (1,9-2,8 g.). Elles illustrent une procédure de la chaîne opératoire qui consiste à concasser les scories pour récupérer les billes de métal piégées. Les sections des scories confirment cette hypothèse. Des billettes et nodules de métal sont encore piégés dans la scorie (Fig. 60).

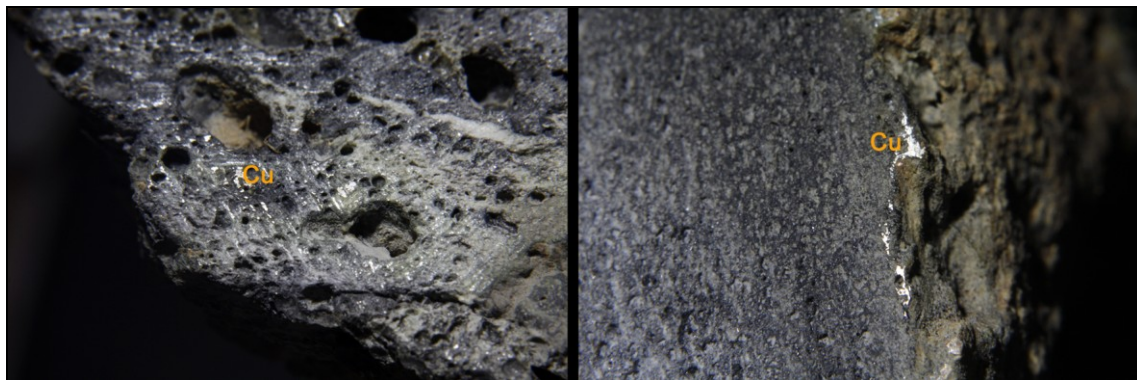


Fig. 60 : photo macroscopique de section de scories. Les billettes et nodules de cuivre métalliques correspondent aux inclusions claires signalées par le signe Cu.

Cette caractéristique, souvent observable pour les toutes premières métallurgies, est étonnante pour un site datant probablement du 1^{er} millénaire avant notre ère. Comme le bloc scoriacé, ces scories mettent en évidence une mauvaise maîtrise du processus de réduction.

La métallurgie ancienne dans le Rif Marocain

- les indices métallurgiques au niveau des sites -



Fig. 61 : photo macroscopique de section de scories. On distingue clairement les différentes phases constituantes et les restes important de gangue minérale.

Les sections permettent de distinguer clairement différentes phases. Elles illustrent des changements brutaux de températures et/ou de conditions rédox lors de la réduction des minerais. De même ces sections confirment la présence importante d'une quantité de stérile présentant une maille importante (Fig. 61). Cela suggère que le minerai n'a pas été lavé et concentré après le concassage-broyage : le stérile est resté mélangé aux minerais.

La compréhension claire et complète de cette métallurgie de cuivre dans le site de Stehat-22 nécessite la fouille partielle de la zone métallurgique et des analyses chimiques et pétrographiques des restes métallurgiques.

3- Perspectives scientifiques

3] Perspectives

La compréhension des indices métallurgiques identifiés lors de cette mission nécessite des recherches de terrain et en laboratoire.

3.1) Recherches de terrain

La zone métallurgique découverte sur le site de Stehat-22 requiert des fouilles ciblées sur les foyers métallurgiques.

Il conviendrait de dégager en surface la zone afin d'identifier précisément la location des fours et établir un plan de répartition spatiale.

Un ensemble de fours en batterie devrait être fouillé afin d'appréhender l'organisation technologique entre ces structures.

Il faudrait également se focaliser sur un four en particulier, de préférence le mieux conservé, et le fouiller de façon systématique et exhaustive. L'objectif serait de comprendre, au travers de la coupe stratigraphique et de la section fouillée, la thermodynamique des processus de réduction.

Enfin, il conviendrait de prospector de façon intensive les contrebas de la pente et la plaine dans un rayon de 500 m afin d'identifier les zones de crassiers (amas de scories) qui sont directement liées aux fours métallurgiques.

3.2) Recherche en laboratoire

L'ensemble des minerais et des indices métallurgiques devraient être analysés en laboratoire suivant le degrés d'information recherché (Fig. 62). Ces analyses permettraient d'apporter des éléments de réponse sur la provenance des matières premières et les techniques métallurgiques.

type d'échantillon	types analyses						
	minimum	medium			maximum		
minerais	pXRF*	ICP-MS	LM	PTG	XRD	LIA	-
paroi de four	pXRF*	MEB-EDS	LM	PTG	XRD	MEB-WDS	-
creuset de réduction	pXRF*	MEB-EDS	LM	PTG	XRD	MEB-WDS	-
scorie	pXRF*	MEB-EDS	LM	PTG	XRD	MEB-WDS	LIA
metal	pXRF*	MEB-EDS	MTG	MEB-WDS	ICP-MS	LA-ICP-MS	LIA
creuset de fonte	pXRF*	MEB-EDS	LM	PTG	XRD	MEB-WDS	-

dénomination	capacité	objectifs	renseignements	impact sur échantillon	
pXRF	portable X-ray fluorescence	analyse chimique semi-qualitative	composition	Technologies, provenances	non destructif
ICP-MS	Spectrométrie de masse à plasma à couplage	analyse chimique quantitative	composition	Technologies, provenances	invasif/destructif
XRD	Diffraction des rayons X	analyse chimique quantitative	informations structurelles (composition chimique, la structure cristalline, la taille des	Technologies, provenances	destructif
LIA	Isotope de plomb	analyse chimique quantitative	signature isotopique	provenances	destructif
PTG	Etude pétrographique par microscopie optique polarisant	observation et interprétation	informations structurelles (structure cristalline, la taille des cristallites, phases,	technologies	destructif
LM	lame mince	forme de préparation d'échantillon pour observation	une section amincie d'un échantillon pour observation des structures cristallines ou	technologies	destructif
MEB-EDS	microscopie électronique à balayage couplé avec une spectroscopie à rayons X à	observation avec possibilité de micro-analyse qualitative, semi-	informations structurelles (structure cristalline, la taille des cristallites, phases,	technologies	non destructif /ou/ destructif
MEB-WDS	microscopie électronique à balayage couplé avec une analyse dispersive en longueur d'onde	observation avec possibilité de micro-analyse quantitative	informations structurelles (structure cristalline, la taille des cristallites, phases, inclusion) & micro-analyse des structures,	technologies	non destructif /ou/ destructif
MTG	Etude métallographique par microscopie optique à lumière transmise	observation et interprétation	structure métallo, inclusion, détermination de la mise en forme	technologies	destructif
LA-ICP-MS	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif par ablation laser	analyse chimique quantitative	composition	Technologies, provenances	non destructif

pXRF*	vérifier le type d'appareil et sa calibration. Les pXRF pour les minerais (géol) ne conviennent pas pour analyses métal. Pour scorie prendre pXRF géol, pour creuset & paroi de four faire analyses avec 2 pXRF (géol et métal)
-------	---

Fig. 62 : Types d'analyses adaptées à l'études des indices métallurgiques et des minerais

3.3) Recherche géoarchéologiques

Enfin, dans l'idéal des analyses paléoenvironnementales et géomorphologiques permettraient d'apporter des éléments de réponses sur les ressources naturelles nécessaires à la chaîne opératoire de la métallurgie de cuivre.

Bibliographie

Bibliographie

Afiri A. (2011), *Etude pétro-structurale des péridotites de Béni Bousera et des roches crustales sus-jacentes (Rif Interne, Maroc) : Implications géodynamiques*, Thèse de doctorat de Pétrologie métamorphique et structurale, Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech.

Aghzar L. (2006), *Approche à l'étude de la dynamique du paysage de l'aval de l'Oued Laou entre 1958, 1966 et 1994*, Mémoire de DEA en biodiversité, Université de Tétouan

Bokbot Y. (1991), *Habitats et monuments funéraires du Maroc préhistorique*, Thèse de Doctorat, Université d'Aix en Provence.

Bokbot Y. (2001), « Protohistoire du Maroc présaharien : bilan et perspectives », in Actes du colloques international, *premières journées nationales d'archéologie et de patrimoine* (Rabat, 1-4 juillet 1998), Rabat, p. 90-98.

Bokbot Y. (2005), « La civilización del Vaso Campaniforme en Marruecos y la cuestión del sustrato calcolítico precampaniforme. El Campaniforme en la Península Ibérica y su contexto europeo », *Universidad de Valladolid, Serie: Arte y Arqueología*, 21, p. 137 -159.

Bokbot Y. (2011), « Néolithique et protohistoire dans le bassin de l'Oued Noun (Maroc présaharien). Quelques données préliminaires », in *Actes du 1er colloque de Préhistoire Maghrébine (Tamanrasset, 5-7 novembre 2007)*, Alger, p. 305-322.

Bokbot Y. (2012), *Nouvelles recherches en archéologie protohistorique du Maroc*. Rabat.

Bokbot Y. and J. Onrubia-Pintado (1995), « Substrat autochtone et colonisation phénicienne au Maroc, nouvelles recherches protohistoriques dans la péninsule tingitane », in *Actes du 118 congrès National des Sociétés Historiques et Scientifiques* (Pau 1993), Paris, p. 219-231.

Bouabdellah M., R. Jabrane, D. Margoum and M. Sadequi (2016) "Skarn to porphyry-epithermal transition in the Ouixane Fe district, Northeast Morocco: interplay of meteoric water and magmatic-hydrothermal fluids", in : Bouabdellah M. and J.F. Slack (eds.), *Mineral Deposits of North Africa*, p. 201-228. Genève : Springer Verlag.

Chalouan A., M. Bouabdellah, N. Lebret, E. Marcoux and M. Sadequi (2011), « chapitre 10 : les mines du RIF », in : Mouttaqi A., E.C. Rjimati, L. Maacha, A. Michard, A. Soulaïmani and H. Ibouh, *Les principales mines du Maroc*, Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc, vol. 9, p. 349-369. Rabat : Editions du service géologique du Maroc.

Chalouan A., A. Ouazani-Touhami, L. Mouhir, R. Saji and M. Benmakhlouf (1995), « Les failles normales à faible pendage du Rif interne (Maroc) et leur effets sur l'amincissement crustal du domaine d'Alboran », *Geogaceta*, 17, p. 107-109.

Chenorkian R. (1988), *Les armes métalliques dans l'Art protohistorique de l'Occident Méditerranéen*, Paris.

Bibliographie

Carrillo Rosúa F. J., S. Morales Ruano and P. Fenoll Hach-Alí (2003), « Iron sulphides at the epithermal gold-copper deposit of Palai-Islica (Almería, SE Spain) », *Mineralogical magazine*, 67/5, p. 1059 - 1080

Courcier A. (2019), *Bilan du quadriennal du programme « CUivre : PROduction et Usage à l'Holocène en Mauritanie (CUPRUM) »*, Rapport au Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Paris. Non publié

Courcier A., E. Essaid, M.A. Ould Bagga, A. Celauro and A., Maass (2019) « La métallurgie du cuivre dans la région de l'Inchiri, en Mauritanie au cours de l'Holocène récent. Etat de la recherche à la lumière des nouvelles recherches menées par le projet franco-mauritanien CUPRUM », *Al-Wassit- les annales de l'IMRS*, n°19, p. 2-48.

Daugas J.-P. (2002), « Le Néolithique du Maroc : pour un modèle d'évolution chronologique et culturel », *Bulletin d'Archéologie du Maroc* 19, p. 681-687.

El Bakili A. (2001), *Evolution tectono-métamorphique et chronologique des unités métamorphiques du Rif interne (Beni Bousera, Nord Maroc)*, Thèse de doctorat en Sciences de la Planète et de l'Univers, Université Côte d'Azur et Université Mohamed V.

El Bakili A., M. Corsini, A. Chalouan, P. Münch, A. Romagny, J.-M. Lardeaux and A. Azdimousa (2020), « Neogene polyphase deformation related to the Alboran Basin evolution: new insights for the Beni Bousera massif (Internal Rif, Morocco) », *BSGF Earth Sciences Bulletin*, 191/10, p. 1-18

El Hmaidi A. and I. Manssouri (2013) « Prédiction des teneurs en métaux lourds (Zn, Cu, et Mn) dans les dépôts holocènes actuels de la marge méditerranéenne marocaine de part et d'autre de la ride d'Alboran », *Journal of Computer Engineering*, 16/1/VIII, p. 117-143.

Harmouzi H., A. Dekayir, M. Rouai and M. Afechkar (2018), « Analyse géomorphologique et géologique du glissement de terrain d'Akchour (Rif, Maroc) », *Geo-Eco-Trop*, 42, p. 19-42

Leblanc M. (1986), « Co-Ni arsenide deposits, with accessory gold, in ultramafic rocks from Morocco », *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23/10, p. 1592 - 1602

Menard Y., (2019) *Avancées techniques dans le traitement des minerais d'or*, Journée « Mines en France » OSUC-SIM-SGF, 5 juin 2019. Orléans : BRGM.

Milesi J.P., Feybesse J.-L., Pinna P., Deschamps P., Kanpunzu H.A.B., Muhongo S., Lescuyer J.-L. and Toteu S.F. (2004), *Géologie et principaux gisements de l'Afrique*, carte 1 : 10 000 000e. Orléans : BRGM.

Müller-Karpe A. (ed.) (1994), *Anatolisches Metallhandwerk*, Offa-Bücher, 75. Munster : Wachholtz Verlag

Poujol A. (2014), *Analyse des déformations actuelles dans le Rif (Maroc) : approche morphotectonique*, Thèse de doctorat en géomorphologie. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2014.

Bibliographie

Robion-Brunner C. (2018), « L'Afrique des métaux », in F.-X. Fauvelle (dir.), *De l'Acacus au Zimbabwe 20 000 avant notre ère - XVIIe siècle, l'Afrique ancienne* : Belin, Paris, p. 519-544.

Romagny A. (2011), Evolution de la surrection de la chaîne du Rif (Maroc), mémoire de master 2, Université Sophia Antipolis,

Rovira S. and P. Ambert (2002), « Les céramiques à réduire le minerai de cuivre : une technique métallurgique utilisée en Ibérie, son extension en France méridionale », *Bulletin de la Société préhistorique française* 99/1 : 105-125.

Saji R. and A. Chalouan (1995), « Le bassin pliocène de Tirinense et son mode d'ouverture (Rif interne, Maroc) », *Geogaceta*, 17, p. 110-112.

Samara F., A. Benyaich, M. Dakki, M. Hcaine and A.W. Bally (1997), « Origine et inversion des bassins miocène supra-nappes du Rif central (Maroc). Etude de surface et de subsurface », *Geodinamica Acta*, 10/1, p. 30-40.

Souville G. (1986), « Témoignage sur l'âge du bronze au Maghreb occidental », *Comptes rendus des séances de l'Académie des inscriptions et Belles-Lettres*, 130/1, p. 97-114

Tauveron M. (1992), *Chalcolithique et âge du bronze au Maghreb : corpus du mobilier métallique*, Paris.

Töchterle U., Goldenberg G., Schneider P. and Tropper P. (2013), Spätbronzezeitliche Verhüttungsdüsen aus dem Bergbaurevier Mauken im Unterinntal, Nortirol: Typologie, mineralogisch-petrographische Zusammensetzung und experimentelle Rekonstruktionsversuche, *Der Anshnitt*, 65 : 1-19.

Wailly A. (1975), « Le site de Kef-el-Baroud (région de Ben Slimane) », *Bulletin d'Archéologie Marocaine* 9, p. 39-101.

Zientek M.L., J.M. Hammarstrom and K.M. Johnson (eds.) (2010), *Porphyry Copper Assessment of Europe, Exclusive of the Fennoscandian Shield*, Scientific Investigation Report 2010-5090-K, USGS, U.S Department of the Interior.