

ÉCOLE DOCTORALE

ENERGIE, MATERIAUX, SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

THÈSE présentée par :

Hugo BOURQUE

Soutenue le : **14 décembre 2016**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Sciences de la Terre / Métallogénie

**Le cuivre de l'Anti-Atlas, un problème complexe: synthèse des
occurrences cuprifères de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara et
nouvelles données (Anti-Atlas, Maroc)**

THÈSE dirigée par :

M. Luc BARBANSON Maître de conférences, Université d'Orléans

M. Lakhlifi BADRA Maître de conférences, Université de Meknès

RAPPORTEURS :

M. Didier BEZIAT Professeur, Université de Toulouse

M. Lhou MAACHA Manager général de l'exploration, Managem

JURY :

Lhou MAACHA Manager général de l'exploration, Managem (*rapporteur*)

Didier BEZIAT Professeur, Université de Toulouse (*rapporteur*)

Alain CHAUVET Directeur de Recherche, Géosciences Montpellier (*examineur*)

Éric MARCOUX Professeur, Université d'Orléans (*Président du jury et examineur*)

Aomar ENNACIRI Directeur exploration, Managem (*examineur*)

Laurent BAILLY Ingénieur de Recherche, BRGM (*invité*)

Luc BARBANSON Maître de conférences, Université d'Orléans (*directeur de thèse*)

Lakhlifi BADRA Professeur, Université de Meknès (*directeur de thèse*)

**Le cuivre de l'Anti-Atlas, un problème complexe: synthèse des occurrences cuprifères de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara et nouvelles données
(Anti-Atlas, Maroc)**



Paysage au sud du gisement de Jbel N'Zourk.

Manuscrit de thèse

Hugo BOURQUE

Défendue le : 14 décembre 2016

THÈSE dirigée par :

Luc BARBANSON

Maitre de conférences, Université d'Orléans

Lakhlifi BADRA

Professeur, Université de Meknès

Co-encadrement :

Stanislas SIZARET

Professeur, Université d'Orléans

Yannick BRANQUET

Maitre de conférences, Université d'Orléans

Claire RAMBOZ

Chargée de Recherche, CNRS Orléans



Docteur... qui l'eût cru? En tout cas le temps des remerciements est venu.

Je profite de ces quelques lignes pour rendre hommage à tous les hommes de l'ombre dont je n'ai pas les noms : géologues, mineurs, traiteurs et autres professionnels du monde minier. Ce sont ces hommes qui font que notre confort de vie est ce qu'il est, eux qui vivent souvent sans confort pour notre confort, ceux qui parfois meurent dans l'inconfort.

*A **Sidi Luc Barbanson** : gand Sage parmi les sages, merci de m'avoir fait confiance depuis le master, d'avoir été un soutien sans faille tout au long de mon parcours et de continuer à l'être. Merci pour le savoir mais également l'humanité que tu m'as transmis. Que les Lions de l'Atlas dans leur miséricorde t'accordent à toi et à ton troupeau bonheur, joix et épanouissement et que les gazelles de tout les deserts chantent tes louanges.*

*A **Sidi Lakhlifi Badra** : merci d'avoir accepté de co-diriger cette thèse et de m'avoir accordé ton temps et tes connaissances sur le terrain.*

*A **Sidi Stanislas Sizaret** : « Excellent » parmi les excellents, merci d'avoir accepté d'être dans cette équipe, d'avoir partagé ton érudition et d'avoir toujours été un soutien indéfectible dans les moments difficiles.*

*A **Sidi Yannick Branquet** : merci pour ton accompagnement sur le terrain, tes judicieuses remarques, tes corrections pertinentes, ton expérience que tu as su partager avec moi ainsi que ta bonne humeur et ta joie de vivre.*

*A **Saïdati Claire Ramboz** (Clairette) : scientifique dans l'âme, humaniste, extravagante, plus que compétentes, perseverante, impulsive, parfois excentrique... il est difficile de trouver tout les adjectifs pouvant te caractériser. Dans tout les cas je tiens à te remercier de m'avoir initié, non seulement aux inclusions fluides, mais également à tous les autres domaines, scientifiques, sociétales, politiques et artistiques, que nous avons pu évoquer lors de nos discussions, parfois animées voir exaltées, dans ton bureau. Merci également pour ton investissement et ton soutien jusque dans les derniers moments de cette thèse.*

*Au groupe **Managem** : merci d'avoir soutenu ce projet depuis le début, merci pour son soutien humain, logistique et scientifique sur le terrain et en laboratoire.*

*A **Lhou Maacha** et à **Didier Beziat** : merci d'avoir accepté de rapporter mon manuscrit et d'avoir effectué le déplacement jusqu'à Orléans pour ma soutenance depuis Toulouse pour l'un et depuis le Maroc pour l'autre. Le choix de vos deux personnes comme rapporteurs*

*illustre l'aspiration, de mon encadrement et de moi-même, de faire exister une recherche en métallogénie intimement liée au monde de l'industrie. Je tiens également à remercier **Laurent Bailly**, **Alain Chauvet** et **Eric Marcoux** d'avoir participé à mon jury de thèse.*

*A **Aomar Ennaciri** : merci d'avoir accepté de me prendre en stage de master et de m'avoir soutenu par la suite comme géologue d'exploration durant une année. Merci également de m'avoir encouragé à continuer en thèse et d'avoir suivi mes travaux jusqu'au bout.*

*A **Toufik Adraoui** : tu as été la première personne que j'ai vu en arrivant au Maroc et depuis ce jour tu restes pour moi mon père d'adoption marocain. D'apparence simple chauffeur chez Managem, mais en réalité, élément indispensable, que ce soit sur le plan professionnel ou humain, de cette compagnie. Les stagiaires que tu amenais à la mine te pensaient géologue, mineur, traiteur, directeur d'usine et j'en passe, car tu as su accumuler à travers ton parcours bien des connaissances techniques qui te rendaient exceptionnel. A cet homme d'exception que tu étais s'ajoute un sens de l'humanité et une dévotion aux autres qui n'ont jamais failli. Tu as su me faire découvrir le vrai Maroc, tu m'as accueillis dans ton foyer, tu m'as guidé, tu m'as défendu, tu m'as porté. Hélas, je n'ai pas eu le temps de te remercier assez pour tout ce que tu m'as apporté. Choukrane baba. A **Khadija**, ta femme et ma mère, **Rida** et **Elias**, tes fils et mes frères, **Imane** et **Rita**, tes filles et mes soeurs, **Mustapha**, ton frère et mon oncle, merci pour la joie de vivre que vous partagez et que nous continuons de partager.*

*A **Lmadani Laadimi** : employé indispensable de Bleida, possédant une soif d'apprendre dans tous les domaines. Merci de m'avoir accompagné sur le terrain pendant plus d'un an et d'avoir toujours été d'une professionnalité exemplaire. Merci également pour l'ami que tu es.*

*A **Imane El Idrissi** : amitié fusionnelle issue d'une rencontre entre deux nomades au détour d'un train pour Tanger. Merci pour le bonheur et la joie que tu procures naturellement à toutes les personnes croisant ton regard et ton sourire.*

*A **Amine Bajdi** : merci de m'avoir fait confiance, à la foi en tant que géologue d'exploration et en tant que doctorant, en ta qualité de directeur de la mine de Bleida. Merci pour l'accueil et les discussions que nous avons pu avoir.*

*Au **Hajj Mohammed Saïdi** : merci de m'avoir appris à faire le thé comme un vrai marocain saraoui, et également « tanmirt » pour les concerts de banjo et les chants amazighs autour des tajines.*

Aux membres des services géologique, géomatique et géomètre de Bleida, **Hassan Boussouf**, **Mohamed Bousselmi**, **Imad Soutaji**, **Hamid Oumou**, **Hassan Azrour**, **Bassou Meskour**, **Abdelouahed Aït Lhacen** (« chefarata »), **Benhamou**, **Hajj Baoutoul**, **Joël Coeffic**, **Ismaël Bouskri**, **Mustapha El Ghorfi** et **Kersit** merci pour votre accueil et pour les nombreux « jdi » et couscous partagés sur le terrain ou à Smara. Je remercie également les stagiaires **Othman Znieber**, **Soumia Baaziz**, **Séko Bôgôdar Sanogo**, **Aimane Elmachi**, **Abdelhak** et **Abdelmalek Ismaili**.

Les autres membres du personnel de Bleida, **Nighcha** (meilleur thé de Bleida), **Jiad Abdelkabir**, **Driss Lamrani** (meilleur recette de « dajaja beldi »), **Labbioui**, **Hicham**, **Brahim**, **Hajj Bahat**, **Hajj Tilmaz** et tout ceux dont le nom m'a échappé.

Merci à mes amis de toujours : **Romain Viala**, **Thomas Viennet**, **Pierre Stortz**, **Laurent Jossot**, **Lucile Ferriot** et **Pierre Brunella**. A ceux que je n'ai pas vu depuis longtemps mais que je n'ai pas oublié : **Pierre Bedaux**, **Stephane Hervier**, **Florent Chaudat**, **Clémence**, **Dorine** et **Joffrey**.

A **Cyril Meslet** : à mon meilleur ami et confident, qui a toujours été là pour moi dans les moments de bonheur comme dans les heures les plus sombres, merci pour tout.

A **Sarah Deveaud** (alias lulu), **Thomas Thiebault** (alias loulou) et **Polka Thiebault-Devaud** (alias poupouille) : à lulu, merci d'être une amie fidèle, pour le meilleur et pour le pire, pour l'aide et le soutien que tu m'as apporté durant toute ma thèse et notamment durant la période de rédaction. Mon manuscrit n'aurait pas été ce qu'il est sans tes remarques et corrections. A Loulou, merci pour les bons moments passés à la coloc et pour les excellentes poêlées de légumes anciens. A poupouille, pour son grain de folie et pour toute son affection quotidienne.

Aux vieux amis de promo : **Florent** (Polack), **Julien Gachet**, **Hugues Saffrey**, **Florent** (Flob), **Antoine**, **Paul**, **Pierre Marie**, **Adrien Larène**, **Camille** (le nouveau) et tous les autres, merci pour les moments de franche camaraderie et d'amitié.

Aux stagiaires, copains et collègues du laboratoire ou d'orléans pour leur soutien et leur amitié : **Kevin Freville**, **Vincent Roche**, **Maxime Ducoux**, **Alex**, **Adrien Romani**, **Eloïse**, **Annaëlle**, **Julie** et **Nico**, **Zineb**, **Chloé**, **Adoum**, **Armel**, **Léo**, **Mohammed Rashid**, **Nadia**, le petit **Ahmed**, **Bashar**, **Delphine Riez**, **Jean Yves**, **Florent Cheval**, **Chi**, **David**, **Gaethan**, **Simona**, **Aboubakar**, **Imad**, **Benoît**, **Leïla Hashim**, **Camille Hashim**, **Leonard**, **Vincent Peureux**, **Mathieu Leguerinel**, **Johann Tuduri**, **Phillipe Penou**, **Giada Icono**, **Ida Di**

Carlo, **Nathalie** Pothier, **Catherine** Leroy, **Martine** Bodusseau, **Marlène**, **Marie Noël**, **Fabrice** Müller, **Flavien** Choulet, **Mikaël** Motelica, **Patricia**, **Olivier**, **Virginie**, **Sylvain** Janiec et **Jean-Gabriel** Badin.

Enfin je tiens tout particulièrement à finir ces remerciements par les meilleurs, les membres de ma famille, qui m'ont soutenu dans mes études et dans ma vie privée : mon frère **Simon**, ma sœur **Lisa**, mon père **Patrick** Bourque, ma mère **Martine** Sandoz, ma belle soeur **Claire** Pignal, ma nièce **Charlie**, mes grands parents **Louis** et feu **Marie Louise** Sandoz.

Sommaire

CHAPITRE 1. INTRODUCTION	9
1.1. HISTORIQUE ET DEROULEMENT DE CETTE ETUDE	9
1.2. LA PROBLEMATIQUE	9
1.3. LE CUIVRE	12
1.3.1. Brève histoire du métal rouge	12
1.3.2. Utilisation et propriété du cuivre	13
1.3.3. Ressources et production mondiales	14
1.4. GEOLOGIE DE L'ANTI-ATLAS MAROCAIN	16
1.4.1. L'Anti-Atlas : une Province Géologique du Maroc	17
1.4.2. Un socle Précambrien	19
1.4.3. Une couverture tardi-Néoprotérozoïque à Paléozoïque	24
1.4.3.1. Litho-stratigraphie	26
1.4.3.2. Une parenthèse sur la transition Neoprotérozoïque à Cambrienne : des changements à l'échelle mondiale	34
1.4.3.5. La déformation Varisque.....	34
1.4.3.6. Un évènement magmatique régional tardi-triasique	36
1.5. LE CUIVRE DE L'ANTI-ATLAS	37
1.5.1. Les minéralisations du socle Précambrien	39
1.5.1.1. Les amas : exemple du gisement de Bleida (Anti-Atlas Central)	39
1.5.1.2. Les structures filoniennes : exemple du gisement de Bou Skour (Anti-Atlas Oriental)	39
1.5.1.3. Le Groupe de Ouarzazate : cas du gisement d'Alous (Anti-Atlas Occidentale)	42
1.5.2. Les minéralisations de la couverture tardi-Néoprotérozoïque à Paléozoïque	43
1.5.2.1. La formation d'Adoudou et le cambrien	43
1.5.2.2. L'Ordovicien : cas du gisement d'Oumjrane (Anti-Atlas Oriental)	52
CHAPITRE 2. LA BOUTONNIERE DE BOU AZZER-EL GRAARA	57
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA BOUTONNIERE	57
2.2. LES SUBSTANCES METALLIQUES	60
2.2. LES SITES D'ETUDES DE LA COUVERTURE NEOPROTEROZOÏQUE A CAMBRIENNE	62
CHAPITRE 3. APPROCHE DE TERRAIN	67
3.1. LE TYPE « STRATABOUND »	67
3.1.1. Un niveau porteur de la minéralisation cuprifère à l'échelle régionale.....	67
3.1.2. Cartographie structurale et coupes à l'échelle de l'objet minéralisé.....	69
3.1.1.1. L'indice de Oued R'Them (l'oued à R'Them, une variété d'arbuste).....	69
3.1.1.2. L'indice de Tizi N'Mekraz	71

3.1.1.3. L'indice de Chaa'b Lhamrat (le talweg rouge).....	72
3.1.3. <i>La déformation</i>	73
3.1.4. <i>Textures macroscopiques</i>	76
3.1.2.1. L'indice de Oued R'Them	76
3.1.2.2. L'indice de Tizi N'Mekraz	77
3.1.2.3. L'indice de Chaa'b Lhamrat.....	80
3.1.5. <i>Orientation des veines</i>	81
3.2. LE TYPE « FOLDED-BAND »	83
3.2.1. <i>Cartographie structurale et coupes à l'échelle de l'objet minéralisé</i>	83
3.2.1.1. Le gisement de Jbel Laassel (la montagne de miel) et l'indice d'Amekssa (le berger)	83
3.2.1.2. L'indice de Assif N'Zaïd (l'oued de Zaïd).....	88
3.2.1.3 Le gisement de Jbel N'Zourk (la montagne bleue)	89
3.2.2. <i>Les plis</i>	90
3.2.2.1. Typologie des plis de la « folded-band ».....	90
3.2.2.2. Les plis NE-SW	92
3.2.3. <i>Les failles</i>	93
3.2.4. <i>Microstructures</i>	96
3.2.5. <i>Les données structurales</i>	97
3.2.6. <i>Textures et structures macroscopiques</i>	101
3.2.6.1. Jbel Laassel et Amekssa	101
3.2.6.2. Assif N'Zaïd	102
3.2.6.3. Jbel N'Zourk	102
3.2.7. <i>Orientation des veines du stockwork</i>	103
3.3. GEOMORPHOLOGIE ET DEFORMATION DE LA COUVERTURE	104
3.3.1. <i>Les décollements</i>	106
3.3.2. <i>La faille de Jbel N'Zourk</i>	108
3.3.3. <i>Le passage de l'Accident Majeure de l'Anti Atlas dans la couverture néoproterozoïque à cambrienne</i>	109
3.4. APERÇU DES OCCURRENCES CUPRIFERES DU SOCLE PRECAMBRIEN	113
3.4.1. <i>La minéralisation de type Bleida : une association avec des failles cassante N70</i>	114
3.4.2. <i>L'association avec des failles N120 à travers les exemples des indices de Belgrade, Tanaladat et Garat En Nous</i>	118

CHAPITRE 4. MINERALOGIE ET TEXTURES MICROSCOPIQUES DES MINERALISATIONS DE LA COUVERTURE

NEOPROTEROZOÏQUE A CAMBRIENNE..... 127

4.1. LE TYPE « STRATABOUND ».....	127
4.1.1. <i>Les rognons siliceux</i>	127
4.1.2. <i>La gangue</i>	128
4.1.3. <i>Les sulfures</i>	129

4.1.4. Les minéraux supergènes	131
4.1.5. Textures microscopiques	133
4.1.6. Séquence paragénétique	137
4.2. LE TYPE « FOLDED-BAND »	138
4.2.1. La gangue	138
4.2.2. Les sulfures	139
4.2.3. Les minéraux supergènes	142
4.2.4. Textures microscopique	143
4.2.5. Séquence paragénétique	148
5. GEOCHIMIE ROCHES TOTALES	153
5.1. LE TYPE « STRATABOUND »	153
5.1.1. Oued R'Them	153
5.1.2. Tizi N'Mekraz	158
5.1.3. Chaa'b Lhamrat	162
5.1.4. Synthèse des occurrences de type stratabound	165
5.1.5. Profils litho-géochimiques	168
5.2. LE TYPE « FOLDED BAND »	172
5.2.1. Le gisement de Jbel Laassel	172
5.2.2. Amekssa	175
5.2.3. L'indice d'Assif N'Zaïd	178
5.2.3. L'ensemble des occurrences de type « folded-band »	181
5.3. ANALYSES SUR L'ENSEMBLE DES OCCURRENCES CUPRIFERES DE LA BOUTONNIERE	183
6. ETUDES DES INCLUSIONS FLUIDES	189
6.1. ECHANTILLONS	189
6.2. APPAREILLAGE	190
6.2.1. Cathodoluminescence	190
6.2.2. Platine microthermométrie	190
6.3. DESCRIPTION DES MINERAUX DE GANGUE	191
6.4. DESCRIPTION DES INCLUSIONS FLUIDES DANS LES GANGUES SILICO-CARBONATEES	198
6.5. RESULTATS	201
6.6. PRESSION MINIMALE DE PIEGEAGE ET CORRECTION DE PRESSION	210
7. DISCUSSION	217
7.1. DEUX MORPHOLOGIES DIFFERENTES POUR LES CORPS MINERALISEES	217
7.2. COMPARAISON DES MINERALISATIONS DE TYPE « STRATABOUND » ET « FOLDED-BAND »	218
7.2.1. Apport des textures et des successions paragénétiques dans la compréhension de ces minéralisations	218

7.1.3. Une déformation en lien intime avec le stockwork cuprifère	221
7.1.4. Apport de la géochimie roche totale sur la conception d'un modèle de genèse	227
7.1.5. Etudes des inclusions fluides des gangues silico-carbonatées.....	228
7.3. DES MINÉRALISATIONS DU SOCLE TARDI- A POST-COMPRESSION PANAFRICAIN	231
7.4. PLACE DE LA DÉFORMATION OBSERVÉE DANS LA BOUTONNIÈRE DE BOU AZZER-EL GRAARA DANS L'ÉVOLUTION STRUCTURALE DE L'ANTI-ATLAS	232
7.5. VERS UN MODÈLE DE GÈNESE COMMUN À L'ÉCHELLE DE LA BOUTONNIÈRE	236
7.6. COMPARAISON AUX GISEMENTS DE CUIVRE DANS LE MONDE.....	240
7.7. SYNTHÈSE À L'ÉCHELLE DE L'ANTI-ATLAS.....	243
7.7.1. Les minéralisations stratabound de l'Anti-Atlas occidental	244
7.7.2. Les minéralisations filoniennes de la couverture néoproterozoïque à Paléozoïque	244
7.7.3. Les autres modèles de la couverture Néoproterozoïque à Paléozoïque	245
7.7.4. Les minéralisations du socle Précambrien	245
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	249
TABLE DES FIGURES	261
ANNEXES	283

Chapitre 1. Introduction

Chapitre 1. Introduction

1.1. HISTORIQUE ET DEROULEMENT DE CETTE ETUDE

Ce manuscrit est l'aboutissement de 4 années et demi de travaux sur la compréhension du cuivre dans la couverture néoproterozoïque à cambrienne de l'Anti-Atlas marocain. Ce projet a débuté en 2012 avec mon stage de recherche de 2^{ème} année de master, focalisé sur le gisement de Jbel Laassel qui était alors en phase de faisabilité. De janvier à septembre 2013, en tant que consultant indépendant, sous contrat avec la compagnie minière Managem, j'étais en charge de l'exploration hors site du cuivre de la mine de Bleida. Mes cibles principales étaient les minéralisations localisées dans cette couverture néoproterozoïque à cambrienne, autour de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Les premiers résultats de mon stage de master et mes 9 mois passés sur le terrain ont permis d'appréhender les problèmes scientifiques que posent ces minéralisations cuprifères à l'échelle de l'Anti-Atlas. Enfin, de Septembre 2013 à fin 2016, j'ai poursuivi l'étude de ces minéralisations dans le cadre d'un contrat doctoral au sein de l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans. Cette dernière période a compris 4 mois et demi de terrain, une année d'enseignement en mission complémentaire, l'encadrement de deux stages de recherche de master 1 (un gisement d'or de l'Anti-Atlas et le second sur les minéralisations cuprifères du socle Précambrien à proximité de la mine de Bleida). L'encadrement de ces deux stages m'a poussé à élargir cette étude aux minéralisations du socle Précambrien de Bleida qui se sont intégrées naturellement à la problématique de cette thèse.

1.2. LA PROBLEMATIQUE

L'origine de ce projet est notamment liée à l'augmentation de la consommation mondiale des ressources métalliques depuis la fin du XX^{ème} et du début du XXI^{ème} siècle. Cette augmentation de la demande en métaux a entraîné une hausse de l'exploitation des réserves minières. Prenons comme exemple, la compagnie minière Managem, partie prenante de ce projet, et la ressource en cuivre de l'Anti-Atlas marocain, sur laquelle porte ce projet. Cette compagnie exploitait dans l'Anti-Atlas, durant les années 80 une mine de cuivre (Bleida). Le minerai de cuivre qui en était extrait possédait une teneur comprise entre 2,5 à 10% Cu. Celle-ci a ensuite fermé dans les années 90 pour cause d'épuisement des réserves économiques. Depuis le début des années 2000, l'augmentation de la demande en cuivre est

l'un des facteurs ayant participé la hausse des cours du cuivre, passant de 2000 à 8000\$ la tonne en 2012. Ce prix élevé du cuivre a eu comme répercussions de faire baisser la teneur de coupure des minerais. Par conséquent il a également démultiplié les cibles potentielles d'exploration du cuivre. Ainsi des minéralisations cuprifères à 0,8% Cuivre, qui n'étaient pas rentables 20 ans plus tôt, sont aujourd'hui d'intérêt économique majeur pour les compagnies minières. Il se trouve que la province de l'Anti-Atlas marocain recèle plusieurs centaines d'occurrences de minéralisations cuprifères. Celle-ci sont, en partie, encaissées au sein des séries sédimentaires néoproterozoïques à paléozoïques qui la composent. Ces occurrences cuprifères, potentiellement rentables au prix du cuivre actuel, affleurent sur une surface d'environ 800 000 km². Or ces minéralisations n'ont pas fait l'objet, depuis leur découverte dans les années 50, de travaux scientifiques détaillés permettant la compréhension de leur genèse et par conséquent l'établissement de guides d'exploration, nécessaires son optimisation. En effet les études scientifiques se sont généralement limitées à un aperçu sommaire de ces minéralisations cuprifères et elles n'ont pas proposé de modèles cohérents à l'échelle de la province de l'Anti-Atlas. Par conséquent, les problématiques de ce projet sont les suivantes :

- Apporter de nouvelles données pour discuter les modèles de genèse proposés précédemment qui oscillent entre une origine syngénétique et épigénétique,
- Intégrer ces minéralisations dans une histoire métallogénique à l'échelle d'une boutonnière (zone d'affleurement du socle Précambrien dans l'Anti-Atlas marocain),
- Déterminer si cette histoire comporte plusieurs événements de genèse de minéralisations cuprifères,
- Critiquer la viabilité du modèle de genèse produit à l'échelle de l'Anti-Atlas,
- Comparer ce modèle aux types « classiques » théoriques de formation de gisement de cuivre encaissés au sein de couverture sédimentaire, à travers le monde (Kupferschiefer, MVT, Sedex, Red Bed)

Les réponses apportées à ces problématiques ont un double intérêt scientifique et économique. Scientifique par la compréhension de minéralisations cuprifères à l'échelle de la province qui jusqu'à maintenant restait un mystère. Economique, car la compréhension scientifique de la genèse d'une minéralisation améliore les guides d'exploration mais peut également apporter des solutions à des problèmes d'exploitation. Pour répondre à cette problématique le site d'étude choisi a été la boutonnière de Bou Azzer-El Graara située dans la partie centrale de

l'Anti-Atlas marocain. C'est dans cette boutonnière qu'a été exploitée la mine de Bleida citée précédemment. De plus elle jouit d'un investissement dans l'exploration important de la part de la compagnie minière Managem, facilitant ainsi non seulement la logistique, mais également la visualisation de ces minéralisations avec les travaux miniers (tranchées, sondages carottés, fronts d'exploitation,...). Les approches réalisées sont les suivantes :

- Une étude de terrain approfondie de plusieurs sites d'études localisés sur l'ensemble du pourtour de la boutonnière au sein de la couverture néoproterozoïque à cambrienne. Ceci permettra d'avoir une vision des relations entre les corps minéralisés, l'encaissant sédimentaires et les structures tectoniques présentes, de l'échelle de l'affleurement à celle de la boutonnière.
- Une étude de terrain des minéralisations du socle Précambrien afin de déterminer si elles ont un rôle dans la genèse des celles situées dans la couverture.
- Une étude texturale et minéralogique de ces minéralisations afin de contraindre son histoire métallogénique.
- Une analyse statistique des données géochimiques roche totale des bases de données d'exploration afin de déterminer les affinités potentielles entre le cuivre et d'autres éléments chimiques pouvant être représentatifs d'une lithologie ou d'une altération.
- Une étude des inclusions fluides associées aux minéraux de gangues pour contraindre les températures, les pressions et la chimie des fluides lors de la formation de ces minéralisations.

Le manuscrit est donc divisé en sept chapitres présentant les résultats : (1) ce chapitre d'introduction qui présentera les caractéristiques du cuivre en tant que substance, le contexte géologique de l'Anti-Atlas et les modèles de formation de minéralisation cuprifère qui y sont décrites (2) le contexte géologique de la boutonnière de Bou azzer-El Graara, (3) les résultats de terrain, (4) les approches minéralogique et texturale microscopique, (5) le traitement statistiques des données géochimiques roches totales et (6) l'étude des inclusions fluides. L'ensemble de ces chapitres est construit autour de la description de deux types de corps minéralisés qui seront identifiés dès la partie terrain. Enfin (7) le dernier chapitre discutera des résultats par rapport aux problématiques fixées.

1.3. LE CUIVRE

Mise en contexte : Le métallogéniste est aujourd'hui de plus en plus sollicité pour intervenir dans des débats sociétaux sur l'histoire, l'exploitation et surtout l'utilisation et le devenir des métaux dans notre quotidien. Il est donc nécessaire de ne pas se limiter à la géologie dite « pure » mais d'étendre ses connaissances à l'ensemble du cycle de vie d'un métal.

1.3.1. Brève histoire du métal rouge

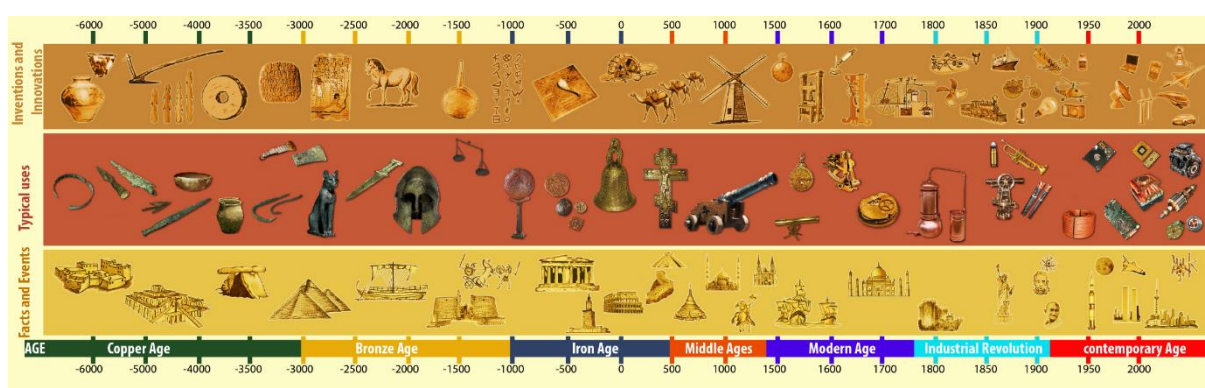


Figure 1 : Frise d'évolution des différentes utilisations du cuivre de sa découverte à aujourd'hui (modifié d'après « Copper Alliance » 2016)

Grace à sa présence sous forme native dans la nature et sa malléabilité, le cuivre fut l'un des premiers métaux travaillés par l'homme. Le cuivre, communément appelé le métal rouge, tire son nom de l'île de Chypre en méditerranée du latin *Aes Cyprium* et du grec *Kupros* (« Copper Alliance » 2016). Il a vraisemblablement fait son apparition dans les premières sociétés de l'époque néolithique. Les objets en cuivre les plus anciens montrent qu'il fut utilisé dans un premier temps comme ornement des morts dans les rites funéraires mais très vite l'homme a compris qu'il pouvait facilement modeler ce métal et en faire des outils et des armes de chasse. La période du chalcolithique, précédant l'âge du bronze, est celle durant laquelle le cuivre vient en complément sur les premiers ustensiles en pierre. Avec la découverte de la fusion, les minerais du cuivre se diversifient et ses utilisations se multiplient participant ainsi au développement de sociétés de plus en plus hiérarchisées. L'âge du bronze, de -3000 à -1000 av J-C, correspond à l'apparition des premiers alliages de métaux et notamment le cuivre et l'étain, le bronze. L'apparition de cet alliage témoigne des relations d'échanges bien organisées et d'une complexité grandissante des sociétés. Par exemple, le bronze ancien du Proche Orient a été produit avec de l'étain provenant des mines de

Cornouailles situées à plus de 5000 km en Angleterre. Le cuivre a par la suite accompagné et joué un rôle majeur dans le développement des sociétés humaines de l'âge du fer jusqu'à nos sociétés modernes dans lesquelles il s'est rendu indispensable grâce à ses nombreuses propriétés intrinsèques ("Copper Alliance," n.d., "Histoire du cuivre," n.d., "Histoire du cuivre," n.d.).

1.3.2. Utilisation et propriété du cuivre

Tableau 1 : Tableau de quelques objets en cuivre commun avec les proportions relatives ou absolues de cuivre qu'ils contiennent (données compilées d'après Bihouix and De Guillebon, 2010; "Copper Alliance," n.d.).

Utilisation / objet	Idée de la proportion en cuivre
transport du courant électrique en Europe	8 millions de km de câble en cuivre
câble de véhicule automobile de gamme moyenne	20 kg de cuivre (2 km de câble)
véhicule hybride	45 kg de cuivre
voie de TGV	10 tonnes de cuivre par km
éolienne	4 tonnes de cuivre
panneau solaire sur le toit d'une maison moyenne	20 m de tube et 25 m ² de feuilles en cuivre
plomberie d'une maison moyenne	100 m de tube en cuivre
conduite de gaz d'une maison moyenne	20 m de tube en cuivre
réseau électrique d'une maison moyenne	500 m de câble en cuivre
chauffage d'une maison moyenne	600 m de tube en cuivre
ordinateur portable	7% de la masse total
téléphone portable	10% de la masse total

La plupart des personnes utilisent ou côtoient quotidiennement des objets contenant du cuivre ou en ayant nécessité dans leurs fabrications (**Tab. 1**). Cet élément est placé au 3^{ème} rang des métaux les plus utilisés au monde après le fer et l'aluminium. Le cuivre présente de nombreuses propriétés remarquables qui font de lui un élément indispensable et difficilement substituable. En plus du fait de sa capacité à être recyclable quasiment à l'infini le cuivre possède de nombreuses propriétés dont les principales sont citées ci-dessous, avec quelques exemples d'utilisations associées.

- Les propriétés chimiques :
 - aptitude à la constitution d'alliage (laiton, bronze, or rouge, ...)
 - résistance à la corrosion (robinetterie, toiture, peinture de bateau, ...)
 - bactéricide (canalisation pour le transport de l'eau, pièce de monnaie, cuve à fromage, stérilet, ...)

- Les propriétés mécaniques :
 - usinabilité (uniquement s'il est associé à certains métaux sous formes d'alliages)
 - malléabilité et plasticité (bijouterie, tôlerie,...)
 - soudabilité
- Propriétés physiques :
 - conductivité électrique (seul l'argent possède une meilleure conductivité)
 - conductivité thermique (chauffe-eau, chaudière murale, radiateur de véhicule, ...)
 - amagnétique (horlogerie, construction électrique et électronique, armement,...)

En l'associant à d'autres métaux, les propriétés de résistance mécanique, d'aptitude à la mise en œuvre ou à l'usinage, qui peuvent faire défaut au cuivre seul, peuvent être grandement améliorées. Quelques alliages et leurs spécificités ("Les alliages de cuivre," n.d.):

- **Les laitons** : alliages à base de cuivre et de zinc (entre 5 et 45%) et selon l'utilisation du plomb peut être ajouté ainsi que d'autres éléments. Il fait partie des alliages à base de cuivre les plus fabriqués et sa malléabilité facilite son usage.
- **Les bronzes** : alliages de cuivre et d'étain, avec entre 3 et 20% d'étain pour les alliages à usage industriel. Plus la proportion d'étain est importante plus les bronzes deviennent fragiles, ils sont alors utilisés pour des usages très spécialisés comme la fabrication de cloche (20 à 25% d'étain). Les bronzes possèdent une excellente aptitude au moulage, une très bonne résistance à la corrosion et au frottement.
- **Les cupro-nickels** : alliages de cuivre et nickel qui présente une excellente aptitude à résister à la corrosion au contact de l'eau de mer ce qui les destinent à de nombreuses utilisations en milieu marin.
- **Les cupro-aluminums** : alliages de cuivre et d'aluminium (4 à 15%) avec parfois un ajout de fer, nickel ou manganèse (5% maximum). Ces alliages possèdent une résistance accrue aux différentes formes de corrosion chimique ainsi que de bonnes propriétés mécaniques.
- **Les cupro-siliciums** : alliages incluant entre 2 à 4% de silicium et souvent d'autres éléments comme le manganèse, l'aluminium et le fer en très faible proportion. Ils sont utilisés pour leurs caractéristiques mécaniques élevées qui sont une excellente résistance au frottement et à la corrosion. Par ailleurs ce sont également les alliages les plus faciles à souder de tous les alliages de cuivre.
- **Les maillechorts** : alliages ternaires de cuivre, nickel et zinc avec des teneurs en cuivre variant de 45 à 65%, des teneurs en nickel entre 10 à 25% et en zinc entre 20 à 45%. Ils sont surtout utilisés pour leurs bonnes usinabilités (augmentées avec l'ajout de plomb), leurs soudabilités et la facilité à travailler ces alliages à froid.

1.3.3. Ressources et production mondiales

Depuis le milieu des années 1960, la consommation mondiale en cuivre raffiné a augmenté de plus de 250 % entraînant une augmentation exponentielle du prix d'achat du cuivre (**Fig. 2**). Le Japon, la Chine, l'Inde et l'Union Européenne sont les principaux

importateurs de cuivre dans le monde (Bihouix and De Guillebon, 2010). La production de cuivre par l'extraction minière provient quant à elle en majeure partie d'Amérique du Sud. Pour l'année 2013, cette production de cuivre issue de l'industrie extractive approchait les 179 000 millions de tonnes de cuivre produite dont 5 700 millions de tonnes ont été produites par le plus gros producteur, le Chili (Kelly and Matos, 2016) (**Fig. 3**).

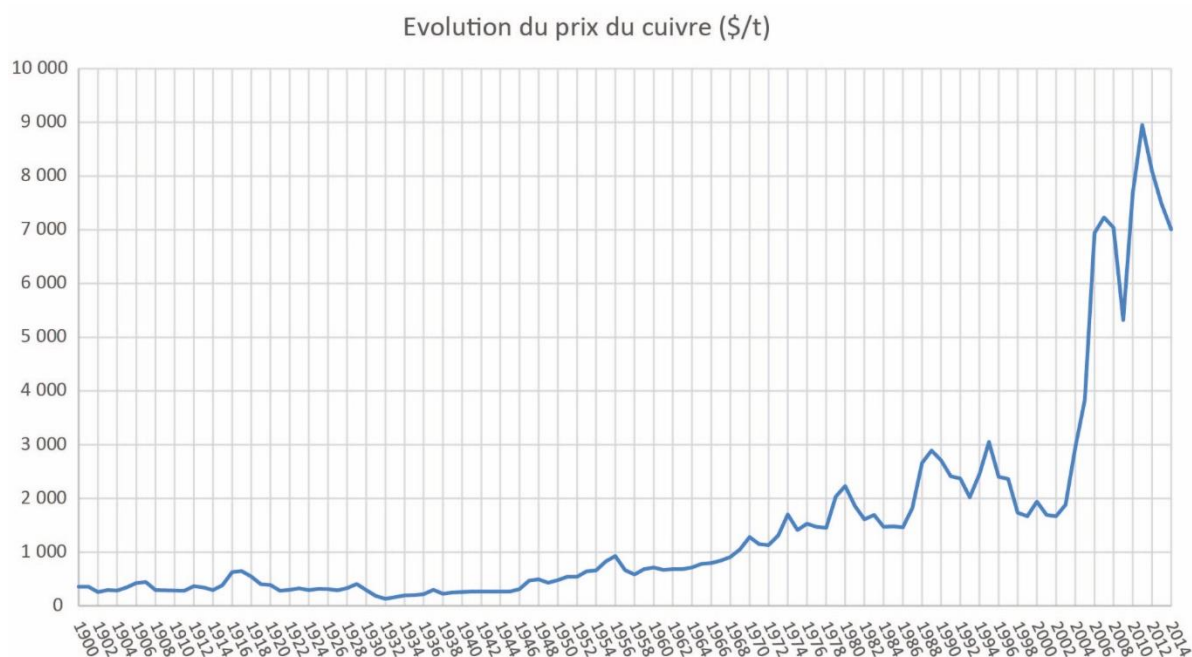


Figure 2: courbe d'évolution du prix du cuivre de 1900 à 2014 (USGS)

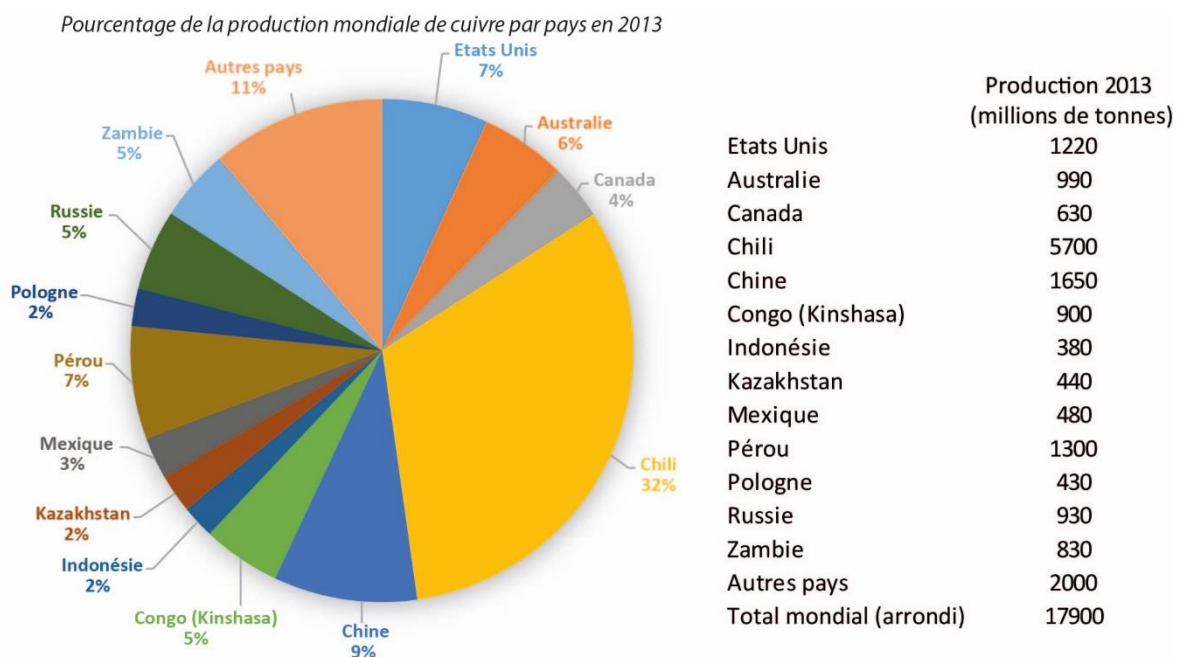


Figure 3 : Pourcentage de la production de cuivre par pays en 2013 (Kelly and Matos, 2016)

Les réserves mondiales de cuivre étaient estimées en 2013 à 690 000 millions de tonnes avec 28% de ces réserves détenue par le Chili, suivi de l'Australie avec 13% et le Pérou avec 10% (Kelly and Matos, 2016) (**Fig. 4**).

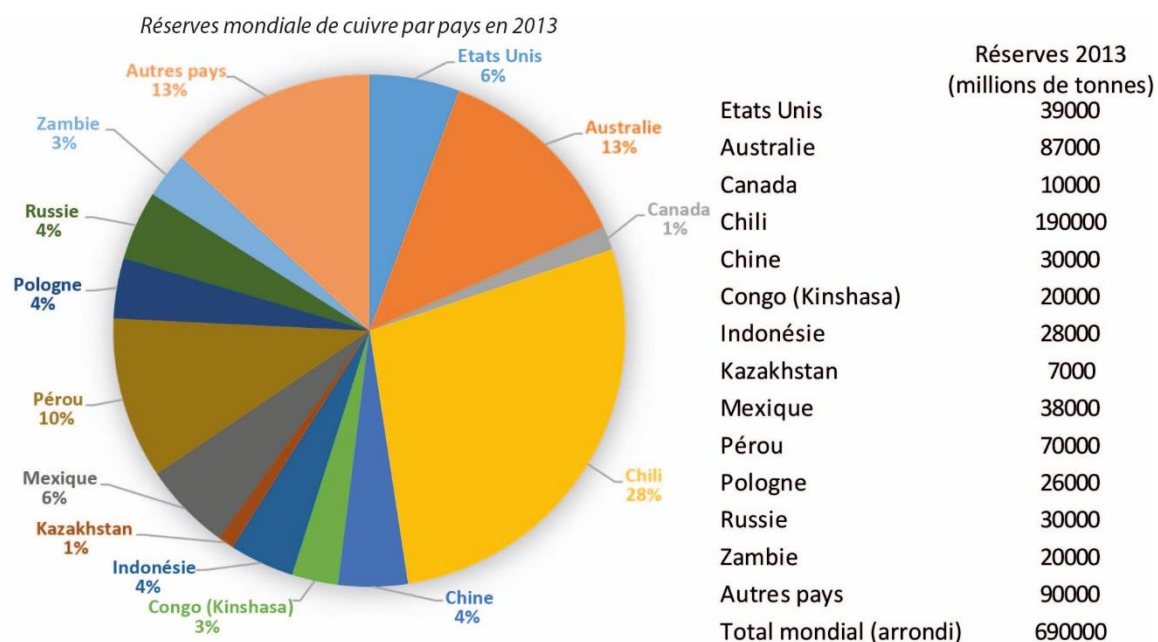


Figure 4: Réserves mondiales de cuivre par pays producteurs (Kelly and Matos, 2016).

1.4. GEOLOGIE DE L'ANTI-ATLAS MAROCAIN

Mise en contexte : cette thèse porte sur des minéralisations cuprifères de l'Anti-Atlas marocain et plus précisément sur celles de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Afin de pouvoir présenter les résultats obtenus sur cette boutonnière, il est nécessaire de la replacer dans le cadre géologique générale de l'Anti-Atlas pour mieux cerner l'impact de cette étude centrée sur une boutonnière à l'échelle de la province. Cela permettra également d'introduire les noms des différentes formations utiles à la compréhension des données et de la discussion. La province de l'Anti-Atlas marocain s'étend de l'océan Atlantique jusqu'à la frontière algérienne avec une orientation NE-SW. Elle est composée (i) d'un socle précambrien et (ii) d'une couverture tardi-néoprotérozoïque à paléozoïque. Ces différentes unités ont pu subir selon leur âge les orogènes Eburnéenne, Panafricaine, Varisque et Alpine. Les minéralisations cuprifères étant encaissées dans ces lithologies, il est important de les décrire

et de préciser les cycles orogéniques qu'elles ont subis afin de replacer ces minéralisations dans le bon contexte géologique.

1.4.1. L'Anti-Atlas : une Province Géologique du Maroc

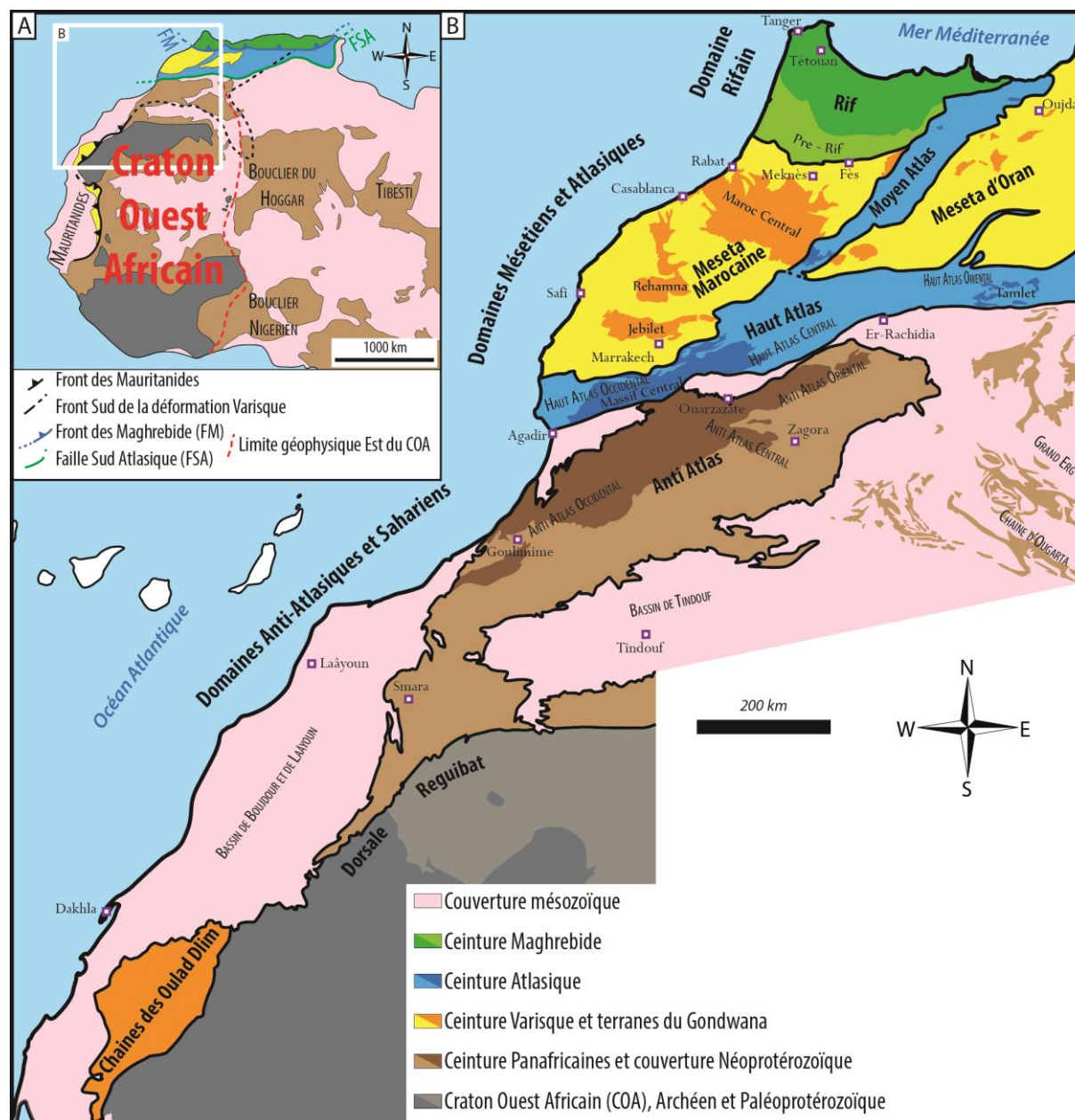


Figure 5: A : Carte géologique de l'Afrique de l'Ouest (modifiée d'après Fabre, 2005; Liégeois et al., 2005; Ennih and Liégeois, 2008). B : Carte des grandes provinces géologiques du Maroc (modifiée d'après Saadi, 1982).

Le Maroc est surnommé le paradis des géologues, car en plus de conditions d'affleurement souvent exceptionnelles, il présente une diversité géologique qui s'exprime par des roches allant du Précambrien jusqu'au Cénozoïque et par conséquent une histoire structurale et métallogénique s'étalant sur plus de 2 milliards d'années. Il est possible de

diviser le Maroc en cinq grands domaines géologiques (**Fig. 5**) : **1/** La chaîne du Rif au nord se situe à la jonction entre la mer Méditerranée et l'océan Atlantique. Cette chaîne résulte de l'histoire complexe de la convergence des plaques Africaine et Eurasienne et appartient à la chaîne Alpine, **2/** Les mesetas Marocaine et d'Oran constituent la continuité sur le continent Africain de la chaîne Varisque d'Europe, **3/** Le domaine que forment ces deux Mesetas est séparé par le Moyen Atlas et également limité au Sud par le Haut Atlas qui forme à eux deux le domaine Atlasique. Ce dernier correspond à une chaîne de montagne plissée, développée durant le cycle Alpin sur un socle continental et enfin, **4/** le domaine de l'Anti-Atlas sur lequel porte cette étude, séparé du domaine atlasique par la faille sud Atlasique. Ce domaine correspond à une ceinture Panafricaine bordant la partie nord du craton ouest africain (Michard et al., 2008), **5/** le domaine Saharien composé d'un socle précambrien, archéen et protérozoïque affecté par les orogénèses éburnéenne, panafricaine et varisque ainsi que d'une couverture mésocénozoïque tabulaire et peu épaisse (Piqué et al., 2007).

1.4.2. Un socle Précambrien

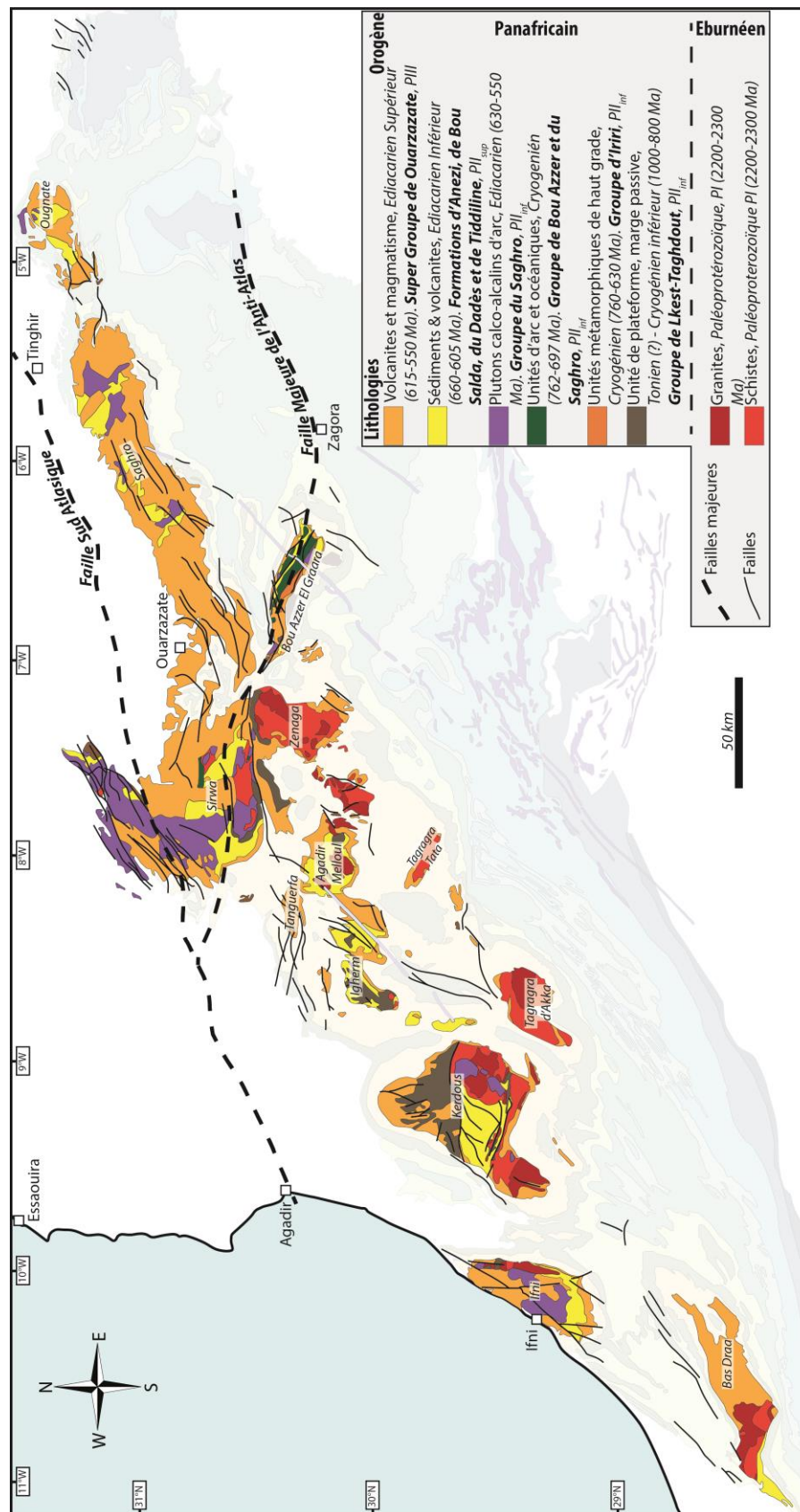


Figure 6: Carte géologique du socle Précambrien de l'Anti-Atlas (modifiée d'après Hollard et al., 1985; Walsh et al., 2002; Gasquet et al., 2008; Blein et al., 2014).

Le terme « **socle** » employé au sein de l'Anti-Atlas englobe toutes les roches plus anciennes que celle du mégacycle du Gondwana (Burkhard et al., 2006). Il est composé de roches magmatiques, métamorphiques, volcaniques et sédimentaires (**Fig. 6**). Les roches les plus anciennes affleurent de l'Anti-Atlas occidental jusqu'à l'Anti-Atlas central et elles sont limitées par l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas (Burkhard et al., 2006). D'après Malek et al., (1998), Thomas et al. (2002 et 2004) et Walsh et al. (2002), cet accident correspondrait à la bordure nord du craton ouest africain (**Fig. 5**). Ce socle ancien à l'ouest de l'AMAA (= Accident Majeur de l'Anti-Atlas) est composé de granitoïdes, de gneiss et d'un complexe de séries métamorphiques attribués à l'orogénèse Eburnéenne datées à environ 2 Ga. Les autres roches du socle se sont mises en place et ont été structurées durant l'orogénèse Panafricaine entre 750 et 550 Ma (Hefferan et al., 2000; Burkhard et al., 2006). Les vestiges d'une zone de suture Panafricaine, témoins de cette orogénèse, affleurent sous la forme d'un complexe ophiolitique démembré dans l'Anti-Atlas Central au niveau de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (Leblanc and Lancelot, 1980; Saquaque et al., 1989; Hefferan et al., 2002; Thomas et al., 2002; Soulaïmani et al., 2006a; El Hadi et al., 2010; Walsh et al., 2012). Ennih and Liégeois (2001) ont réinterprété l'AMAA comme la limite d'une structure aulacogène sur le Craton Ouest Africain dont la limite nord serait située au niveau de la Faille Sud Atlasique (FSA) et la limite Est serait située à l'Est de la chaîne d'Ougarta (**Fig. 5**). Ce socle Panafricain est constitué de la base au toit :

(i) de l'Anti-Atlas occidental à central (**Fig. 6 et 7**), du **groupe de Lkest-Taghdout** composé des plus anciennes roches sédimentaires recouvrant en discordance le socle Eburnéen, sous la forme de carbonates métamorphiques, de quartzite et de schistes formés entre 1000 et 700 Ma selon les auteurs (Choubert, 1963; Benziane and Yazidi, 1982; Hassenforder, 1987; Leblanc, 1981; Bouougri and Saquaque, 2004; Thomas et al., 2004; Gasquet et al., 2008).

(ii) dans l'Anti-Atlas occidental (**Fig. 6 et 7**), le **groupe d'Iriri** composé de roches métamorphisées de type arc volcanique et plutonique dont le protolithe a été daté à 743 ± 14 Ma (U/Pb sur zircon, Thomas et al., 2002, 2004).

(iii) dans l'Anti-Atlas central (**Fig. 6 et 7**), le **groupe de Bou Azzer** affleure sous la forme d'un complexe ophiolitique et d'un complexe d'arc au niveau de l'AMAA (Thomas et al., 2002, 2004; D'Lemos et al., 2006; Gasquet et al., 2008; El Hadi et al., 2010; Walsh et al., 2012) d'âge compris entre 762 et 697 Ma (Walsh et al., 2012). Les roches composant ce

groupe sont des méta-sédiments et des méta-volcanites dont des méta-basaltes, des serpentinites et des orthogneiss (El Hadi et al., 2010; Walsh et al., 2012).

(iv) le **groupe du Saghro** affleure de la boutonnière du Sirwa, dans l'Anti-Atlas Central, jusqu'à l'anti-Atlas Occidental (**Fig. 6 et 7**). Il est composé de métaturbidites et de roches métavolcaniques mafiques à intermédiaires (Álvaro et al., 2014). L'ensemble des roches métasédimentaires est attribué au Cryogénien (Fekkak et al., 2001; Thomas et al., 2004). Au sein de la boutonnière du Saghro, ces roches sont déformées et métamorphisées dans le faciès des schistes verts durant l'orogénèse Panafricaine (Álvaro et al., 2014).

(v) les **formations d'Anezi de Bou Salda, du Dadès et de Tiddiline** affleurent sur l'ensemble des boutonnières de l'Anti-Atlas (**Fig. 6 et 7**). Elles sont datées du Cryogénien inférieur à l'Ediacarien inférieur. Au sein de l'Anti-Atlas Central et Occidental, ces formations sont formées de conglomérat lités, de grès, de shales et de roches volcaniques qui ont été déposées en discordance sur les formations les plus déformées et métamorphisées des groupes du Saghro et de Bou Azzer (Álvaro et al., 2014). Il s'agit de bassins intra-cratoniques de marge dans lesquels se déposent des molasses issues de l'érosion des groupes du Saghro et de Bou Azzer (Thomas et al., 2004; Gasquet et al., 2008; Walsh et al., 2012). Ces formations ont été datées entre 660 – 605 Ma (Thomas et al., 2004) et 700 - 630 Ma (Walsh et al., 2012).

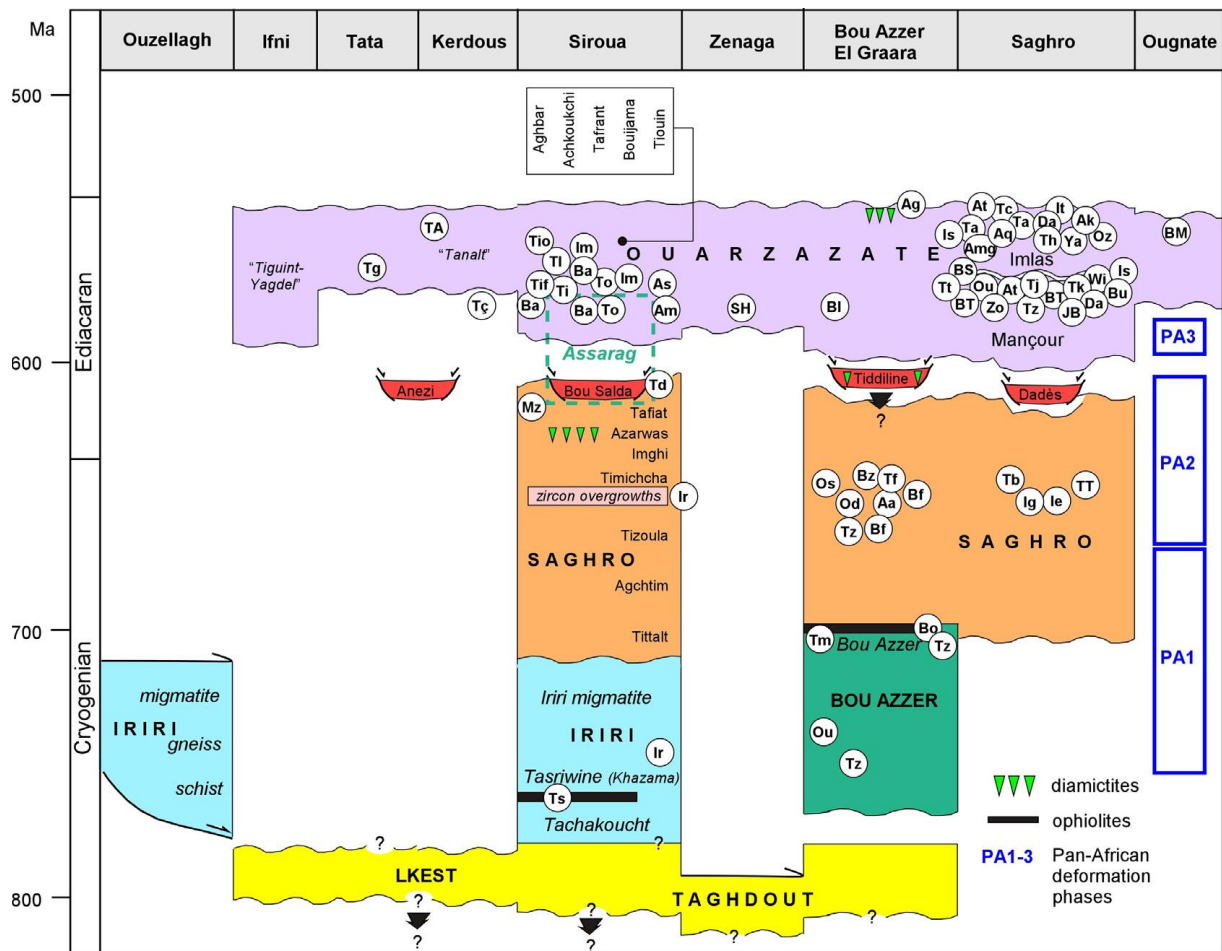


Figure 7 : Cadre litho-stratigraphique du socle Panafricain et du groupe de Ouarzazate du sud du haut-Atlas et de l'Anti-Atlas (Álvaro et al., 2014). Les abréviations correspondent à des données de datations de différentes localités de l'Anti-Atlas compilées par Álvaro et al. (2014).

(vi) Le **Super groupe de Ouarzazate** est constitué d'une pile de roches volcanoclastiques et volcaniques de plus de 2 kilomètres d'épaisseur, associée à des plutons et des dykes. Ce Super Groupe est présent de l'Anti-Atlas Occidental à Oriental et il repose en discordance sur les formations sous-jacentes (Service Géologique du Maroc, 1985; Thomas et al., 2002, 2004). Sa période de formation s'étend de 615 à 550 Ma (Thomas et al., 2002; Gasquet et al., 2005, 2008; Walsh et al., 2012) et correspondrait à une période de glaciation majeure à la surface de la Terre (Hoffman, 1998; Doblus et al., 2002; Vernhet et al., 2012). Cette formation présente des variations latérales et verticales de faciès, se traduisant par des changements brutaux du type de dépôt allant de fluviale, alluviale à subaérien (Álvaro et al., 2014). Le Super Groupe de Ouarzazate peut être subdivisé en deux groupes :

- (1) la partie inférieure serait datée entre 615 et 571 Ma (Gasquet et al., 2005, 2008; Walsh et al., 2012). Elle a été affectée par la phase finale de la déformation Panafricaine se traduisant par des blocs faillés et plissés. Elle est composée de tufs

rhyolitiques à andésitiques, de brèches et de conglomérats polygéniques, de roches volcano-clastiques et de dolomies lacustres (Álvaro and Debrenne, 2010).

(2) la partie supérieure est composée de coulées rhyolitiques interstratifiées avec des grès volcano-clastiques, des shales, ainsi que des brèches et conglomérats polygéniques. La discordance entre la partie inférieure et supérieure est estimée aux alentours de 560 Ma (Ar/Ar sur hornblende et muscovite) dans la boutonnière du Saghro (Blatrix and Burg, 1981; Quesada and Dallmeyer, 1994; Álvaro et al., 2014).

Le Super Groupe de Ouarzazate est également caractérisé par un plutonisme calco-alcalin à shoshonitique et par un volcanisme d'arc à un volcanisme continental (Thomas et al., 2002; Gasquet et al., 2005, 2008; Walsh et al., 2012).

1.4.3. Une couverture tardi-Néoprotérozoïque à Paléozoïque

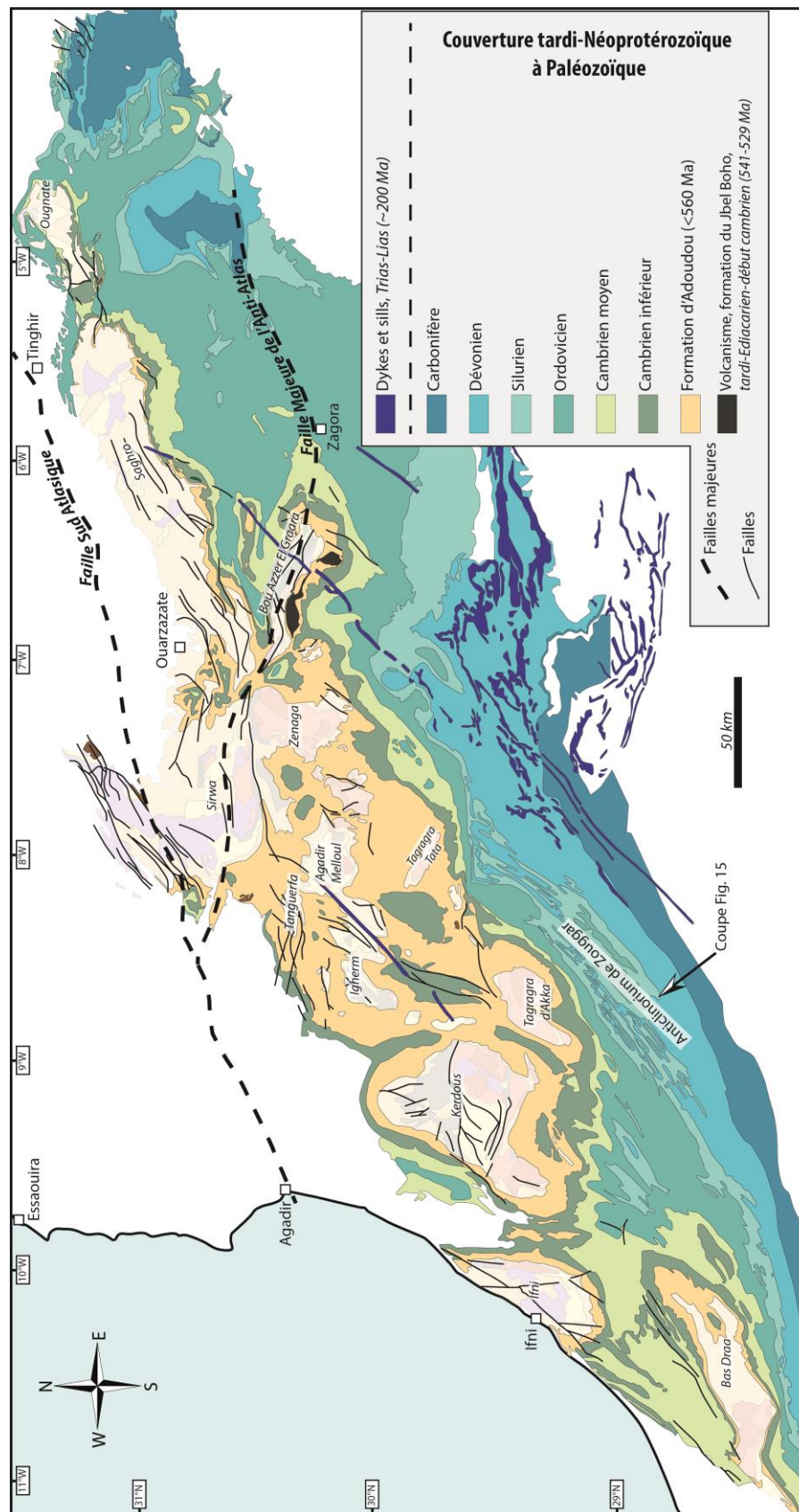


Figure 8: Carte géologique de la couverture tardi-Néoprotérozoïque à Paléozoïque de l'Anti-Atlas (modifiée d'après le Service Géologique du Maroc, 1985).

À la fin du Précambrien, l'orogénèse Panafricaine a conduit à la formation du Gondwana. Ce supercontinent était localisé au niveau de l'hémisphère sud et s'étendait du pôle Sud jusqu'à l'équateur. Dans l'Anti-Atlas, la transition Précambrien-Cambrien se traduit par la formation d'un rift associé à du volcanisme (**Fig. 9**), à la mise en place d'une mer profonde épicontinentale sur la marge du Gondwana, et à plusieurs cycles de transgression-régression marine. Une sédimentation intense s'est alors mise en place dont il résulte une pile sédimentaire, allant du néoprotérozoïque terminal jusqu'au carbonifère (**Fig. 8**) d'une épaisseur pouvant atteindre localement plusieurs milliers de mètres (Boudda et al., 1979; Benziane et al., 1983; Destombes et al., 1985; Azizi Samir et al., 1990; Chbani et al., 1999; Benssaou and Hamoumi, 1999a, 1999b, Algouti et al., 2000, 2001, Benssaou and Hamoumi, 2001, 2003). La séquence sédimentaire complète est estimée entre 8 et 9 kilomètres d'épaisseur dans l'Anti-Atlas Occidental et entre 4 et 5 kilomètres dans l'Anti-Atlas Oriental (Michard et al., 2008). Cette séquence sédimentaire montre des variations latérales de faciès induisant une nomenclature dense et complexe que nous avons tenté de synthétiser de la manière la plus claire possible. La description de cette séquence est divisée en groupes, subdivisés en formations, parfois subdivisées en unités pouvant être subdivisées en partie.

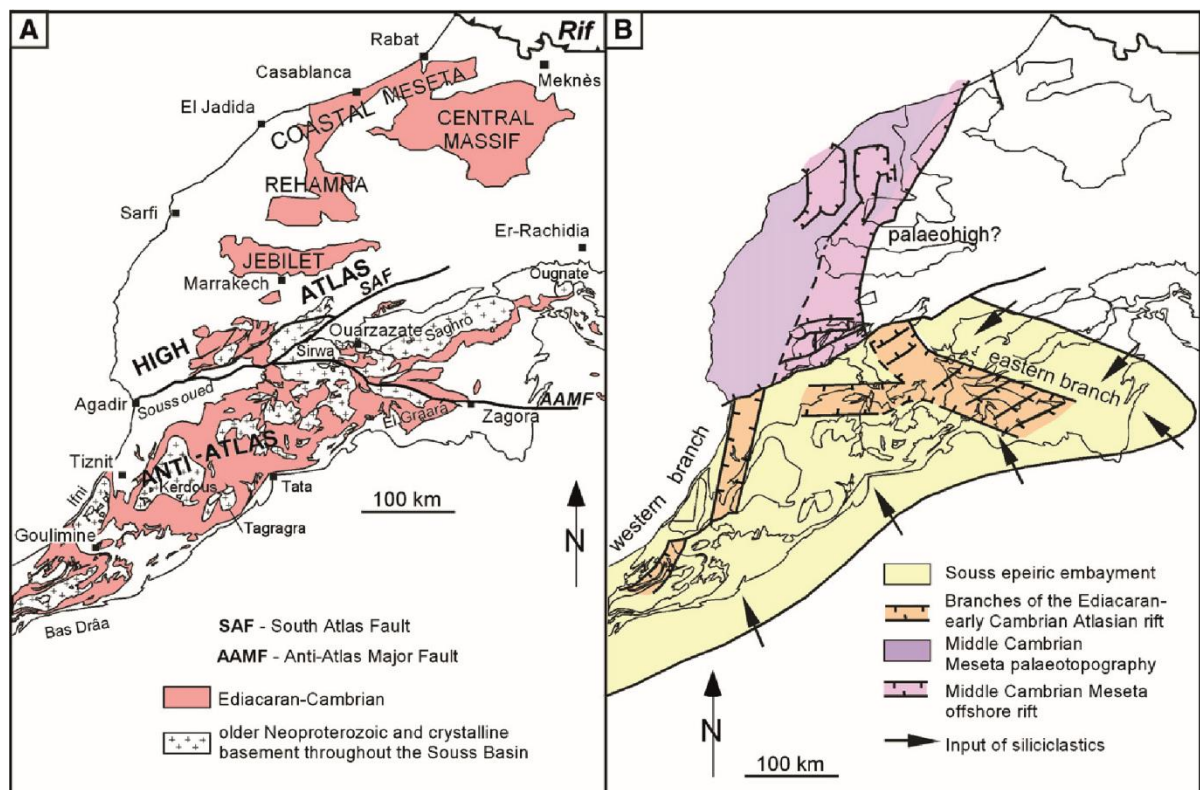


Figure 9 : A. Schéma géologique montrant les principales unités géologiques pré-Varisques du Maroc (Álvaro and Debrenne, 2010). B. Tentative de reconstruction des branches du rifting tardi-Ediacarien/Cambrien du Maroc, basée sur les isopaques et les centres volcaniques actifs publiés par (Choubert and Faure-Muret, 1970; Boudda et al., 1979; Benziane et

al., 1983; Bernardin et al., 1988; Azizi Samir et al., 1990; Pique et al., 1995; Álvaro et al., 2008 ; Álvaro and Debrenne, 2010).

1.4.3.1. Litho-stratigraphie

❖ LE GROUPE DE TAROUDANT

Le groupe de Taroudant est subdivisé en deux unités : la formation d'Adoudou et la formation de la série Lie de Vin.

○ *La formation d'Adoudou (tardi-Néoproterozoïque à Cambrien inférieur)*

Cette formation tire son nom de l'Oued Adoudou situé à l'ouest de l'Anti-Atlas. Elle correspond à la première transgression Marine du bassin marin d'Adoudou de la fin du Néoprotérozoïque. Elle a été subdivisée par Choubert (1952) en une unité inférieure nommée « série de base » et une unité supérieure nommée « calcaires inférieurs » correspondant respectivement aux membres de Tabia et de Tifnout décrits par Maloof et al. (2005). La série de base (membre de Tabia), d'une épaisseur de plus de 150 mètres, contient de sa base au sommet : (i) une partie massive de conglomérats, (ii) une partie de dolomie riche en phosphates (Álvaro and Subías, 2011) portant localement le nom de « petits calcaires », (iii) une partie contenant des alternances de siltites et de marnes dans lesquelles s'intercalent des niveaux conglomératiques, gréseux et dolomitiques (Chbani et al., 1999; Algouti et al., 2000; Javier Álvaro, 2013). Cette partie basale de la formation d'Adoudou correspond au développement progressif de la fracturation et du basculement des blocs de socle qui créent des dépressions dans lesquelles se déposent tantôt des sédiments continentaux, tantôt des sédiments marins. La partie supérieure de la série de base, plus silico-clastique, contient des structures discoïdes au sein de shales marins qui ressemblent à des faunes édiacariennes comme *Aspidella* (Houzay, 1979; Maloof et al., 2005). L'unité de la série de base contient les roches les plus anciennes de la couverture néoprotérozoïque à cambrienne, elle n'est présente que dans la partie occidentale de l'Anti-Atlas contrairement aux calcaires inférieurs qui sont présents de l'Anti-Atlas occidental à central (**Fig. 10 et 14**) (Boudda et al., 1979).

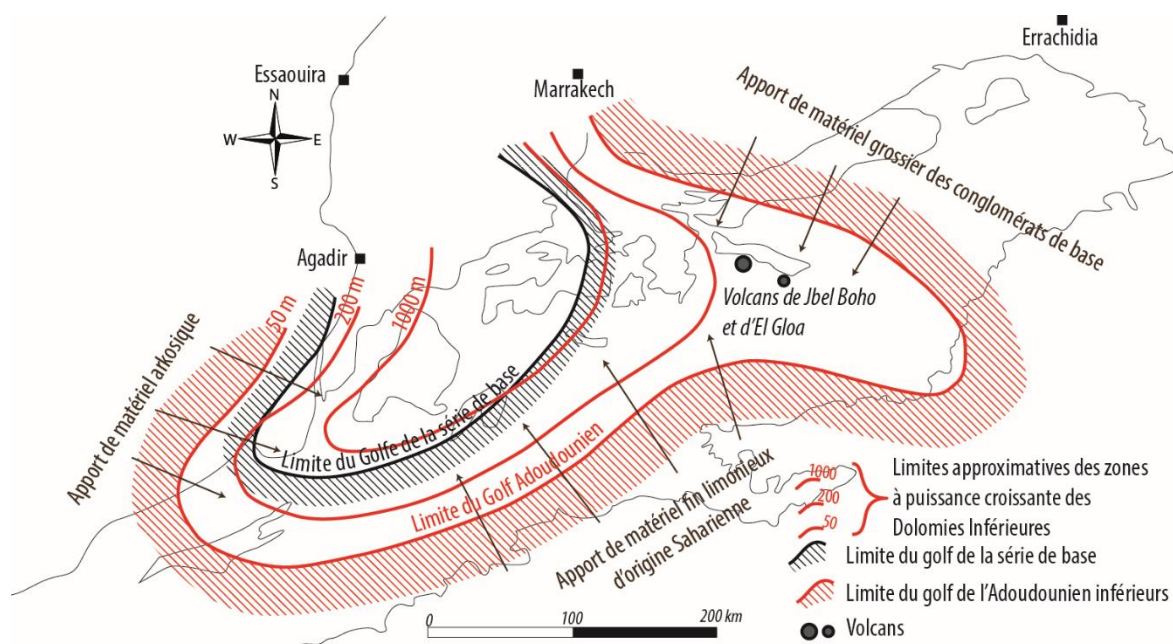


Figure 10 : Schéma paléogéographique du cycle sédimentaire adoudounien (modifié d'après Boudda et al., 1979).

Les « calcaires inférieurs » (membre de Tifnout) ont une épaisseur comprise entre 200 et 1000 mètres. À la base se trouve la partie des dolomies de *Tamjout* qui ont une épaisseur de plus de 200 mètres (Chazan, 1954) et qui sont composées de dolomies noires silicifiées. L'unité des calcaires inférieurs est composée de dolomies litées, grises claires, massives, riches en stromatolites, en figures de dessiccation, en reliques évaporitiques et en structures de déformation syn-sédimentaire comme des slumps (Buggisch and Heinitz, 1984; Buggisch and Flügel, 1988; Álvaro et al., 2000, 2008, 2014). L'étude des variations de concentration en isotope du carbone suggère que la transition néoprotérozoïque/cambrien se situe dans ce niveau (Magaritz et al., 1991; Maloof et al., 2005). Un volcanisme calco-alcalin s'initie durant la même période que la sédimentation de la formation d'Adoudou. Deux appareils volcaniques, Jbel Boho et El Gloa sont situés dans l'Anti-Atlas Central (Ducrot and Lancelot, 1977; Gasquet et al., 2005; Álvaro et al., 2006). Des anciennes coulées de laves appartenant à l'appareil volcanique du Jbel Boho, intercalées dans la formation d'Adoudou, ont été datées à 534 ± 10 Ma (U/Pb sur zircon) (Ducrot and Lancelot, 1977).

○ La formation de la « série Lie de Vin » et des grès de Tikirt (Cambrien inférieur)

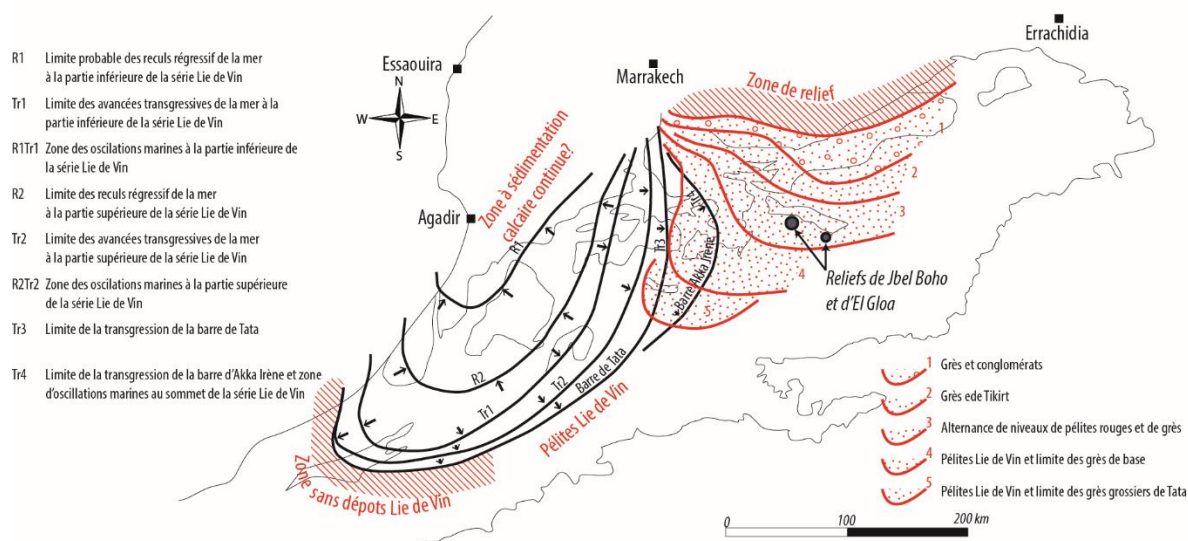


Figure 11 : Schéma paléogéographique du bassin d'Adoudou lors du dépôt des formations de la « série Lie de Vin » et de Tikirt (Boudda et al., 1979).

Cette formation marque une phase majeure de régression marine. D'une épaisseur variant entre 25 à 950 mètres, la Série Lie de Vin est composée essentiellement d'une roche rouge bordeaux silicoclastique à grains fins contenant des niveaux interstratifiés de calcaires et de dolomies (Benssaou and Hamoumi, 2001, 2004). Cette alternance de faciès marque des périodes de transgression, marquées par les niveaux carbonatés, suivies de régressions marines, marquées par les dépôts détritiques rouges, surtout observables dans l'Anti-Atlas Occidental (**Fig. 11**) (Boudda et al., 1979). Au niveau de l'Anti-Atlas Central et d'une partie de l'Oriental la série Lie de Vin change latéralement de faciès au profit de la formation des grès de Tikirt (**Fig. 14**). Ce changement latéral de faciès se traduit par un caractère plus grossier donnant des grès massifs à alternance de shales violacés avec une dominance nette des grès dans l'Anti-Atlas Oriental (Benziane and Yazidi, 1982). Cette formation Lie de Vin et son équivalent latéral, les grès de Tikirt, contiennent une association de strombolite et de rare ichnofossiles laissant sous-entendre un âge proche du début du Cambrien inférieur (Latham and Riding, 1990), âge qui se corrèle avec les profils de variation isotopique du ^{13}C (**Fig. 14**) (Maloof et al., 2005)

❖ LE GROUPE DE TATA

Ce groupe contient 5 formations stratigraphiques, les formations d'Igoudine, d'Amouslek, de Tislit, d'Issafène et de Tazlaft (Álvaro et al., 2014). Respectivement : (1) les

quatre premières formations correspondent à la formation des Dolomies Supérieures (Choubert, 1952), elles sont les marqueurs d'une phase de transgression marine ; (2) la dernière formation correspond à celle des Grès Supérieures (Choubert, 1952). Elle signifie le début d'une phase de régression marine amenant à l'émersion complète l'Anti-Atlas (Choubert, 1952; Álvaro et al., 2007).

- *La formation d'Igoudine (Cambrien inférieur) :*

Cette formation, épaisse de plus de 400 mètres, est composée d'une dominance de bancs de calcaires et dolomies massives contenant des intercalations de siltites et de shales (Buggisch and Heinitz, 1984). Cette formation peut contenir un niveau distinct, nommé « unité de Tiout », composé de 20 à 110 mètres de dolomies oolithiques bioclastiques avec des traces de tapis microbiens à son toit (Álvaro et al., 2006). Des stromatolites ont été décrits dans l'unité de Tiout (Schmitt and Monninger, 1977) ainsi que les plus anciens fossiles à coquilles reconnus dans l'Anti-Atlas (Sdzuy and Geyer, 1988; Debrenne and Debrenne, 1995; Álvaro et al., 2006; Álvaro and Debrenne, 2010) et également les plus anciens trilobites (Hupé, n.d.; Sdzuy, 1978). Ces faunes sont surtout présentes dans l'Anti-Atlas Occidental (**Fig. 12**) (Boudda et al., 1979). Cette unité de Tiout est présente dans la partie supérieure de la formation d'Igoudine.

- *La formation d'Amouslek (Cambrien inférieur) :*

Cette formation d'épaisseur variant entre 40 et 220 mètres est constituée d'une alternance de dolomies et de siltites dans lesquelles s'intercalent des niveaux pélitiques (Geyer, 1989). Cette formation contient divers assemblages d'archaeocyathes (Debrenne and Debrenne, 1995) et de nombreux trilobites, brachiopodes, hyolitha, cancelloriides et d'autres fossiles à coquille (Geyer, 1989; Álvaro et al., 2006; Álvaro and Debrenne, 2010).

- *La formation de Tislit (Cambrien inférieur) :*

La formation de Tislit (Geyer, 1989) est présente uniquement à l'extrême Est de l'Anti-Atlas Oriental (**Fig. 12**). Elle représente une variation latérale des faciès d'Igoudine et d'Amouslek. Elle est épaisse de plus de 300 mètres et elle se compose d'une alternance de shales et de grès rouges à intercalation locale de dolomies, calcaires et d'évaporite (Boudda et al., 1979; Buggisch et al., 1979)

- *La formation d'Issafène (Cambrien inférieur) :*

La formation d'Issafène est épaisse de 25 à 400 mètres. Elle se compose d'une alternance de shales à nodules de calcaires, de pélites violacées, de calcaires et de dolomies

(Álvaro and Debrenne, 2010). Cette formation devient de plus en plus détritique en s'approchant de son toit (Boudda et al., 1979).

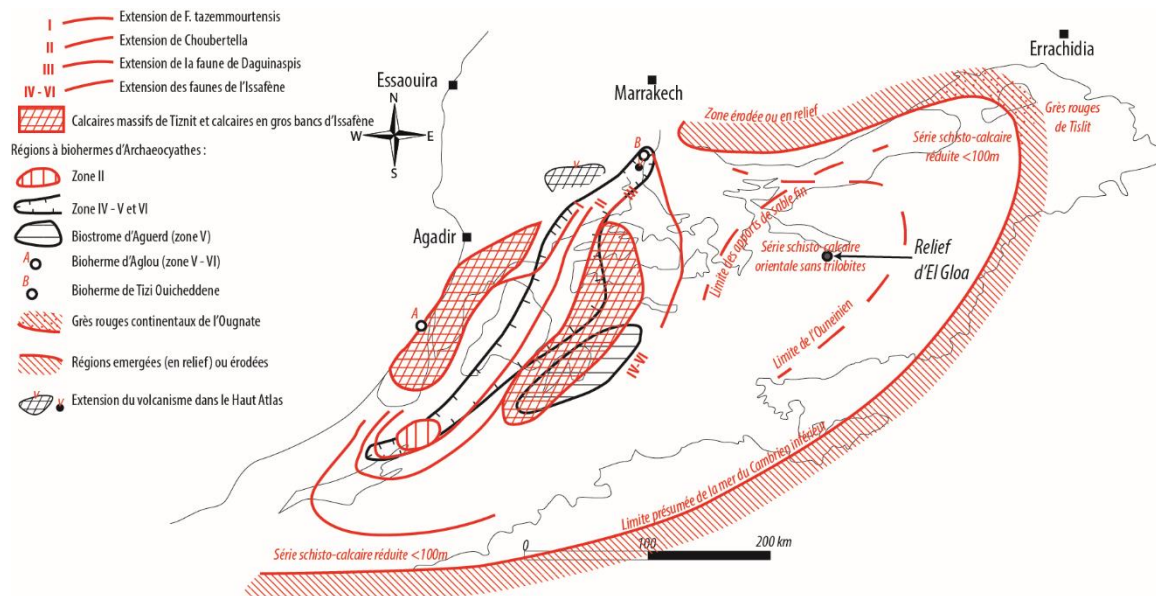


Figure 12 : Dolomies Supérieures (Boudda et al., 1979).

- Les formations d'Asrir, de Tazlaft, d'Aguerd et d'Akerouz (Cambrien moyen) :

Ces formations sont des équivalents latéraux de faciès correspondent aux Grès Terminaux (ou Supérieures) décrits par (Choubert, 1952). Elles sont à dominance de grès massifs alternant avec de fins niveaux de shales (Choubert, 1952). Geyer (1989) a établi ces quatre formations sur la base des fabriques granulométriques et de leur couleur : (i) la formation d'Asrir, d'une épaisseur de 30 à 180 mètres, est composée d'une alternance de grès verts et de shales d'origine marine dans laquelle s'intercalent de fins dépôts volcaniques. Elle s'étend de l'Anti-Atlas Occidental à Central (**Fig. 13 et 14**) (Boudda et al., 1979) ; (ii) la formation de Tazlaft est composée d'une alternance, épaisse de 20 à 160 mètres, de grès roses massifs et de shales d'origine continentale (**Fig. 13**) (Boudda et al., 1979); (iii) la formation d'Aguerd est composée d'une alternance de grès et de conglomérat épaisse de 10 à 20 mètres ; (iv) la formation de Akerouz est présente uniquement dans l'Est de l'Anti-Atlas Oriental. Elle se compose de 70 mètres de grès, de shales et de conglomérats (Buggisch and Siegert, 1988).

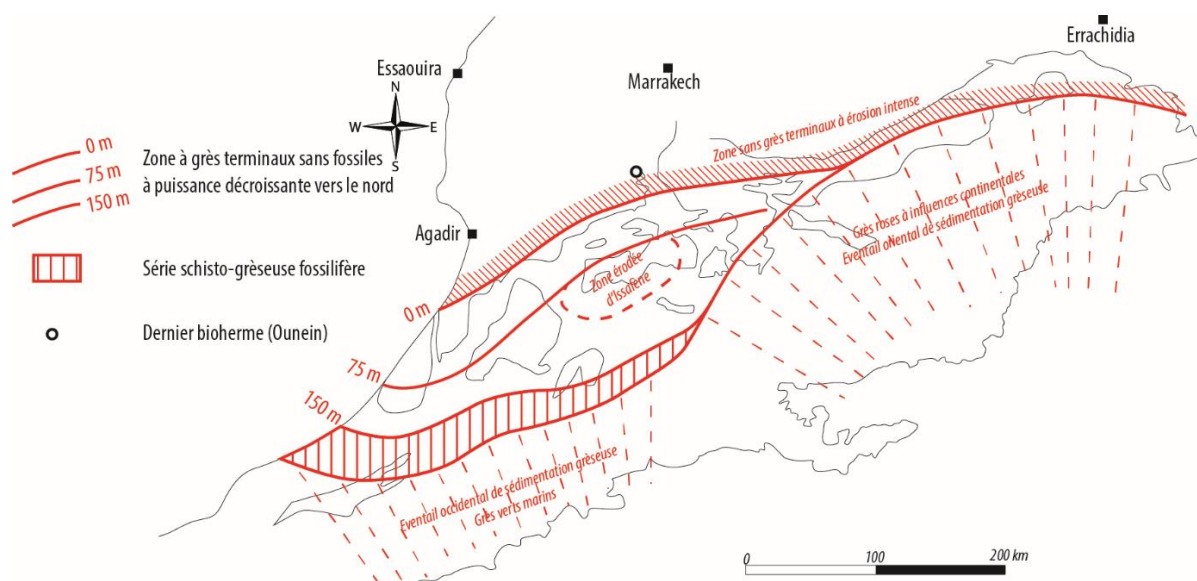


Figure 13 : Grès supérieure (Boudda et al., 1979).

❖ LE GROUPE DES FEÏJAS INTERNES (CAMBRIEN MOYEN)

Le groupe des Feïjas internes (Destombes et al., 1985) recouvre en discordance chronologique les formations d'Asrir, de tazlaft, d'Aguerd et d'Akerouz mais sans discordance angulaire. Il est subdivisé en 5 unités : les unités de Jbel Wawrmast, de Jbel Afraou, de Tamanart, de Goulimine et d'Akka (**Fig. 14**). Ces unités sont des équivalences latérales de faciès et elles présentent des différences lithologiques mineures. Ces unités sont essentiellement composées de pélites vertes dans lesquelles s'intercalent des bancs de grès fins et d'argiles silteuses à Paradoxides (Destombes et al., 1985; Geyer, 1989).

❖ LE GROUPE DE TABANITE (CAMBRIEN MOYEN A SUPERIEUR)

Le groupe de Tabanite est subdivisé en quatre formations (**Fig. 14**) : (i) la formations de Rich Khelifa, épaisse de 15 à 75 mètres, est composée de grès et de conglomérats (Destombes et al., 1985), (ii) la formation de Bailiella, épaisse de 30 à 70 mètres, est composée de shales vertes dans lesquelles s'intercalent localement des lits et des nodules calcaires, (iii) la formation d'Azlag, épaisse de 50 à 70 mètres, est composée de bancs massifs de grès alternant localement avec de fins niveaux de shales, (iv) la formation de Jbel Lmgaysmat, épaisse de plus de 35 mètres, est composée de grès conglomératiques et d'alternances de shales et de grès (Destombes et al., 1985).

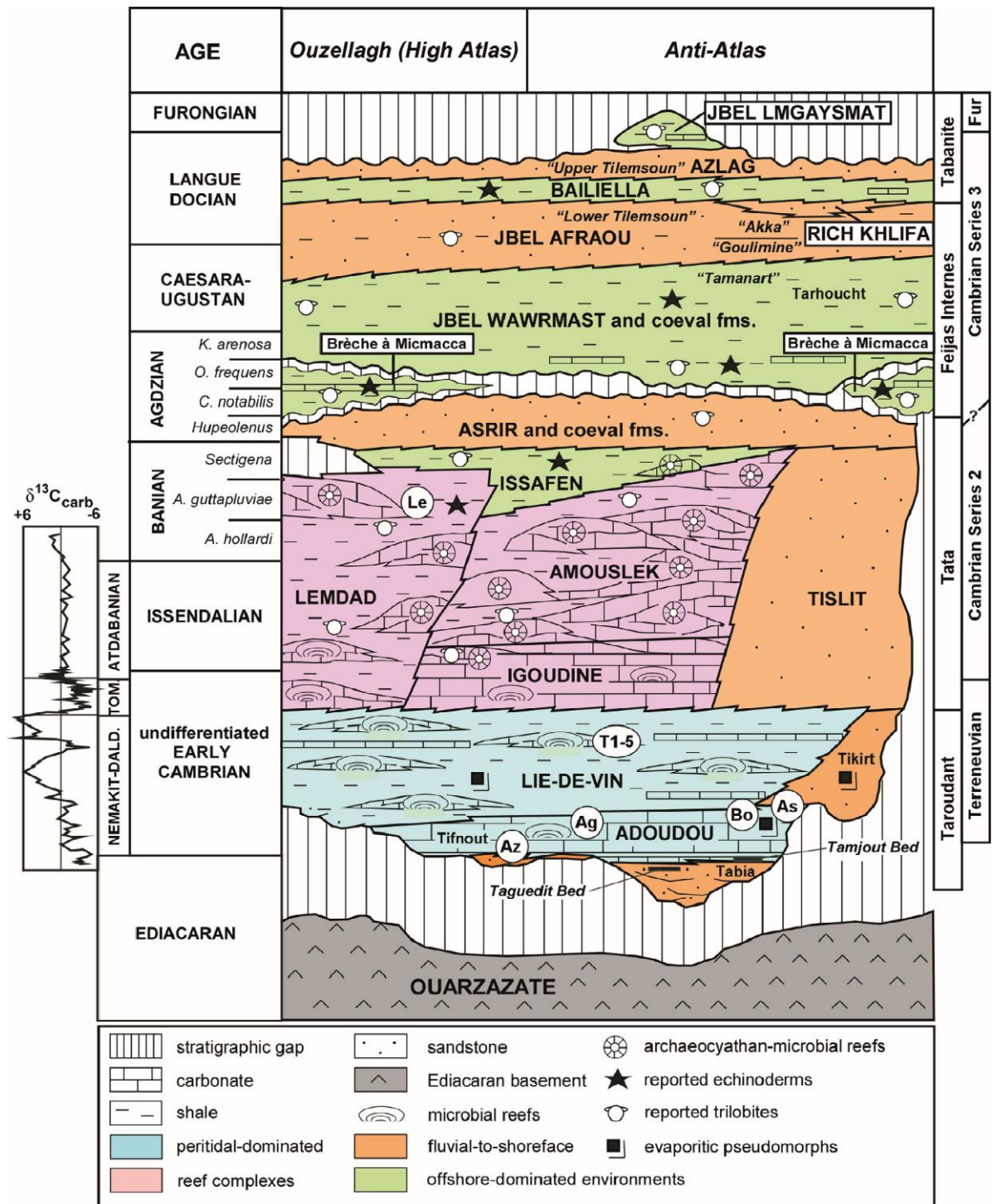


Figure 14 : Schéma des unités stratigraphiques de la transition néoprotérozoïque-cambrienne de l'Anti-Atlas et du Haut-Atlas (Álvaro et al., 2014).

❖ LE GROUPE DE FEIJAS EXTERNE (ORDOVICIEN INFÉRIEUR)

Ce groupe possède une puissance variant de 800 mètres dans l'Anti-Atlas Occidental à 1500 mètres dans l'Anti-Atlas Central. Il est composé de siltites riches en quartz et de bancs de grès noirs massifs. À la base de ce groupe, un niveau micro-conglomératique définit le

début de la transgression ordovicienne. Celui-ci est associé à des siltites riches en quartz dans lesquelles des niveaux de grès peuvent s'intercaler. (Destombes et al., 1985).

❖ LE GROUPE DU JBEL BANI (ORDOVICIEN SUPERIEUR)

Ce groupe est également nommé « ensemble grés-quartzitique du premier et deuxième Bani ». Il débute par une barre massive de grès noirs quartzitiques (premier Bani), puissant de 25 à 300 mètres, alternant avec des niveaux de grès verts argileux. Ensuite, une série argileuse de 250 à 500 mètres de puissance se dépose, dans laquelle sont intercalés des niveaux de grès et de quartzite. Cette unité argileuse est coiffée par deux barres massives de grès et quartzites (deuxième Bani) (Destombes et al., 1985). Ce groupe du Jbel Bani s'est mis en place dans une mer épicontinentale dans un contexte permanent de variations eustatiques (Destombes et al., 1985). Durant l'ordovicien terminal, une calotte glaciaire importante recouvre l'ensemble du continent nord-africain (Beuf, 1971; El Maazouz and Hamoumi, 2007; Colmenar and Álvaro, 2015).

❖ (VII) LE GROUPE DU SILURIEN

Le Silurien est un événement transgressif suivant la fonte de la calotte glaciaire tardi-ordovicienne. Il est composé à sa base de niveaux carbonatés puis de schistes argileux noirâtres à graptolite, riches en matière organique, et de grès siliceux (Hollard et al., 1985).

❖ LES GROUPES DE JBEL RICH, DE MEKSEM-MDARSAL, DU DRÄA, DE TAZAOUT, DE BETAÏNA ET DU JBEL OUARKZIG (DEVONIEN ET CARBONIFERE)

Le Dévonien est composé : (1) Du groupe du Jbel Rich qui correspond au Dévonien inférieur. Ce groupe est constitué d'une succession identique de quatre ensembles composés à la base de calcaires à gros grains, suivis de shales et de siltites sableuses et enfin de grès massifs au toit. Dans l'Anti-Atlas Oriental le niveau de grès disparaît progressivement en faveur de carbonates. Ce groupe du Jbel Rich possède une puissance de 950 à 1800 mètres (Hollard et al., 1985; Wendt, 1985). (2) le groupe de Meksem-Mdarsal, correspondant au Dévonien Moyen, est constitué d'une série argilo-calcaire épaisse de 200 à 450 mètres composée d'une alternance de calcaires noirs, de marnes noires, de calcaires marneux, de calcaires noduleux et de shales rouges (Wendt et al., 1984; Wendt, 1985; Hollard et al., 1985). (3) le groupe du Dräa correspondant au Dévonien Supérieur est composé d'une série d'argilites grise puissantes de 200 à 2400 mètres, à nodules calcaires et à intercalations

gréseuses (Hollard et al., 1985). (4) Le Groupe de Tazout (dévonien sup. – carbonifère inf.) a une puissance variant de 250 à 400 mètres. Il est composé d'une alternance de grès à bioturbations, de calcaires et de siltites vertes (Hollard et al., 1985; A. Michard et al., 2008; Cózar et al., 2014). (5) Le groupe de Betaïna (carbonifère inf.) est formé d'une alternance de shales et de grès d'une puissance variant entre 900 et 1600 mètres (Hollard et al., 1985; A. Michard et al., 2008). (6) Le carbonifère supérieur est lui représenté par le groupe du Jbel Ouarkzig puissant de 500 à 750 mètres. Il est composé de calcaires bleus, dans lesquels s'intercalent des shales (Hollard et al., 1985; A. Michard et al., 2008).

1.4.3.2. Une parenthèse sur la transition Neoprotérozoïque à Cambrienne : des changements à l'échelle mondiale

La transition Néoprotérozoïque à Cambrienne a été une période de perturbations majeures de la planète Terre. Une des preuves de ces changements s'est traduite par une extinction de masse des faunes Ediacariennes (Knoll and Carroll, 1999) suivi de « l'explosion de la vie » au cambrien (Brasier, 1992; Grotzinger et al., 1995; Amthor et al., 2003). Cette explosion du vivant résulterait de changements des conditions environnementales aux alentours de 542 Ma (Brasier, 1992; Grotzinger et al., 1995; Amthor et al., 2003). En effet, durant la transition Précambrien/Cambrien la chimie des océans aurait évolué vers des conditions anoxiques et réductrices se traduisant par un enrichissement en métaux des océans, notamment en uranium et en vanadium, (Banerjee et al., 1997; Pan et al., 2004; Wille et al., 2008). L'origine de ces perturbations chimiques des océans est à chercher dans les événements géologiques catastrophiques de cette période comme un dégazage de méthane dans l'atmosphère (Kirschvink and Raub, 2003), un volcanisme intense de grande échelle ou une remontée des eaux profondes anoxiques et réductrices riches en sulfure d'hydrogène (Wille et al., 2008).

1.4.3.5. La déformation Varisque

Les domaines structuraux du Maroc sont marqués par des zones faillées d'extension régionale, héritées pour la plupart des orogénèses Précambriennes. Depuis leur formation, ces zones de failles ont été activées à plusieurs reprises, contrôlant notamment la sédimentation lors de la mise en place de la mer épicontinentale néoprotérozoïque à paléozoïque, mais également lors des compressions Varisque et Atlasiques (Pique et al., 1987). Dans l'Anti-Atlas, (Soulaïmani and Burkhard, 2008) ont mis en évidence des plis en kink et une foliation

Varisque se surimposant aux structures Panafricaines du socle dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Ces auteurs interprètent ces déformations Varisques du socle comme une réactivation des structures Panafricaines lors de la compression tardi-paléozoïque. Dans la couverture tardi-néoprotérozoïque à paléozoïque, les structures plissées, d'amplitude métrique à kilométrique, sont généralement attribuées à cette compression tardi-paléozoïque, contrôlée par les mouvements des structures héritées du socle Précambrien (**Fig. 15**) (Leblanc and Lancelot, 1972; Soulaïmani et al., 1997; Faik et al., 2001; Soulaïmani and Burkhard, 2008).

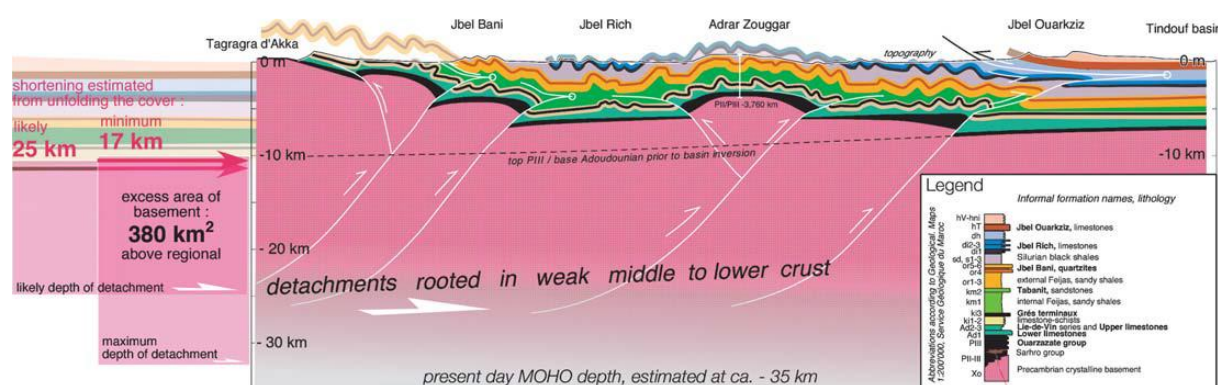


Figure 15 : Coupe partant du bassin de la boutonnière de Tagragra d'Akka jusqu'au bassin de Tindouf (localisation sur Fig. 8). Cette coupe montre le raccourcissement lié à la compression Varisque et le jeu de failles du socle (socle en rose) induisant des déformations dans la couverture néoprotérozoïque à paléozoïque (alternance de couches plissées sur le socle) (Burkhard et al., 2006).

(Caritg, 2003) a montré que le type de déformation subit lors de la compression Varisque, au sein de la couverture néoprotérozoïque à paléozoïque, était dépendant de la lithologie propre à chaque formation de cette couverture (**Fig. 16**). Ainsi, plusieurs niveaux de décollement et plusieurs types de déformations souples ont pu être mis en évidence (**Fig. 16**) (Caritg, 2003).

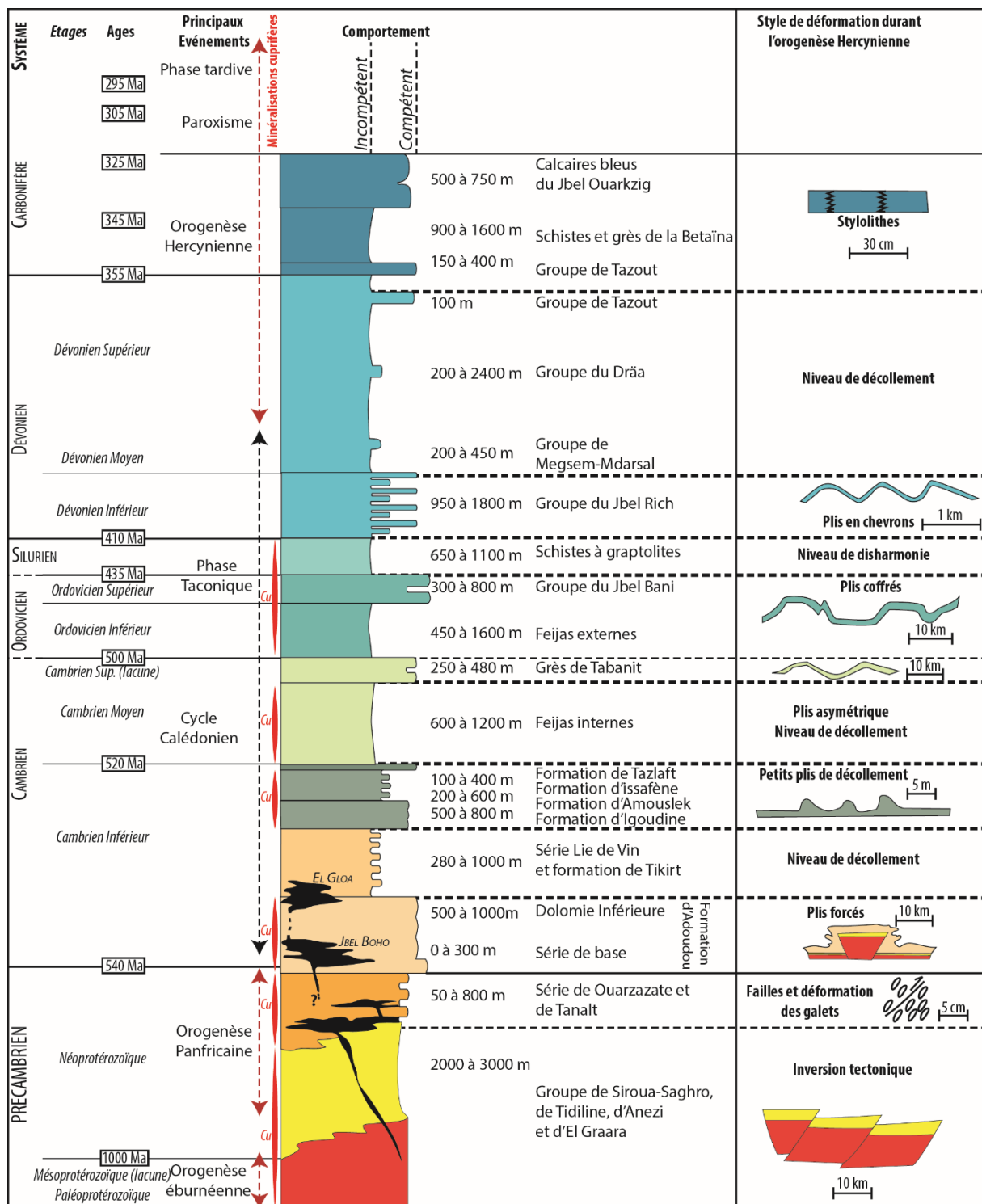


Figure 16 : Les principales formations stratigraphiques de l'Anti-Atlas marocain (décrite dans la section 1.3.3.1), les cycles orogéniques et la déformation Varisque associée (Caritg, 2003). La présence de cuivre dans les formations, à l'échelle de l'Anti-Atlas, a été rajoutée au log (modifiée d'après Caritg, 2003).

1.4.3.6. Un évènement magmatique régional tardi-triasique

L'ensemble des formations anté-mésozoïques de l'Anti-Atlas (le socle Précambrien et la couverture Néoprotérozoïque à Paléozoïque) est recoupé par les formations magmatiques

de la Province Magmatique Centrale Atlantique (CAMP) associées à l'ouverture de l'Atlantique, notamment le dyke de Foum Zguid daté aux alentours de 200 Ma qui traverse quasiment l'intégralité de l'Anti-Atlas (**Fig. 8**) (Leblanc, 1973; Sebai et al., 1991). Ces manifestations magmatiques s'expriment sous la forme de dykes et de sills de basaltes d'affinité tholéitique (Leblanc, 1973; Sebai et al., 1991; Labails et al., 2010).

1.5. LE CUIVRE DE L'ANTI-ATLAS

L'Anti-Atlas est une grande province cuprifère et ce, depuis le Moyen Âge comme en témoignent les nombreuses tranchées, scories, traces de fours anciens mais aussi les ruines du village minier de *Gued Tassawt*, situé à l'Est de la mine de *Bleida*. Les minéralisations cuprifères sont présentes aussi bien dans les différentes unités du socle Précambrien que dans la couverture Neoprotérozoïque à Paléozoïque (**Fig. 16 et 17**). De plus elles sont localisées sur l'intégralité du domaine de l'Anti-Atlas, de l'Occidental jusqu'à l'Oriental (**Fig. 17**). La plupart de ces minéralisations n'ont pas fait l'objet d'études scientifiques approfondies et les modèles génétiques proposés se limitent essentiellement à l'échelle du gisement et non à l'échelle de la province.

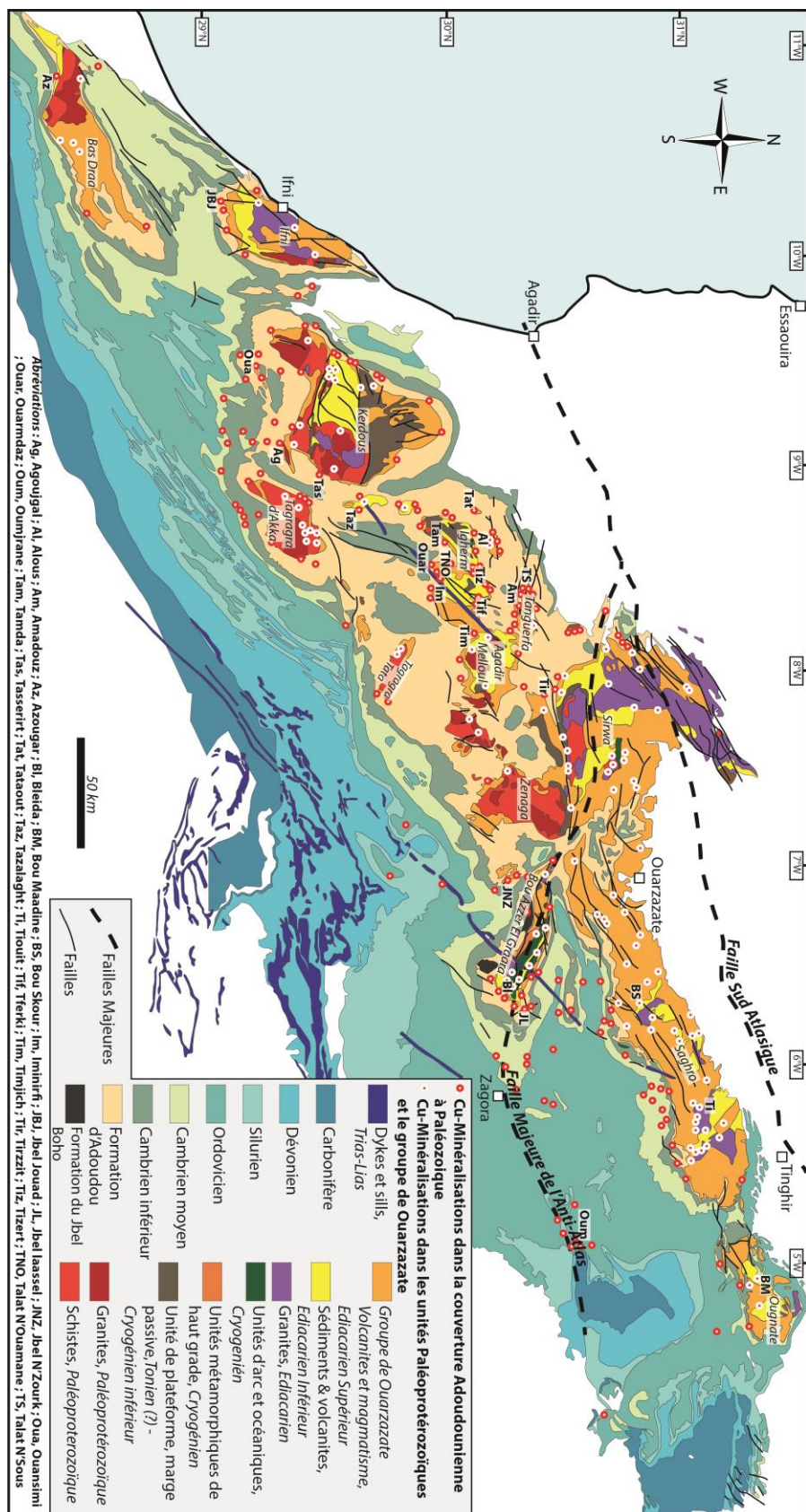


Figure 17 : Carte géologique compilée d'après la littérature sur laquelle a été reporté l'ensemble des occurrences cuprifères en fonction de leur localisation : soit au sein du socle Précambrien, soit au sein de la couverture néoproterozoïque à paléozoïque (Hollard et al., 1985; Service Géologique du Maroc, 1985; Benali, 1999; Walsh et al., 2002; Gasquet et al., 2008; Blein et al., 2014)

1.5.1. Les minéralisations du socle Précambrien

1.5.1.1. Les amas : exemple du gisement de Bleida (Anti-Atlas Central)

Le gisement de cuivre de *Bleida* est localisé dans la boutonnière précambrienne de *Bou Azzer-El Graara* (localisation **Fig. 17**). Les premières données scientifiques publiées sur le gisement cuprifère de *Bleida* évoquent une minéralisation primaire syngénétique, disséminée dans des schistes, qui pourrait être assimilée au modèle de type VMS (Saadi, 1973). D'après certains auteurs, la minéralisation primaire aurait été remobilisée et reconcentrée sous l'influence de la mise en place de la granodiorite de *Bleida* (Saadi, 1973; Leblanc, 1974). Leblanc et Billaud (1978) proposent une minéralisation de sulfures massifs stratiformes associée à un volcanisme acide sous-marin distal, contemporain de la mise en place de la plateforme volcano-sédimentaire de *Bleida* qui encaisse la minéralisation. Lors de la déformation panafricaine, cette minéralisation primaire syngénétique aurait été remobilisée. Cette déformation aurait déterminé la géométrie actuelle des lentilles cuprifères. Ces mêmes auteurs évoquent que le processus de remobilisation de la minéralisation primaire syngénétique durant la compression Panafricaine n'a pas entraîné le déplacement des corps minéralisés et donc que l'enveloppe primaire des amas synsédimentaires a été conservée. Pour justifier la précipitation des sulfures de cuivre dans les intersections de failles et dans les niveaux porteurs réducteurs, Leblanc et Billaud (1978) évoquent des fluides minéralisateurs associés à des failles synsédimentaires dans un contexte de horst et de grabben. Deux niveaux porteurs distincts ont pu être mis en évidence, la zone nord qui contient des dépôts de pyrite stratiformes d'origine biogénique (Leblanc and Arnold, 1994) et la zone sud composée de pélites et de séries schisto-gréseuses. Mouttaqi and Sagon (1999) proposent un modèle de genèse de type SEDEX avec mise en place dans un contexte extensif antérieur à l'orogénèse panafricaine. Enfin, Maacha (2013) suggère dans son modèle, (1) un événement exhalatif syn-sédimentaire stratiforme à sulfures de fer, magnétite, chloritites et jaspes, (2) un événement postérieur minéralisateur en cuivre contemporain d'une ph'se cassante tardi-panafricaine et un lien potentiel avec le volcanisme du Jbel Boho.

1.5.1.2. Les structures filoniennes : exemple du gisement de Bou Skour (Anti-Atlas Oriental)

La mine de cuivre de Bou Skour se situe au centre du massif précambrien du Jbel Saghro (**Fig. 17**). Les roches encaissant la minéralisation cuprifère sont des coulées andésitiques d'âge Cryogénien (850-630 Ma) appartenant au groupe du Saghro (Gasquet et al.

2005; El Azmi et al. 2014) ainsi que des dykes d'andésites porphyriques et des granites de la série du groupe de Ouarzazate. La minéralisation est présente sous forme de stockwork (**Fig. 18**) et de filons (Maacha et al., 2011c). Les zones de stockwork sont subhorizontales et se concentrent au niveau du contact entre les formations du socle Précambrien et de la base de la série de Ouarzazate (Maacha et al., 2011c). Les filons ont une direction NW-SE à NNW-SSE et sont sécants sur les lithologies du socle Précambrien et sur la base du groupe de Ouarzazate. Ils se composent d'une gangue à texture rubanée principalement composée de quartz et carbonates associée à des sulfures de cuivre (**Fig. 18**) (Clavel and Tixeront, 1971; El Azmi et al., 2014). Plusieurs altérations sont associées à ce type de minéralisation ; chloritisation (Maacha et al., 2001), potassique, phylitique, siliceuse, argilique et propylitique selon El Azmi et al. (2014). D'après Maacha et al. (2011b) la minéralisation sous forme de stockwork correspond à une minéralisation précoce antérieure aux dykes rhyolitiques datés à 564 ± 7 Ma (Walsh et al., 2008) qui la recourent. En revanche, la minéralisation filonienne est associée à un épisode de déformation cassante à l'origine de la réactivation de structures panafricaines ductiles, et de la remobilisation de la minéralisation précoce (Maacha et al., 2011). Plus récemment, El Azmi et al., (2014) ont proposé un modèle de mise en place pour ces minéralisations de type porphyrique, remobilisées à l'Hercynien.

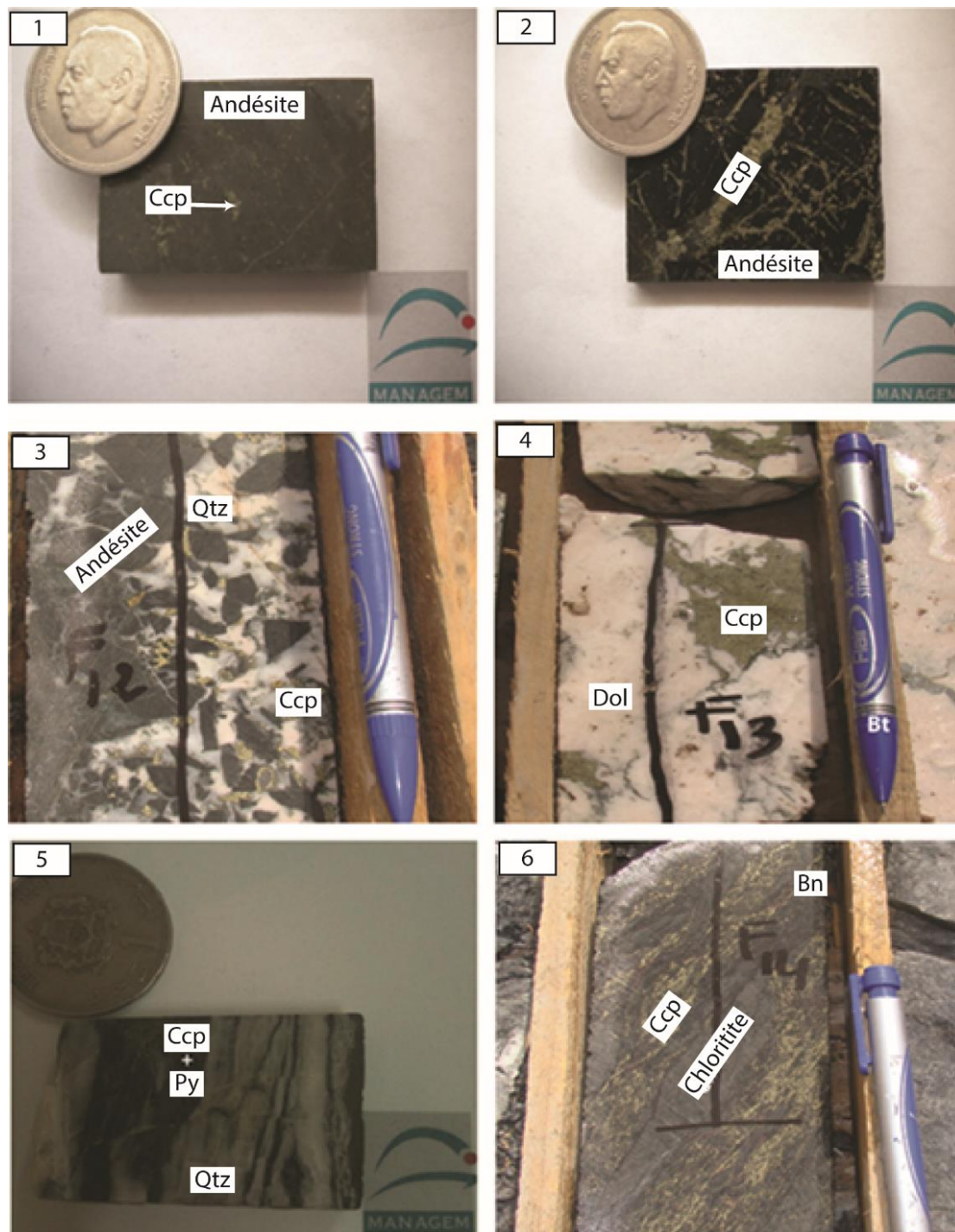


Figure 18 : Photographies des différentes textures de la minéralisation cuprifère de Bou Skour (El Azmi et al., 2014) : 1, minéralisation disséminée dans une andésite ; 2 : minéralisation en stockwork dans une andésite ; 3, texture bréchique ; 4, Texture de la minéralisation massive ; 5 et 6, textures rubanées de la minéralisation. Abréviations : Bn, bornite ; Ccp, chalcopryite ; Dol, dolomite ; Py, Pyrite ; Qtz, quartz.

1.5.1.3. Le Groupe de Ouarzazate : cas du gisement d'Alous (Anti-Atlas Occidentale)

Le gisement d'Alous est encaissé dans des laves rhyolitiques et andésitiques, ainsi que dans des ignimbrites appartenant au groupe de Ouarzazate. La minéralisation est présente sous la forme de sulfures de cuivre disséminés et en stockwork (Leblanc, 1986; Maddi et al., 2011). Les sulfures sont associés à de la chlorite, de la séricite, de l'épidote et du quartz (**Fig. 19**). Cette minéralisation est localisée le long de failles avec une diminution centrifuge, par rapports à ces structures, des rapports Cu/Fe des sulfures de cuivre et Mg/Fe des chlorites (Leblanc, 1986). Le modèle proposé par (Leblanc, 1986) implique des circulations hydrothermales contemporaines du volcanisme ignimbritique de la série de Ouarzazate avec un lessivage du cuivre dans les formations basiques sous-jacentes, qui précipiterait par la suite le long des failles. Cette précipitation serait favorisée par le refroidissement des roches ignimbritiques (Leblanc, 1986; Maddi et al., 2011).

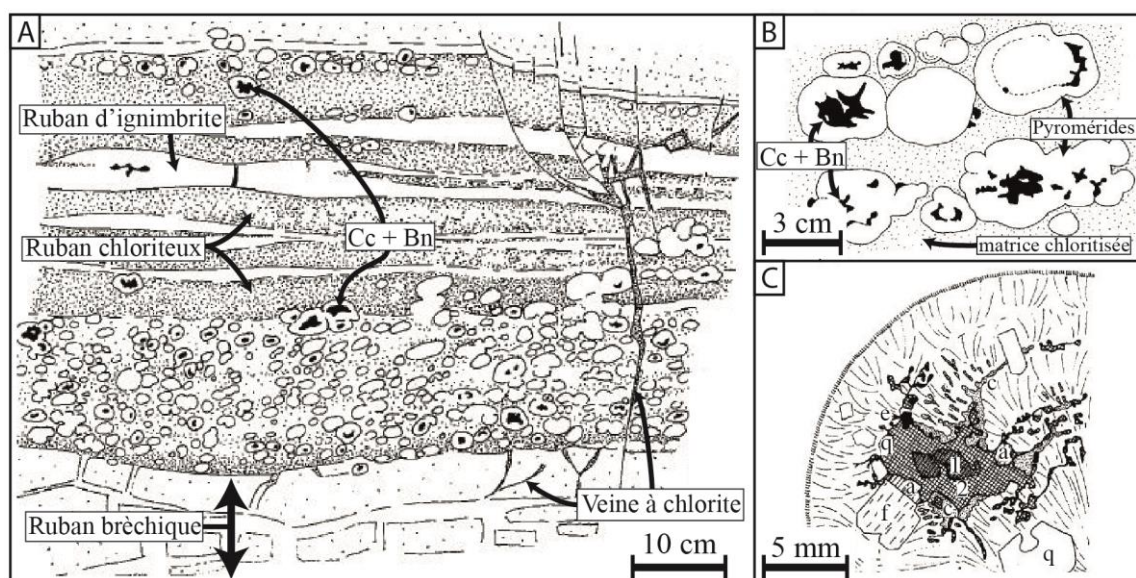


Figure 19 : Dessin de la minéralisation d'Alous (Leblanc, 1986) « A: Structure de l'ignimbrite rubanée avec des rubans à pyromérides de sulfures, des rubans chloriteux (gris) et des rubans d'ignimbrite non altérée (blanc), des rubans bréchiques et des brèches chloriteuses recoupant les rubanements; B: Disposition des sulfures dans les pyromérides: au cœur, en couronne interne, ou en bordure, la matrice des pyromérides est chloritisée (grisé). C: Détail des relations entre sulfure (1: bornite; 2: chalcocite), minéraux hydrothermaux associés (chlorite (c), albite (a), épidote (e), quartz (q)) et la structure de la pyroméride (structure de recristallisation fibroradiée de la matrice vitroclastique de l'ignimbrite) qui englobe des phénocristaux de feldspaths potassiques (f) et de quartz (q) » (d'après Leblanc, 1986).

Un modèle similaire a été proposé pour les occurrences cuprifères du groupe de Ouarzazate situées dans la boutonnière de Tanguerfa. En effet Chabane and Boyer (1979), décrivent des minéralisations localisées dans des faciès volcaniques et ils soulignent la

proximité spatiale entre ces minéralisations et les centres d'émissions des épanchements volcaniques. Ils associent les sulfures de cuivre à un hydrothermalisme lié à du volcanisme terminal du Groupe de Ouarzazate marqué par une altération chloriteuse et antérieure aux dépôts de la formation d'Adoudou. Par ailleurs, ils décrivent des galets de faciès volcaniques du groupe de Ouarzazate minéralisés en cuivre au sein du conglomérat de base de la formation d'Adoudou ce qui sous-entend une minéralisation antérieure à cette formation.

1.5.2. Les minéralisations de la couverture tardi-Néoprotérozoïque à Paléozoïque

1.5.2.1. La formation d'Adoudou et le cambrien

❖ UN LESSIVAGE DES MINÉRALISATIONS PRECAMBRIENNES DU SOCLE LORS DE LA TRANSGRESSION MARINE CAMBRIENNE

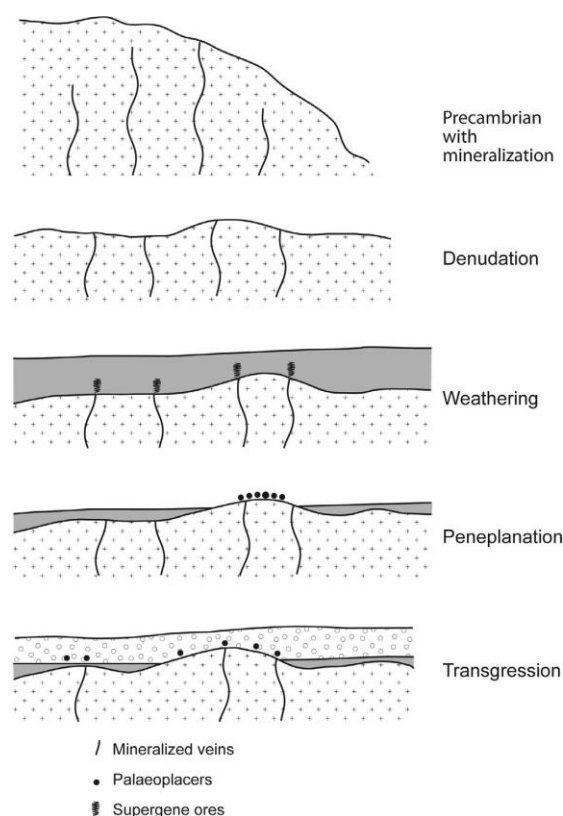


Figure 20: Schéma d'évolution de la surface sub-Cambrienne avec l'exposition de minéralisations Précambriennes du socle, lessivage de minéralisations supergènes et formation de paléoplacer au niveau de la transgression Cambrienne (Parnell et al., 2014).

Comme cela a été évoqué dans la section 1.3.3.2, la transition Neoprotérozoïque à Cambrienne est la marque d'un changement dramatique dans l'histoire de la Terre. Cette période est associée à une extinction de masse des organismes vivants et par la suite d'une

diversification extraordinaire de ces organismes qui signe également un changement majeur de la chimie des océans (Parnell et al., 2014). Ces modifications se traduisent, durant cette période, par un enrichissement en métaux des eaux océaniques mais également par un changement du monde du vivant (Amthor et al., 2003; Schroder and Grotzinger, 2007; Lehmann et al., 2007; Wille et al., 2008; Maloof et al., 2010; Peters and Gaines, 2012). Parnell et al. (2014) évoquent, pour expliquer cet enrichissement en métaux de l'océan à cette époque, une érosion de minéralisations du socle Précambrien qui se traduirait par la formation de paléo-placer sur la surface infracambriennes (**Fig. 20**), modèle qu'ils proposent pour une partie des minéralisations de l'Anti-Atlas.

❖ UN SYSTEME KARSTIQUE EPIGENETIQUE : EXEMPLE D'AMADOUZ (ANTI-ATLAS OCCIDENTALE)

La minéralisation d'Amadou est située dans la boutonnière de Tanguerfa. De nombreuses minéralisations similaires dans cette boutonnière sont présentes au sein de la formation d'Adoudou. Anthonioz et al. (1979) décrivent une minéralisation localisée dans des conglomérats verdâtres situés à la base de la formation d'Adoudou. Le cuivre s'exprime sous la forme de chalcopryrite et bornite dans une enveloppe stratiforme correspondant aux limites stratigraphiques inférieure et supérieure des couches de conglomérats. Cette minéralisation est présente sous la forme de petites géodes, fissures et veines ainsi qu'en remplacement des galets. Anthonioz et al. (1979) proposent un modèle comportant une première phase de dissolution karstique des éléments carbonatés composant le conglomérat de base de la formation d'Adoudou, puis, dans un second temps, l'établissement de conditions réductrices qui faciliteraient la précipitation du cuivre au sein des cavités karstiques. D'après leur modèle, cette précipitation s'accompagne d'une réduction des oxydes de fer présents dans le conglomérat, réduction qui serait à l'origine de sa couleur verte de la roche. Concernant l'origine du cuivre, ces auteurs signalent que le conglomérat de base de la formation d'Adoudou ne comporte aucune trace de cuivre primaire et ils suggèrent que le cuivre est issu d'un lessivage des indices présents plus haut dans la série, notamment des minéralisations dites stratabound localisées dans le niveau des « petits calcaires » de la formation d'Adoudou (Anthonioz et al., 1979). Álvaro (2013) décrit un modèle similaire pour justifier les minéralisations localisées sur les bordures Sud de la boutonnière de Ououafengha et Nord d'Igherm. Effectivement, le développement de karst le long de failles synsédimentaires, synchrones de l'emplacement des dykes clastiques, le tout associé à un hydrothermalisme

polymétallique pourrait expliquer la présence de cette minéralisation à la base de la formation d'Adoudou. Cet événement hydrothermal se traduit par la précipitation dans ce karst de calcite, de phosphates et d'oxydes riches en cuivre, fer, plomb et zinc (**Fig. 21**). Ces auteurs décrivent également des veines et des disséminations de sulfures à métaux de base, essentiellement chalcocite, covellite et plus ou moins sphalérite, galène, chalcopryrite, pyrite et marcasite, associés à une gangue composée de dolomite, d'ankérite, de quartz, de calcite, d'hydroxydes et d'oxydes de fer. Au sein de ces veines, des textures de « crackled breccia », brèches en mosaïque et brèches chaotiques sont observées. Cet hydrothermalisme et donc ces minéralisations seraient spatialement corrélés à la topographie du socle précambrien et l'activité tectonique lors de l'ouverture du bassin (Álvaro, 2013).

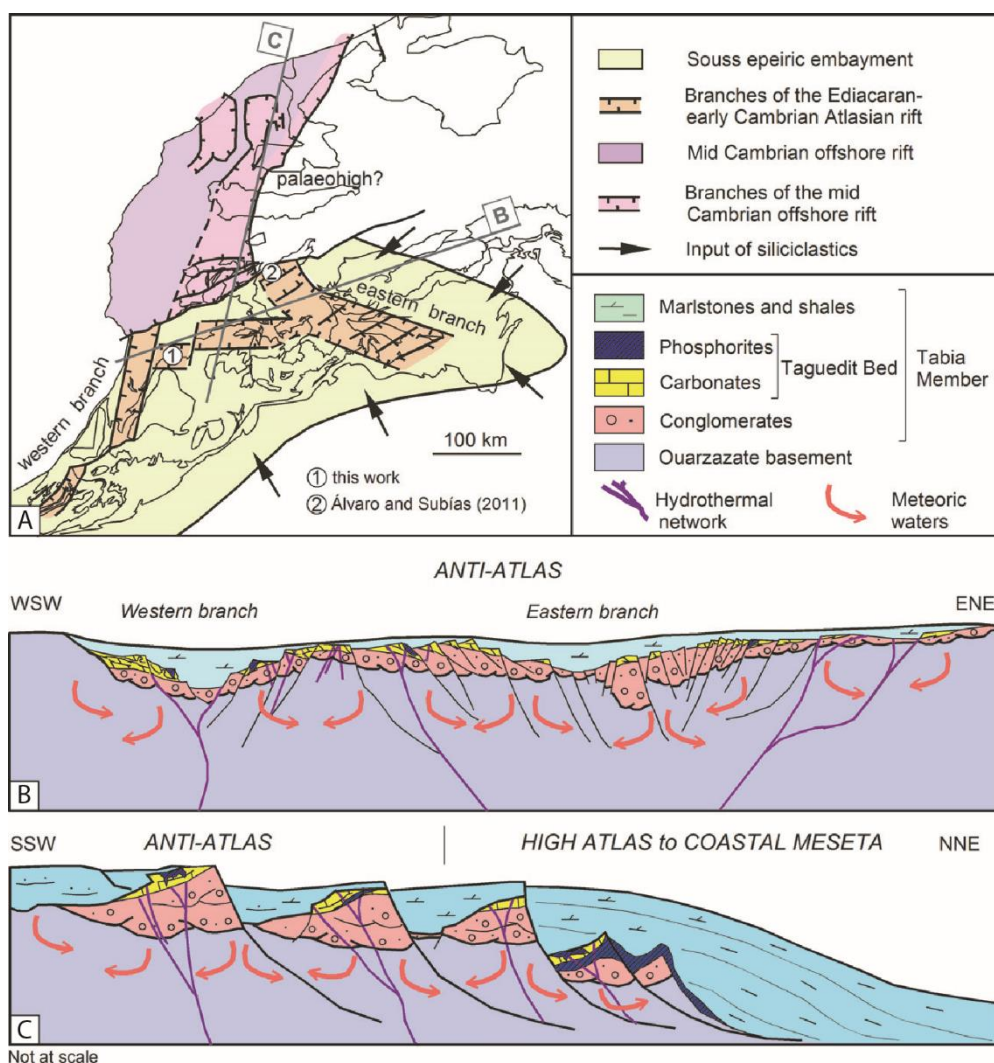


Figure 21 : A : Tentative de reconstruction des branches du rift marocain tardi ediacrien-début cambrien, basée sur les isopaques et les centres volcaniques actifs, le diachronisme du rifting n'est pas représenté (Javier Álvaro, 2013). B et C : coupes schématiques, transverses et longitudinales, du rifting tardi ediacrien montrant le paléo-relief précédent le dépôt des dolomies de Tamjout (Javier Álvaro, 2013).

❖ UNE MINÉRALISATION STRATIFORME SYN-SEDIMENTAIRE : EXEMPLES DU NIVEAU DE TALAT N'OUAMANE (MINE D'AGOUJGAL, ANTI-ATLAS OCCIDENTALE)

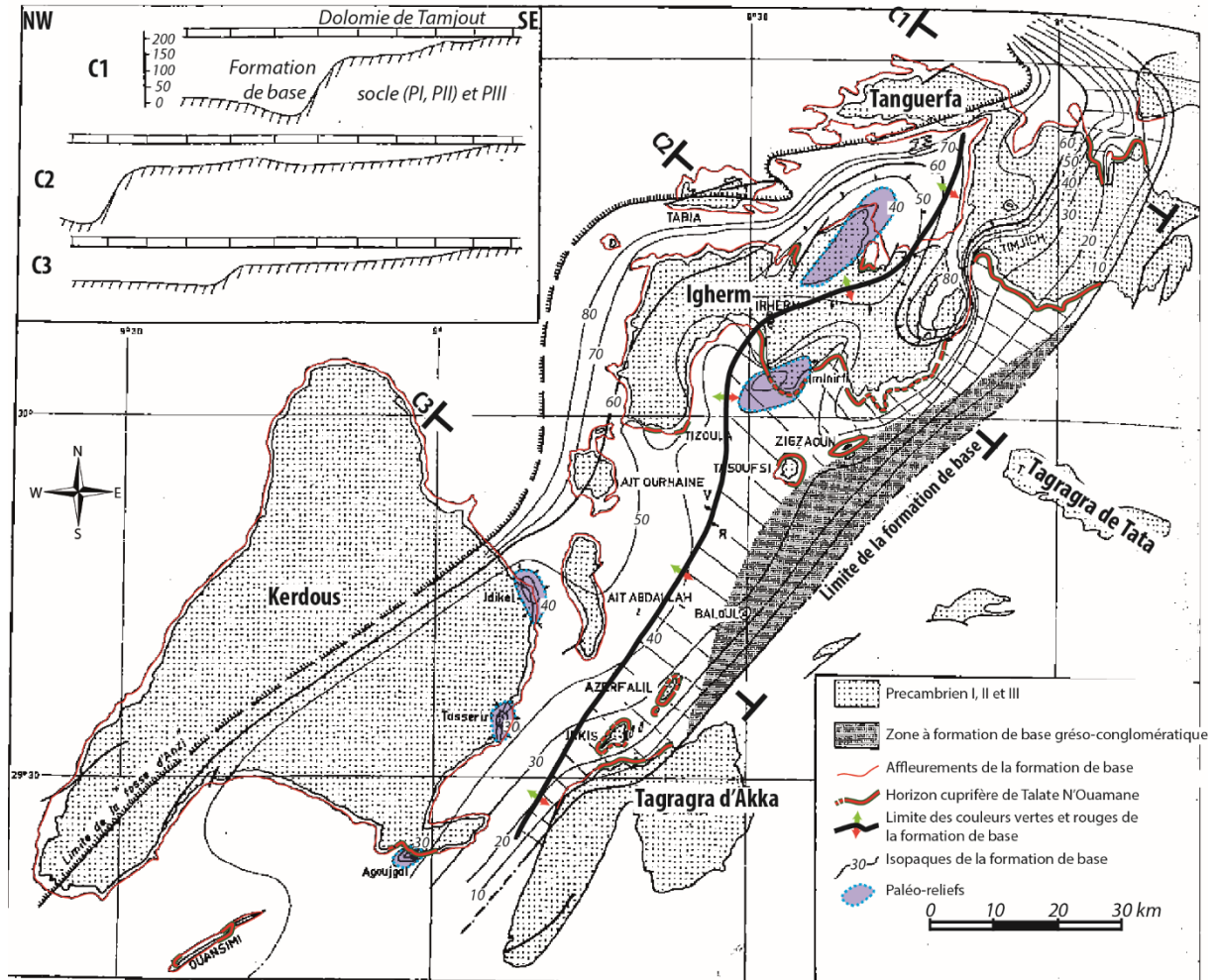


Figure 22 : Carte de l'Anti-Atlas occidentale montrant la localisation du niveau porteur de minéralisations cuprifères de Talat N'Ouamane et les isopaques de la formation de base (Pouit, 1966).

L'horizon minéralisé de Talat N'Ouamane est localisé dans la formation d'Adoudou (**Fig. 22**), entre le toit du conglomérat de base et les dolomies de Tamjout. Il se compose de siltites verdâtres de puissance métrique avec parfois des intercalations de bancs dolomitiques. Les zones minéralisées sont localisées au toit des siltites verdâtres et se continuent parfois dans les dolomies de Tamjout. Les contacts entre les siltites verdâtres et les bancs dolomitiques intercalés sont également parfois minéralisés (Pouit, 1966). La présence de minéralisations est indépendante de la nature lithologique du socle Précambrien ou de la formation de Ouarzazate, celle-ci étant parfois absente en-dessous (Pouit, 1966). En revanche, cet auteur signale que le cuivre est présent à l'échelle régionale uniquement dans un ensemble

lithologique particulier de la partie basale de la formation d'Adoudou : (i) à la base, des niveaux détritiques grossiers à ciment dolomitique passant au sommet à des siltites, (ii) de minces niveaux dolomitiques, correspondant aux « petits calcaires », (iii) des siltites et des grès constituant la majeure partie du niveau minéralisé et se terminant par un horizon de siltites verdâtres (Pouit, 1966). D'après Pouit (1966), la minéralisation est présente uniquement dans la formation de base lorsque sa puissance atteint entre 10 et 60 mètres. Les paléoreliefs du socle sous-jacent seraient à l'origine de ces variations d'épaisseur. D'après ses observations, il semblerait que le niveau de Talat N'Ouamane soit minéralisé uniquement dans les zones où la formation de base sous-jacente possède une couleur rouge (Pouit, 1966). Quand cette même formation est verte, la minéralisation est absente. Pouit (1966) émet l'hypothèse que cette variation de couleur serait liée également à la proximité de paléoreliefs. La minéralisation au sein du niveau de Talat N'Ouamane est présente sous la forme : (i) de grains dont la dimension est proche de celle des grains de la roche encaissante, (ii) de rubans minces et lenticulaires intercalés entre les fabriques sédimentaires et (iii) de veines sécantes sur les structures sédimentaires (**Fig. 23**). La proximité entre les zones minéralisées stratiformes marquées par le niveau de Talat N'Ouamane et des paléoreliefs, dans l'Anti-Atlas occidental, ainsi que les textures disséminées et laminaires dans la stratification, amènent plusieurs auteurs (Pouit, 1966; Skacel, 1993; Benssaou and Hamoumi, 1999c) à proposer un modèle syngénétique. Celui-ci serait contrôlé par des changements de conditions réductrices-oxydantes dans les zones proximales des paléoreliefs (**Fig. 24**). Un phénomène Varisque a été évoqué par ces auteurs pour expliquer les textures minéralisées clairement postérieures aux structures sédimentaires. Il est important de noter que dans l'Anti-Atlas occidental, le cuivre est la substance majeure exprimée mais il existe également : (i) de l'argent associé spatialement au cuivre, à l'échelle de l'Anti-Atlas; (ii) du plomb sous forme de galène, cérusite et localement bournonite et vanadate de plomb, notamment dans la dolomie de Tamjout ; (iii) du zinc toujours en association avec la galène, sous forme essentiellement de sphalérite mais également de smithsonite et d'hydrozincite, ; (iv) très localement du nickel sous la forme de pentlandite (Benssaou and Hamoumi, 1999c).

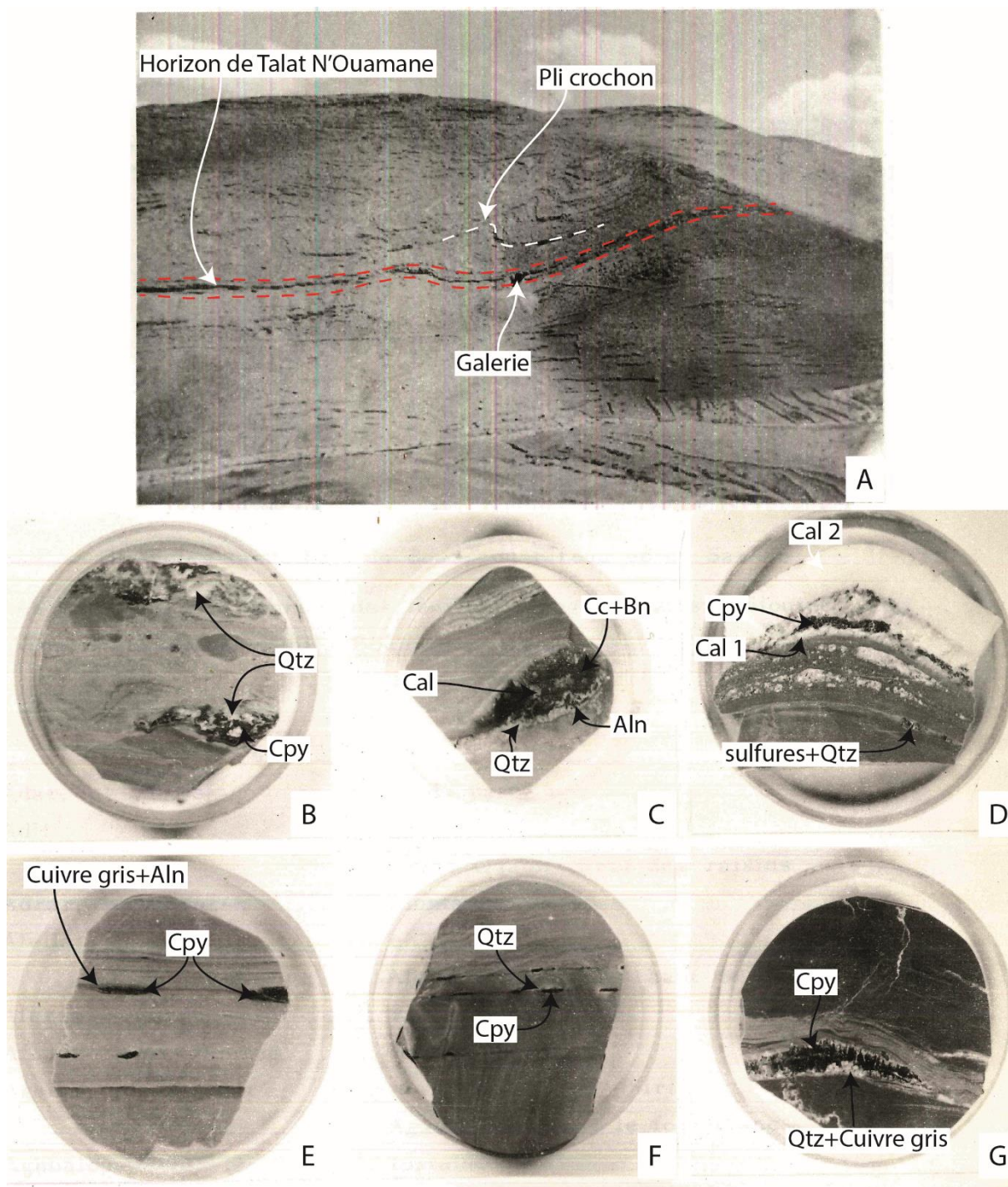


Figure 23 : Planches Photographiques en noir et blanc (d'après **Elsass, 1975**). A : Vue générale de l'horizon de Talat N'Ouamane au sein de la formation d'Adoudou. B : section polie montrant le contournement de banc ravinant du sédiment à lamination (Talat N'Ouamane). C : section polie montrant une lentille centimétrique de chalcocite et bornite, Horizon d'Iminirfi (Talat N'Ouamane) D : section polie montrant un filonnet minéralisé. A partir de l'éponte, calcite schistosée (Cal 1), à minéralisation de chalcopyrite puis deuxième génération de calcite fibreuse (Cal 2). Dans le sédiment, recristallisation de sulfures disséminés suivant la schistosité (Talat N'Ouamane). E : section polie montrant des micro-lentilles de chalcopyrite, frangées de cuivre gris et d'allanite, dans une argilite (Talat N'Ouamane). F : section polie montrant des micro-lentilles de chalcopyrite, frangées de cuivres gris et d'allanite, dans une argilite (indice d'Adar-Tafrent). G : section polie montrant une micro-lentille de chalcopyrite, frangée de cuivre gris et de quartz, dans une dolomie noire (Tazlaft).

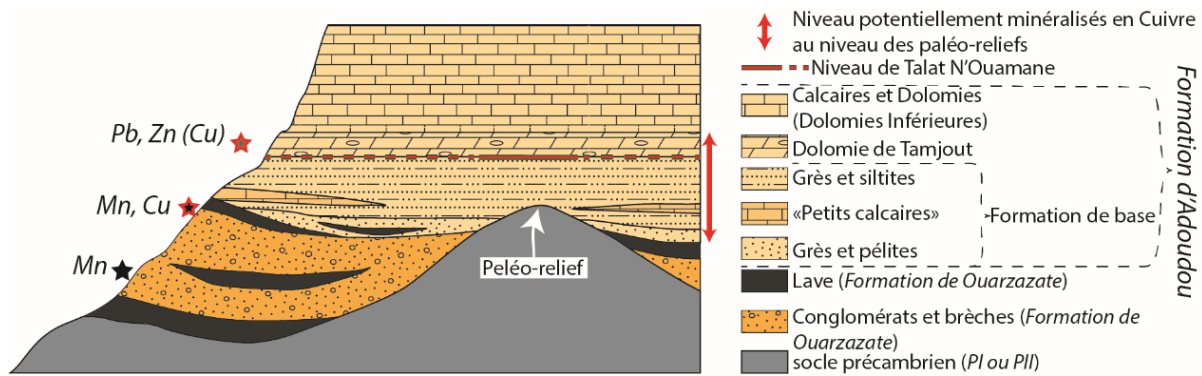


Figure 24 : Schéma montrant l'association spatiale entre les minéralisations cuprifères de l'Anti-Atlas occidental et les paléo-reliefs (Pouit, 1966).

❖ UNE REMOBILISATION VARISQUE DES MINÉRALISATIONS SYN-SEDIMENTAIRES : EXEMPLE DU GISEMENT DE JBEL N'ZOURK (ANTI-ATLAS CENTRAL)

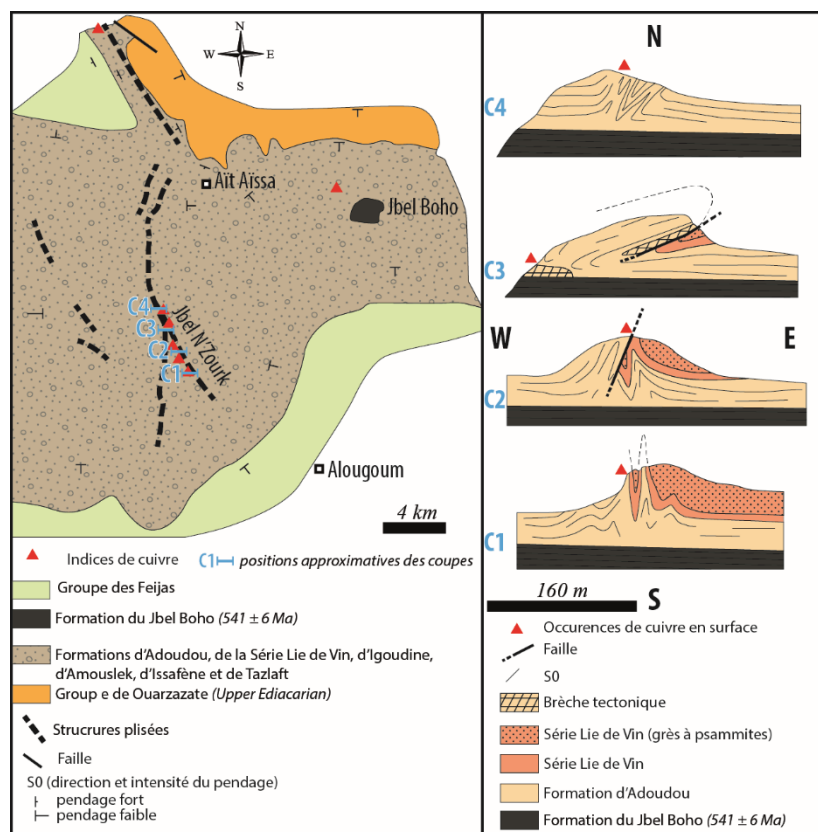


Figure 25 : Carte et coupes schématiques de la zone minéralisée du gisement de Jbel N'Zourk, les coupes C1, C2, C3 et C4 ont été respectivement effectuées du sud vers le nord le long de la zone plissée de Jbel N'Zourk (modifiées d'après Clavel and Leblanc, 1971).

De nombreux auteurs évoquent une remobilisation Varisque d'une minéralisation primaire syngénétique au sein de la formation d'Adoudou pour expliquer les textures en

stockwork recoupant les structures sédimentaires (Pouit, 1966 ; Skacel, 1993 ; Benssaou et Hamoumi, 1999). Le gisement de Jbel N'Zourk, situé dans l'Anti-Atlas central à l'extrême SW de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (**Fig.19**), est localisé dans une alternance de dolomie et de siltites appartenant à la formation d'Adoudou. Les zones minéralisées sont présentes le long de zones plissées et faillées de direction nord-sud (Clavel et Leblanc, 1971) (**Fig. 25**). Ces zones plissées correspondraient à des zones de moindres résistances au sein de la formation d'Adoudou d'origine diagénétique. D'après Clavel et Leblanc (1971), de nombreux slumps ainsi que des brèches intraformationnelles sont présentes en abondance au niveau des zones plissées et moins fréquentes loin des zones non déformées. Le cuivre s'exprime sous la forme de chalcocite, bornite, chalcopyrite, covellite et malachite accompagnés de pyrite et d'un ciment de dolomite (Clavel et Leblanc, 1971). La minéralisation cuprifère est présente uniquement au sein des zones plissées avec des teneurs respectives en périphérie et au centre de 0,2 % et de 5 à 6 % (Clavel et Leblanc, 1971). Ces auteurs interprètent leurs observations comme résultantes d'une minéralisation primaire syngénétique, remobilisée lors d'une phase de plissement. La minéralisation primaire, selon un modèle proche de celui invoquant un contrôle par les paléoreliefs (Pouit, 1966 ; Skacel, 1993 ; Benssaou et Hamoumi, 1999), serait contrôlée par des paléo-élévations marquées, dans ce cas, par des zones d'instabilité sédimentaire soulignées par des slumps et des brèches intraformationnelles. Ces zones semblent être riches en pyrite, accidents siliceux et fines mouches de sulfures de cuivre, dans les niveaux détritiques. Cet enrichissement "primaire" serait associé à des processus syngénétiques (Clavel et Leblanc, 1971). Lors de la compression Varisque, ces anciennes zones d'instabilités sédimentaires seraient plissées, plissement qui remobiliserait le cuivre syngénétique au sein des charnières de plis et des brèches tectoniques (**Fig. 25**) (Clavel and Leblanc, 1971; Maacha et al., 2011b). Bouchta (1977) évoque le même type de modèle pour la formation du gisement de Jbel Laassel (Anti-Atlas Central) au sein des formations d'Amouslek, d'Issafène et d'Igoudine avec une importance prépondérante de la remobilisation tectonique.

❖ UNE MINÉRALISATION FILONNIENNE : CAS DU GISEMENT DE OUANSIMI (ANTI-ATLAS OCCIDENTALE)

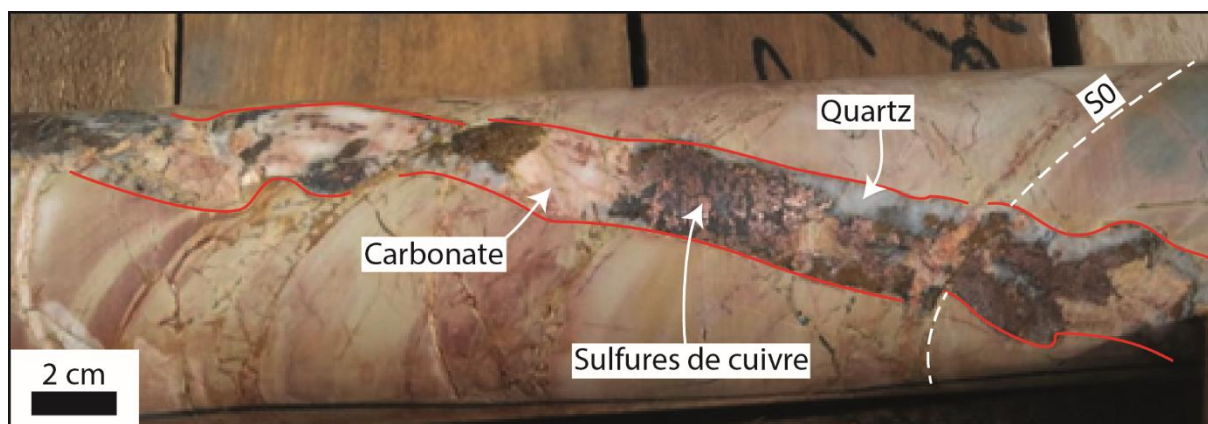


Figure 26 : Photographie d'un échantillon provenant d'un sondage carotté réalisé dans le gisement de Ouansimi (H. Baoutoul, 2014).

Le gisement de Ouansimi est localisé au sud de la boutonnière de Kerdous dans l'Anti-Atlas occidental au sein de la formation d'Adoudou. Au sein de celle-ci, la minéralisation est présente dans la série de base: formation des petits calcaires, dolomies de Tamjout et Dolomies Inférieures. La minéralisation est présente sous forme de filons de direction N155° avec des pendages compris entre 80 et 85° vers l'ouest (**Fig. 26**). La paragenèse de ces structures filoniennes révèle 3 phases de mise en place : (i) pyrite et quartz, (ii) chalcopryrite 1, cuivre gris, galène, sphalérite, calcite et barytine, (iii) chalcopryrite 2 et calcite (Baoutoul, 2013). Ces filons contiennent également de l'or en trace. Ces structures filoniennes sont décalées par des failles de direction N070° (Baoutoul, 2013). Au Sud de la zone filonienne, la formation de Ouarzazate chevauche la formation d'Adoudou. La direction de ce chevauchement est N70°. Baoutoul (2014) signale la présence de minéralisations stratiformes à pyrite, chalcopryrite et sphalérite litées encaissées dans des pyroclastites verdâtres du groupe des Feïjas internes (Cambrien moyen). Au sein de cette minéralisation stratiforme sont également présentes de nombreuses veines à calcite, quartz et chalcopryrite de direction N155° (Baoutoul, 2014).

1.5.2.2. L'Ordovicien : cas du gisement d'Oumjrane (Anti-Atlas Oriental)

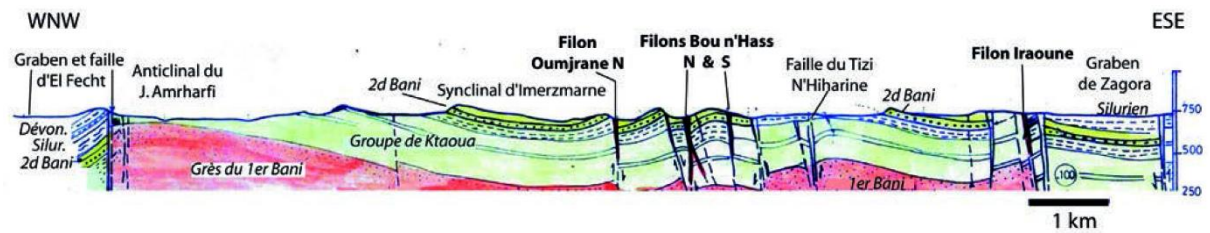


Figure 27: Coupe géologique du secteur minéralisé d'Oumjrane, d'après Popov & Belkasm (1983).

La mine d'Oumjrane est située dans l'Anti-Atlas Oriental. La minéralisation cuprifère est encaissée dans des barres gréseuses de l'Ordovicien supérieur sous forme de filons (**Fig. 27**). Ces formations ordoviciennes sont faillées et plissées (plis à grand rayon de courbure). Ces marqueurs de la déformation sont associés à l'épisode Varisque (Baïdier et al., 2008). Au niveau de la zone minéralisée il existe 3 familles de failles définies d'après leur direction : (i) les failles de direction E-W associées aux filons, (ii) les failles NE-SW décalant en senestre la première famille, (iii) les failles NW-SE recoupant les deux autres familles (Kharis et al., 2011). Les plis à grand rayon de courbure présentent une direction axiale E-W; des plis d'amplitude métrique de direction axiale NW-SE sont spatialement associés aux failles de même direction. Kharis et al. (2011) décrivent une mise en place polyphasée du filon minéralisé en cuivre : (i) une première phase à pyrite et ankérite avec de la chalcopryrite en trace, (ii) une seconde à chalcopryrite associée à une gangue de quartz qui représente l'essentielle de la minéralisation économique, (iii) une dernière phase à galène et barytine (**Fig. 28**). D'après Kharis et al. (2011), la mise en place de ces différents stades serait vraisemblablement postérieure à la déformation Varisque et ils proposent potentiellement un lien avec le magmatisme du CAMP qui affecte l'ensemble de l'Anti-Atlas.

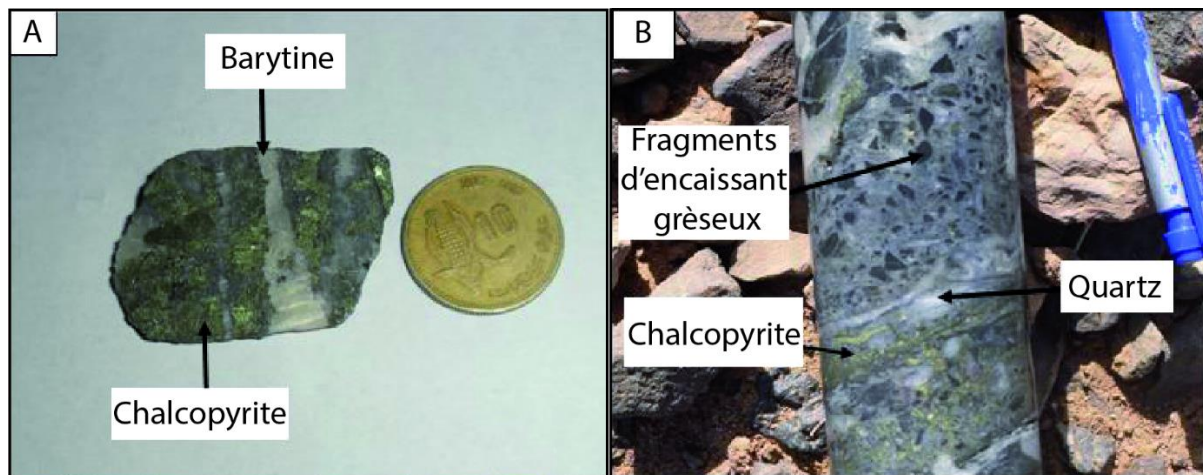


Figure 28 : Photographies macroscopiques de la minéralisation cuprifère d'Oumjrane (Kharis et al., 2011): A, échantillon du filon montrant la phase à chalcopyrite 2 recoupée par celle à barytine ; B, brèche à fragments d'encaissant gréseux cimentés par de la chalcopyrite et du quartz.

Chapitre 2. La boutonnière de Bou Azzer- El Graara

Mise en contexte : Cette étude est focalisée sur la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (Anti-Atlas central). Ce chapitre a vocation à présenter le contexte géologique de la boutonnière, les différentes substances métalliques connues dans ce secteur, ainsi que la localisation des différents sites d'étude.

Chapitre 2. La boutonnière de Bou Azzer-El Graara

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA BOUTONNIERE

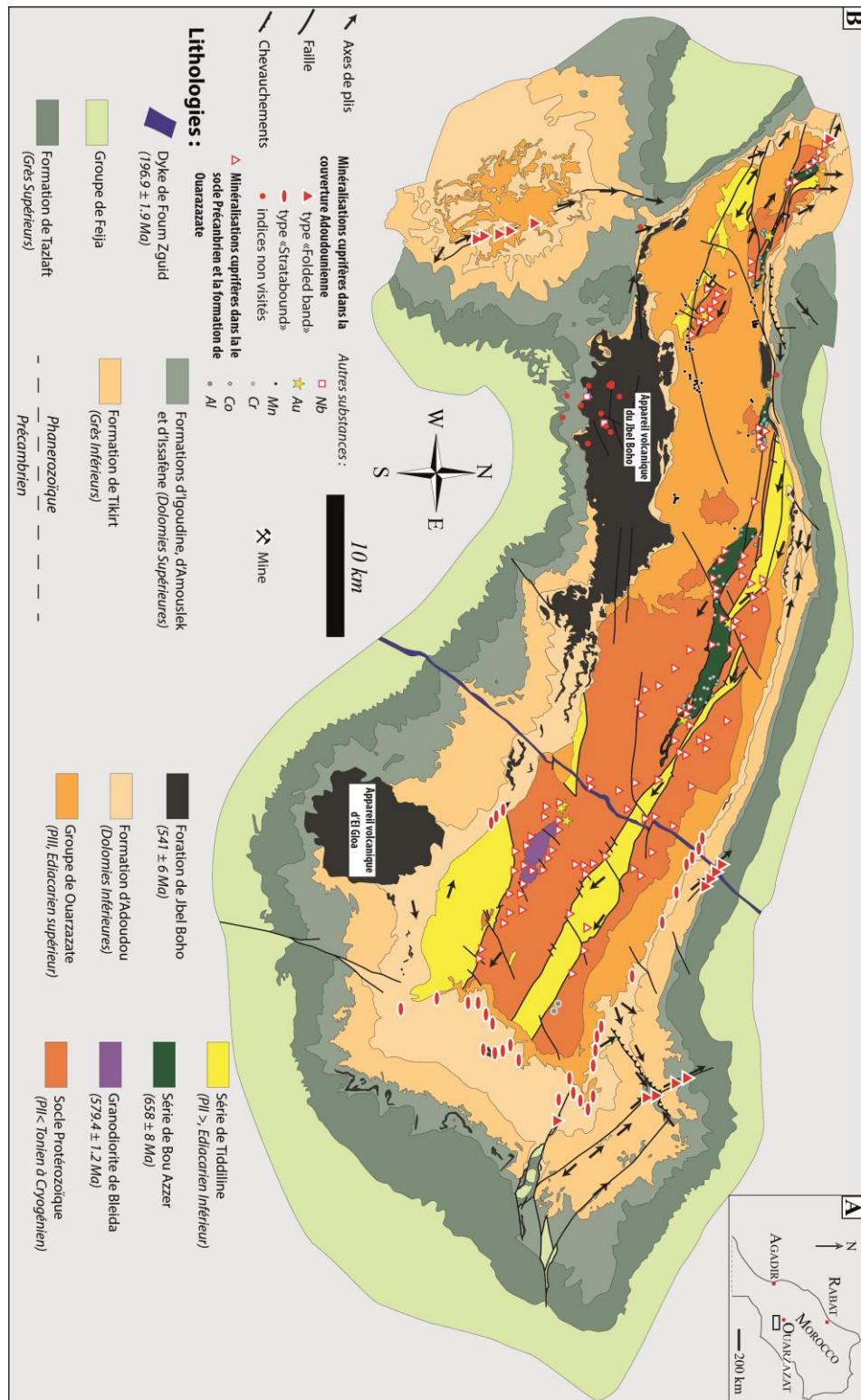


Figure 29 : A : localisation de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara au Maroc ; B : Carte géologique et métallogénique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara avec la localisation des principales mines (pour le socle Précambrien : modifié d'après Leblanc, 1975; Soulaïmani et al., 2013; pour la couverture infracambrienne à cambrienne : cette étude).

La boutonnière de Bou Azzer-El Graara est localisée dans l'Anti Atlas Central (**Fig. 29A**). Elle est orientée NW-SE et expose les formations Panafricaines situées le long de l'accident Majeur de l'Anti-Atlas (Choubert, 1963). Le socle protérozoïque est principalement composé d'une séquence ophiolitique démembrée ainsi que de fragments d'arc (Leblanc, 1976; Saquaque et al., 1989). Ces formations sont recouvertes en discordance par une épaisse couverture volcano-sédimentaire néoprotérozoïque à cambrienne (Soulaimani et al., 2014). Cette couverture peut être divisée en trois formations avec, de la base vers le sommet : (1) la formation de Tiddiline (750 à 650 Ma), attribuée au groupe du Saghro (Thomas et al., 2004), composée de séries clastiques et volcano-clastiques; (2) le groupe de Ouarzazate (610 à 550 Ma) composé de complexes volcano-sédimentaires déposés en discordance sur la formation de Tiddiline; (3) les formations tardi-néoproterozoïques à cambriennes composées de séries détritiques et carbonatées (Soulaimani et al., 2013). Ces formations tardi-néoproterozoïques à cambriennes s'expriment au niveau de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara par les groupes de Taroudant et de Tata. Le groupe de Taroudant est situé à la base, il est constitué, de la base au sommet, par: (i) la formation d'Adoudou (Boudda et al., 1979; Choubert, 1952), exposant à sa base une brèche sédimentaire d'une épaisseur variant de 5 à 100 mètres et par une alternance de bancs centimétriques à métriques de dolomies et de pélites rouges ou blanches d'une épaisseur variant de 150 à 250 mètres, (ii) la série Lie de Vin, ou son équivalent latéral les grès de Tikirt d'une épaisseur de 250 à 300 mètres, déposés en conformité sur la formation d'Adoudou, elle se compose essentiellement de pélites rouges pour la série Lie de Vin et de bancs de grès fréquemment séparés par des niveaux centimétriques de pélites violacées ainsi qu'un niveau terminal continu de pélites rouges pour les grès de Tikirt (8 à 15 mètres d'épaisseur) (Soulaimani et al., 2013). Le groupe de Tata se compose de la base au sommet de (**Fig. 30**) : (i) la formation d'Igoudine à dominance de bancs dolomitiques comportant des intercalations de siltites vertes, (ii) la formation d'Amouslek est composée de bancs de dolomies et de siltites vertes ou violacées, (iii) la formation d'Issafène est composée d'une alternance à dominance de pélites violacées et de siltites verdâtres, (iv) la formation de Tazlaft, d'une épaisseur de 90 à 100 mètres, est composée de grès à stratification obliques croisées et de méga ripples marks (Soulaimani et al., 2013). Durant la fin de l'évènement compressif tardi paléozoïque, les structures héritées de l'orogène Panafricaine du socle sont réactivées le long de la boutonnière. Il en résulte au sein de la couverture tardi-néoprotérozoïque à cambrienne des plis métriques à décamétriques coiffés distribués sur les pourtours de la boutonnière ainsi que de larges structures anticlinales et synclinales pluri-

métriques à pluri-décamétriques (Soulaïmani and Burkhard, 2008). Ces structures ont une direction principale d'axe de plissement orientée NW-SE associée à une direction subordonnée NE-SW (Soulaïmani and Burkhard, 2008).

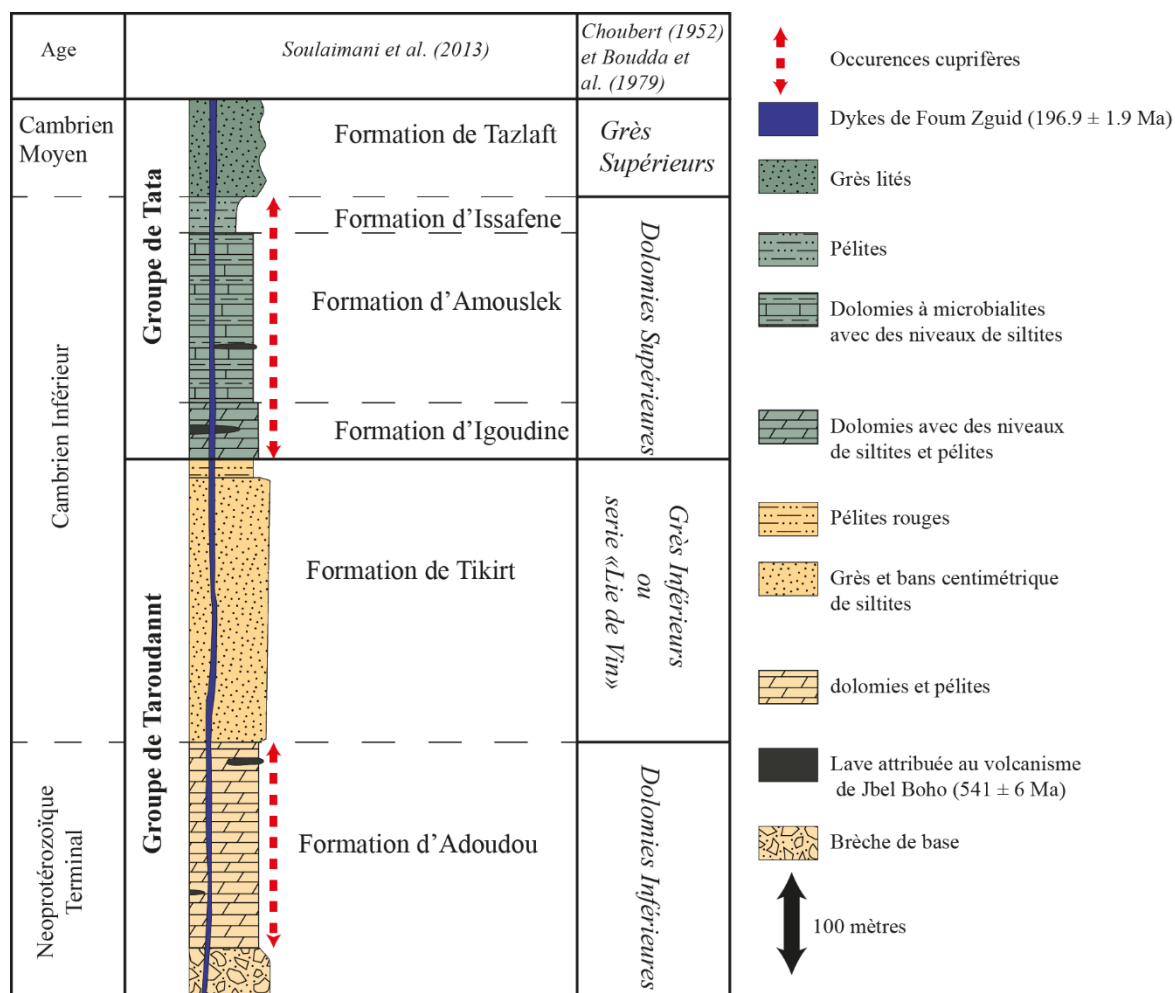


Figure 30 : Log synthétique de la couverture néoprotérozoïque à cambrienne de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (Choubert, 1952; Boudda et al., 1979; Soulaïmani et al., 2013).

2.2. LES SUBSTANCES METALLIQUES

La boutonnière de Bou Azzer-El Graara possède une histoire minière riche notamment liée à la diversité des métaux qu'elle recèle (**Fig. 29B**).

Le cobalt : la mine de Bou Azzer est en exploitation depuis 1932 (MAACHA et al., 2011a). Ces minéralisations sont associées au complexe ophiolitique et se retrouvent jusqu'à la mine d'Aït Ahmane. Le cobalt est présent au sein d'amas et de filons au contact entre des serpentinites et des diorites quartziques (Leblanc, 1975; Ennaciri et al., 1995). L'arsenic et le nickel sont également valorisés au sein de ces minéralisations. La production en 2011 annuelle de la mine de Bou Azzer était de 2500 t métal de cobalt, 10 000 t d'arsenic, 300 t métal de nickel et 250 kg d'or (MAACHA et al., 2011a).

Le Cuivre : cet élément est présent dans toutes les unités géologiques de la boutonnière, du socle panafricain à la couverture tardi-néoproterozoïque à cambrienne. C'est au niveau du district de Bleida que les occurrences ont été le plus étudiées du fait de la teneur souvent élevée de ces minéralisations (9% Cu pour certains amas). Les traces d'exploitation des minéralisations cuprifères du district de Bleida montrent que celui-ci est actif depuis le moyen âge avec la présence de nombreuses scories, fours anciens et notamment les ruines d'un village minier au sommet du Guelb Tassawt situées à l'Est de l'actuelle mine de Bleida. Ce n'est qu'en 1962 que l'exploration moderne commence à s'intéresser à ce district via la société Sahro Mine et a permis la découverte des premiers amas. En 1967, une campagne de prospection géophysique est menée par la compagnie minière d'Aït Ahmane (CMA) et le groupe canadien LINSLEY. Entre 1968 et 1970, l'exploration est arrêtée. En 1971 les travaux de recherche reprennent via l'association du Bureau de Recherche et de Participation Minière (BRPM), l'Omnium Nord-Africain (ONA), la société SOMIFER et la compagnie japonaise MITSUI. Un premier puit dans la zone Sud, puis un second dans la zone Nord sont réalisés et traversent des corps minéralisés. En 1973, l'exploration est à nouveau stoppée. Ensuite, la société minière Bou-Gaffer (SOMIFER) relance l'étude des minéralisations de Bleida en privilégiant les travaux de surfaces (cartographie, sondages carottés et percutants). De 1980 à 1997 le site est en exploitation et ferme en 1997. La « zone Sud » du gisement de Bleida a été estimée à 700 000 t de tout venant à 3% Cu et la « Zone Nord » à 1 800 000 t de tout venant à 9,34% Cu (Maacha et al., 2011). Depuis 2008 l'exploration a été relancée dans le district, notamment dans les formations carbonatées de la couverture néoproterozoïque à cambrienne. En 2013 le gisement de Jbel Laassel, situé dans cette couverture, est mis en exploitation et confirme le potentiel économique de ces minéralisations estimée à 7,5 millions de tonnes de

tout venant à 1% Cu (MAACHA et al., 2011b). L'exploration du gisement de Bleida continue encore aujourd'hui, notamment sur les parties supergènes des amas à sulfures. Ces mêmes amas qui ont été exploités en souterrain. L'exploration s'est orientée également vers les nombreuses autres occurrences cuprifères du socle Panafricain, de la formation de Tiddiline et de la couverture tardi-néoprotérozoïque à cambrienne. Des occurrences de cuivre ont été recensées par (Leblanc, 1975) au sein de l'appareil volcanique du Jbel Boho. Les seules descriptions de ces minéralisations sont présentes dans les archives de la compagnie Managem. Il s'agirait de filons à quartz, carbonates, oligiste et sulfures de cuivre (Baoutoul, n.d.). Au niveau du complexe ophiolitique des sulfures de cuivres sont associés aux minéralisations cobaltifères de Bou Azzer (Ennaciri, 1995).

L'or : l'or se trouve uniquement dans les formations du socle Panafricain (**Fig. 29**), en association avec plusieurs substances au sein de la boutonnière. Dans le complexe ophiolitique, il est associé au stade à arséniures et sulfoarséniures des minéralisations de cobalt de Bou Azzer (Ennaciri, 1995). Des occurrences d'or sont également présentes dans l'unité de Tachdamt-Bleida (**Fig. 29**). C'est dans cette unité géologique que se trouve le gisement de Far West, situé à une dizaine de kilomètres à l'ouest de la mine de Bleida, où l'or est exploité comme substance principale. Dans ce gisement, l'or se présente sous forme disséminée en association avec de l'hématite, ou dans des veines en association avec du quartz, des carbonates et des sulfures de cuivre ainsi que des platinoïdes (El Ghorfi et al., 2006, 2008; Bhilisse et al., 2014).

Le manganèse : il n'existe pas de description de ces minéralisations, mais Leblanc, (1975) a recensé de nombreuses occurrences de manganèse au sein de la formation de Ouarzazate sur l'ensemble de la boutonnière (**Fig. 29**).

Le chrome : cet élément est présent uniquement au sein du complexe ophiolitique (**Fig. 29**). Deux types de minéralisations sont distinguées au sein de la boutonnière: (i) un premier de type chromite podiforme, de petite taille, associée à des platinoïdes (El Ghorfi et al., 2006; Bhilisse et al., 2014), (ii) un second est situé dans la partie inférieure du complexe ophiolitique dans lequel le chrome est associé à des minéraux de nickel primaire, comme la pentlandite, et secondaire, comme la polydymite, l'orcelite, la millerite et la maucherite. Les minéralisations de type podiforme ont été exploitées entre 1990 et 1998 par la Compagnie de Tifnout Tiranimine (CTT). 100 000 tonnes de minerais ont été extraites durant cette période à une teneur souvent supérieure à 45% de chromite (Maacha et al., 2011a). Des travaux sont actuellement menés par la compagnie Managem pour valoriser le second type de minéralisations (L. Maacha et al., 2011a).

Le niobium : deux occurrences de niobium ont été reportées par Leblanc (1975) au niveau du cœur syénitique de l'appareil volcanique du Jbel Boho (**Fig. 29**) mais aucune description gîtologique n'a été trouvée dans la bibliographie.

L'argent : Ennaciri, (1995) et Essarraj et al. (2005a) ont décrit, au sein des filons à Co-As de la minéralisation de Bou Azzer, une zone enrichie en argent sous la forme d'un stockwork. Mise à part cette étude aucune publication n'évoque l'argent en tant que tel au sein de la boutonnière. Il est cependant présent dans de nombreux rapport interne de la compagnie Managem en association avec les minéralisations cuprifères. Au niveau du gisement de Jbel Laassel les travaux d'exploration font état d'une tranchée, avec des teneurs en argent de 17,62 g/T (sur 40 m) et de deux sondages percutant avec des teneurs en argent de 7,33 g/T (sur 15 m à partir de la surface) et 10,4 g/T (sur 15 m à partir de la surface) (Coeffic, 1985). Cet élément, certes peu contraint, est important pour valoriser l'exploitation actuelle et future des minéralisations cuprifères de la boutonnière.

2.2. LES SITES D'ETUDES DE LA COUVERTURE NEOPROTEROZOÏQUE A CAMBRIENNE

Les sites d'étude ont été choisis de façon à obtenir à la fois une vision locale de ces minéralisations, mais également une vision d'ensemble à l'échelle de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Trois sites sont localisés dans les formations d'Igoudine, d'Amouslek et d'Issafène : Jbel Laassel, Assif N'Zaïd et Amekssa (**Fig. 31**). Six sites sont localisés dans la formation d'Adoudou : Jbel N'Zourk, Oued R'Them, Oued N'Khal, Tizi'N Mekraz, Chaa'b Lhamrat et Bou Offroh (**Fig. 31**). Il est intéressant de noter que le travail de terrain a été effectué en parallèle de l'avancée des travaux d'exploration et de mise en exploitation de ces minéralisations ce qui a permis d'observer ces objets sous différents angles : en surface, en tranchées, en sondages (ROC, RC ou carottés) et en mine à ciel ouvert pour certains.

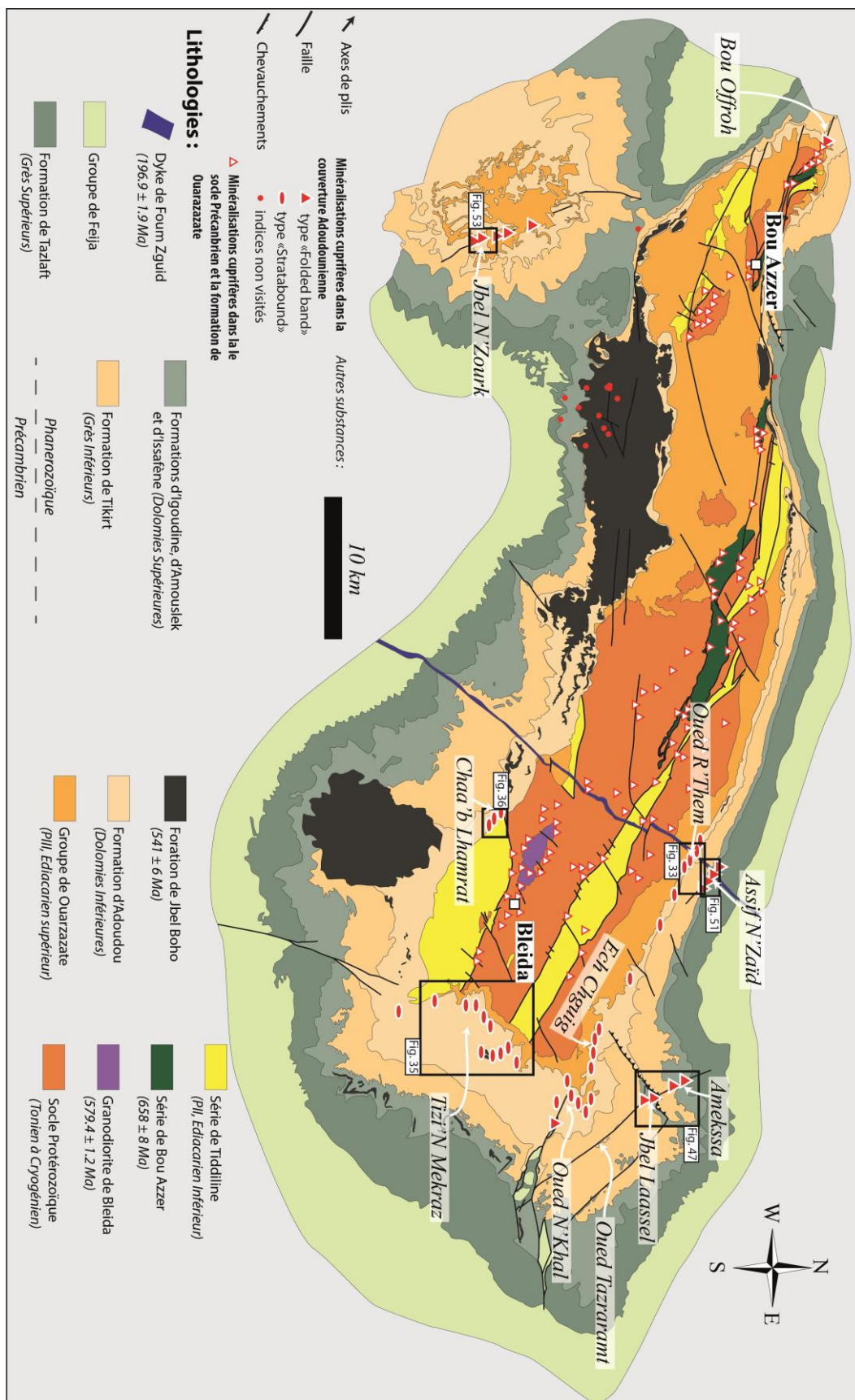


Figure 31 : Carte géologique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara avec la localisation des différents sites étudiés au sein de la couverture néoprotozoïque à cambrienne (pour le socle Précambrien : modifié d'après Leblanc, 1975; Soulaïmani et al., 2013; pour la couverture infracambrienne à cambrienne : cette étude).

Chapitre 3. Approche de terrain

Mise en contexte : il était nécessaire, étant donné le peu de données bibliographiques sur ces occurrences cuprifères, d'effectuer un travail de terrain approfondi afin de comprendre la nature lithologique des roches encaissantes, la morphologie des corps, les textures des minéralisations et le contexte structural dans lequel ces minéralisations se sont mises en place. Ce chapitre est divisé en deux parties, correspondant aux deux morphologies des corps minéralisés. Chacune de ces morphologies sera décrite à travers trois exemples d'occurrences réparties à travers la boutonnière.

Chapitre 3. Approche de terrain

3.1. LE TYPE « STRATABOUND »

3.1.1. Un niveau porteur de la minéralisation cuprifère à l'échelle régionale

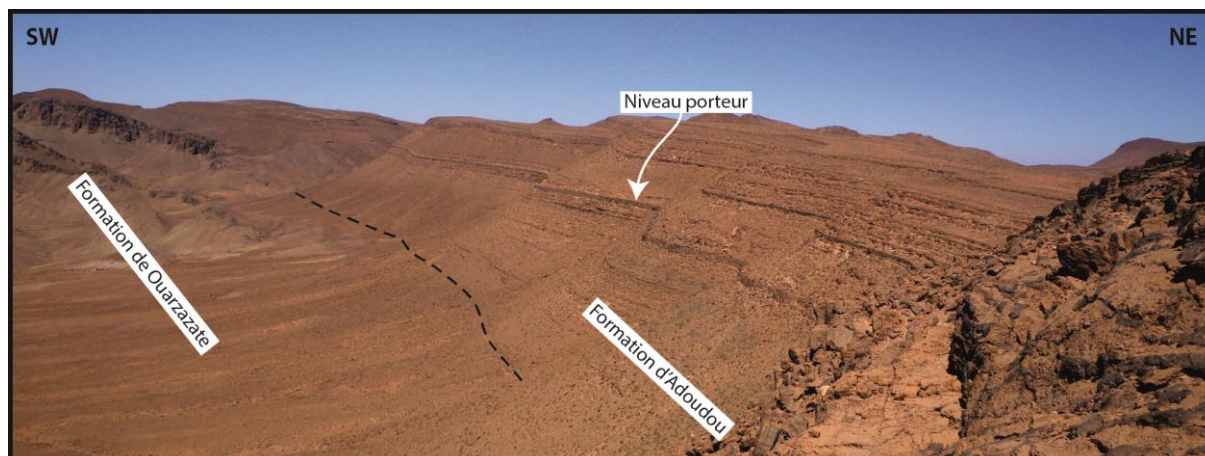


Figure 32 : Photographie des falaises Adoudouniennes de la localité de Ech Chguig (Nord Est de la mine de Bleida).

Les corps minéralisés de type « stratabound » sont encaissés dans un niveau stratigraphique particulier de la partie inférieure de la formation d'Adoudou. Ce niveau est très aisément repérable dans le paysage, il s'agit du premier banc noir tabulaire ressortant dans le relief, à la base de la formation d'Adoudou (**Fig. 32**). Dans les trois localités, Oued R'Them, Tizi N'Mekraz et Chaa'b Lhamrat, ce niveau porteur est composé systématiquement de la base au sommet par:

- une brèche de base, de 50 centimètres à plusieurs mètres de puissance, composée de fragments anguleux de dolomie et à ciment de pélites blanches (**Fig. 33A, B, D et G**) contenant parfois des mouches de malachite;
- un banc inférieur de dolomies noires massives à rognon siliceux, épais de 1 à 2 mètres (**Fig. 33A, B, C, E et F**),
- d'un banc intermédiaire de dolomie beige, de 10 à 40 centimètres de puissance, à texture soit micritique, soit bréchique (**Fig. 33A et F**),
- d'un banc supérieur de dolomies noires massives à rognon siliceux, épais de 1 à 2 mètres (**Fig. 33A et F**).

Ce niveau porteur possède une extension latérale régionale à l'échelle de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. En revanche, il n'est pas systématiquement minéralisé en cuivre. Les occurrences minéralisées en cuivre correspondant à ce niveau porteur sont exclusivement reconnues dans la partie Est de la boutonnière (**Fig. 29**).

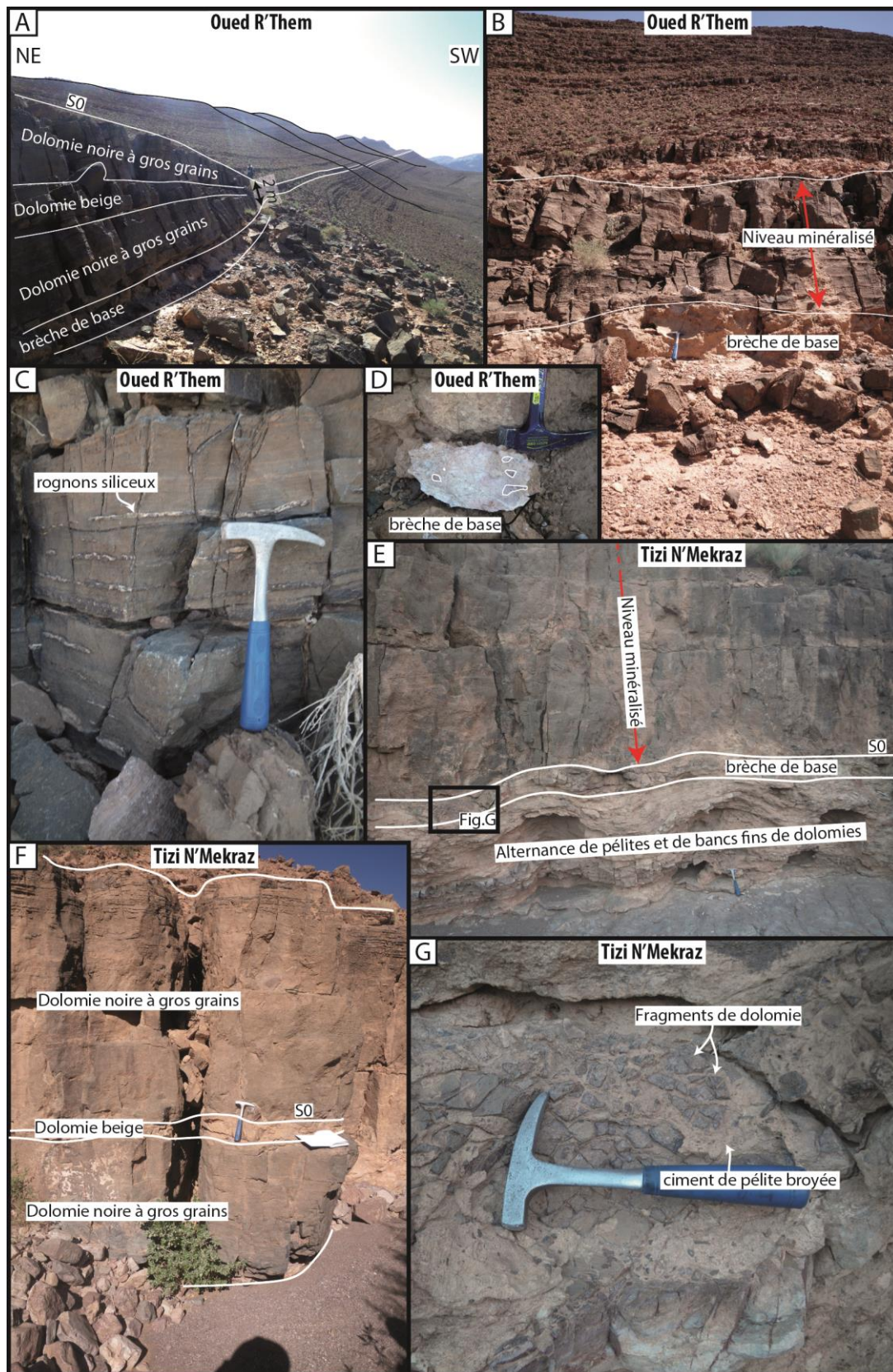


Figure 33 : Planche photographique du niveau porteur minéralisé en cuivre au sein de la formation d'Adoudou. A, niveau minéralisé de l'indice de Oued R'Them ; B, niveau bréchique de base du niveau porteur de l'indice de Oued R'Them ; C, rognon siliceux au sein des dolomies noires du niveau porteur ; D, zoom sur un échantillon du niveau bréchique de base de l'indice de Oued R'Them ; E, niveau bréchique de base du niveau porteur minéralisé de l'indice de Tizi N'Mekraz ; F,

3.1.2. Cartographie structurale et coupes à l'échelle de l'objet minéralisé

3.1.1.1. L'indice de Oued R'Them (l'oued à R'Them, une variété d'arbuste)

L'indice de Oued R'Them est localisé à une douzaine de kilomètres, au nord-est de la mine de Bleida, au niveau de l'intersection entre le dyke de Foug Zguid et la formation d'Adoudou (**Fig. 31 et 34**). Ce dyke décale la formation d'Adoudou et par conséquent le niveau porteur en jeu apparent dextre (**Fig. 34**). Dans la partie supérieure de la Formation d'Adoudou, un niveau continu épais de 10 à 20 mètres de couches montrant des slumps, a été observé sur plus de 10 kilomètres (**Fig. 35**). Le niveau porteur de l'indice de Oued R'Them affleure sur plus de 5 kilomètres. Il possède un pendage quasiment constant d'environ 30° vers le nord-est sur toute sa partie minéralisée (**Fig. 34**). Au nord-ouest de l'indice, on peut observer des plis décimétriques de direction N310° et un pli décamétrique à proximité du dyke de Foug Zguid (**Fig. 34**). Les failles qui affectent le niveau porteur minéralisé sont orientées dans la direction N050°. Des jeux apparents inverses et dextres ont été cartographiés (**Fig. 34**). Deux failles, affectant le niveau porteur minéralisé, de direction N50 et de jeux apparents inverses et dextres ont pu être cartographiées mais elles ont une extension limitée à quelques dizaines de mètres (**Fig. 34**).

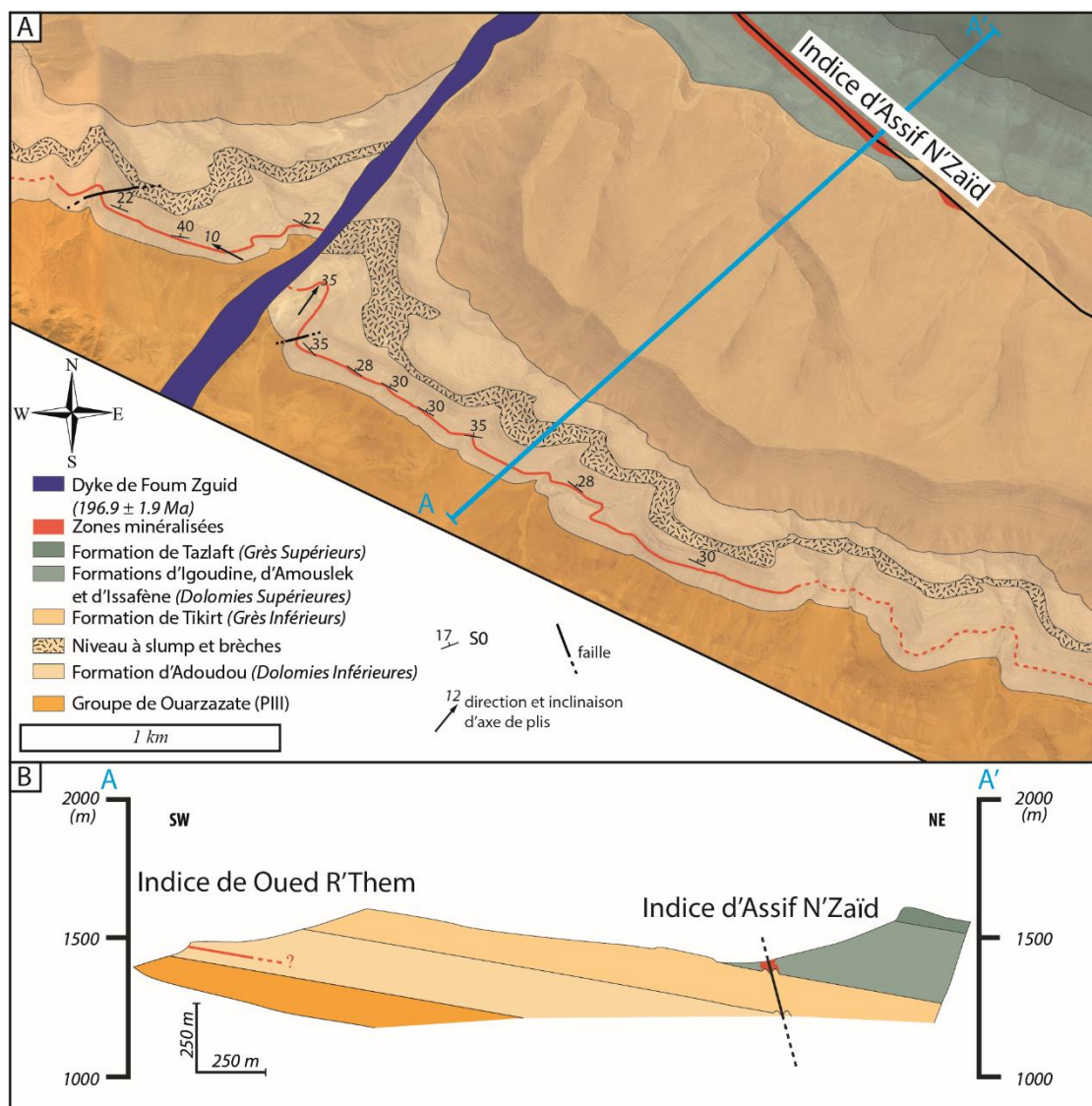


Figure 34 : A, Carte géologique de l'indice de Oued R'Them ; B, Coupe géologique passant par les indices de Oued R'Them et d'Assif N'Zaïd.

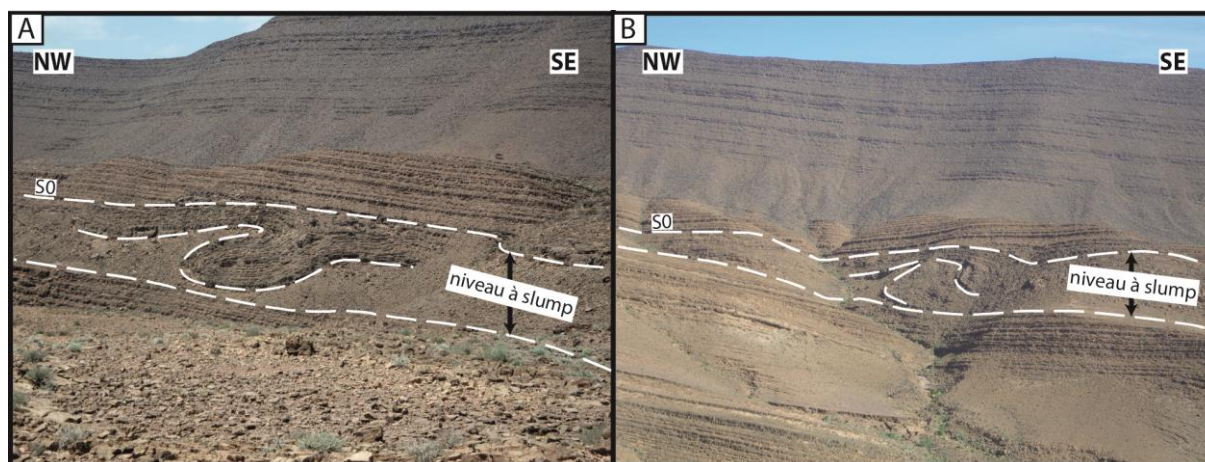


Figure 35 : Photographies du niveau régional à slump au sein de la formation d'Adoudou (A, B).

3.1.1.2. L'indice de Tizi N'Mekraz

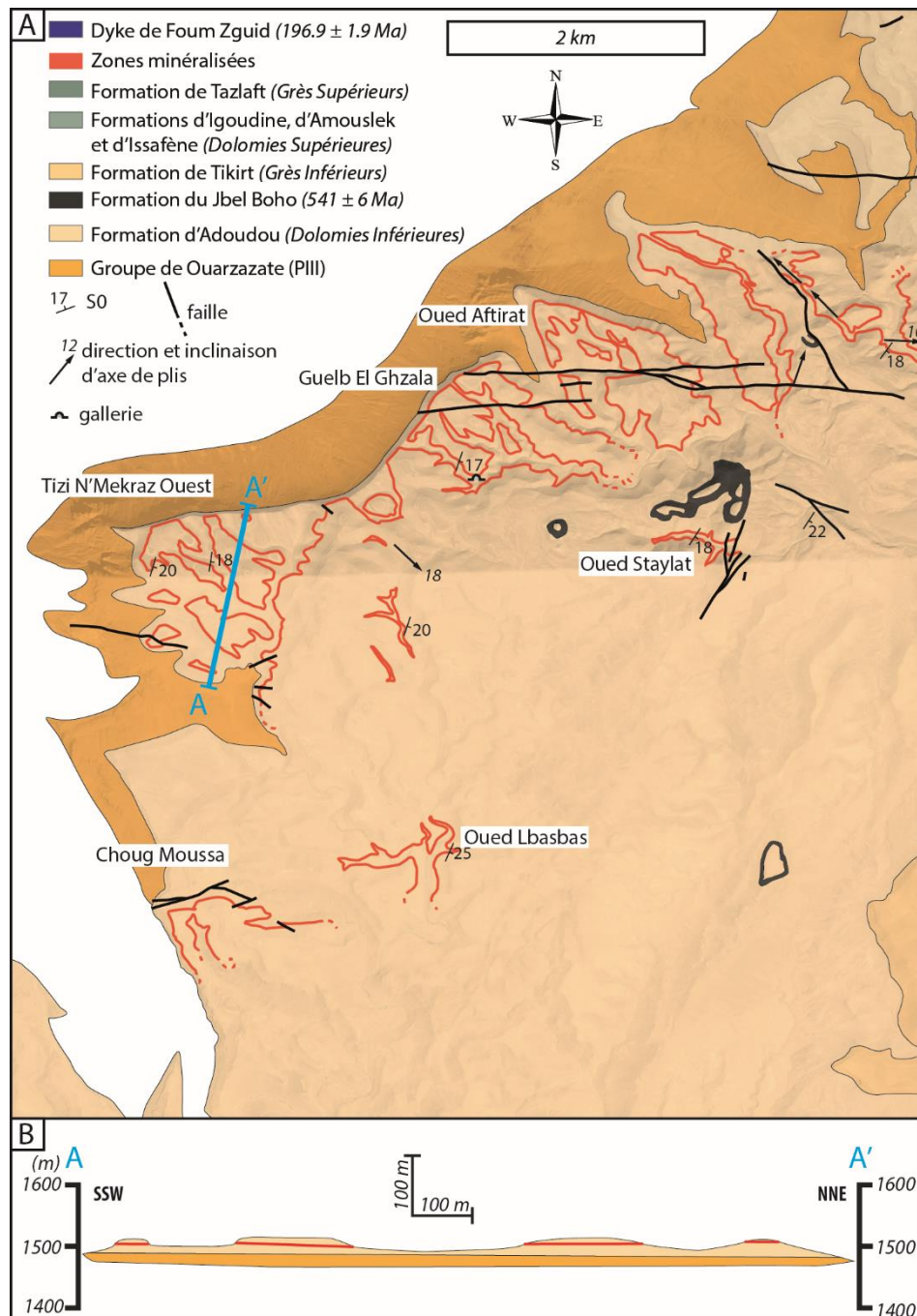


Figure 36 : A, Carte géologique de l'indice de Tizi N'Mekraz (Coeffic, 2012), l'essentiel des failles et des plis ont été cartographiés par l'interprétation d'images satellites ; B, coupe schématique du niveau porteur de Tizi N'Mekraz.

L'indice de Tizi N'Mekraz est localisé à une dizaine de kilomètres à l'Est de la mine de Bleida (**Fig. 31**). Le niveau porteur minéralisé en cuivre affleure sur une superficie de près de 40 km² (**Fig. 36**). Des sills de lave attribués à la formation du Jbel Boho sont intercalés localement dans la formation d'Adoudou. Celle-ci possède un pendage moyen de 20° vers le

sud-est. Le niveau porteur minéralisé est bien reconnu dans la partie nord-ouest de la zone mais il affleure également, de manière ponctuelle, au sud et à l'Est de l'indice (**Fig. 36**).

3.1.1.3. L'indice de Chaa'b Lhamrat (le talweg rouge)

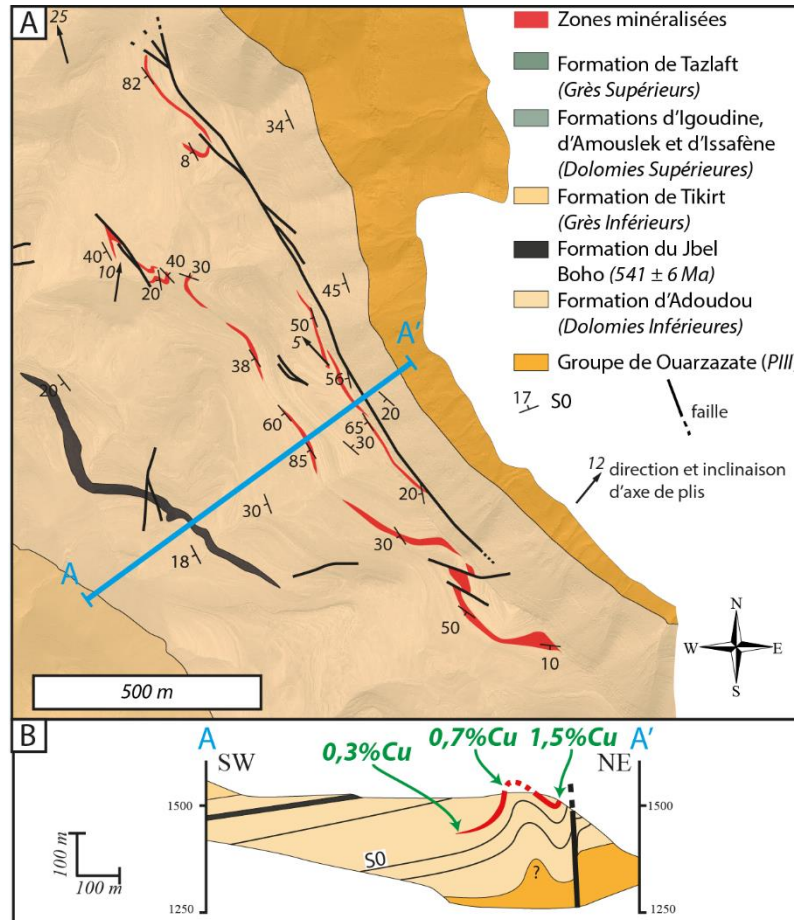


Figure 37 : A, Carte géologique de Chaa'b Lhamrat ; B, coupe géologique du secteur de Chaa'b Lhamrat avec la projection des teneurs moyennes en cuivre du niveau porteur (Bourque, 2013).

L'indice de Chaa'b Lhamrat est situé à 8 kilomètres au sud-ouest de la mine de Bleida (**Fig. 31**). Le niveau porteur minéralisé est plissé et faillé au sein de la formation d'Adoudou (**Fig. 37**). La minéralisation devient de moins en moins abondante au sein du niveau porteur, jusqu'à devenir absente vers le sud-ouest (**Fig. 37B**). A l'ouest, plus haut dans la série, on peut observer un large sill de lave (**Fig. 37**). Des structures sédimentaires silicifiées interprétées comme des potentiels textures de dolomitisation sont fréquentes dans cette zone d'étude mais ne présentent pas de liens apparents avec les zones minéralisées (**Fig. 38**).

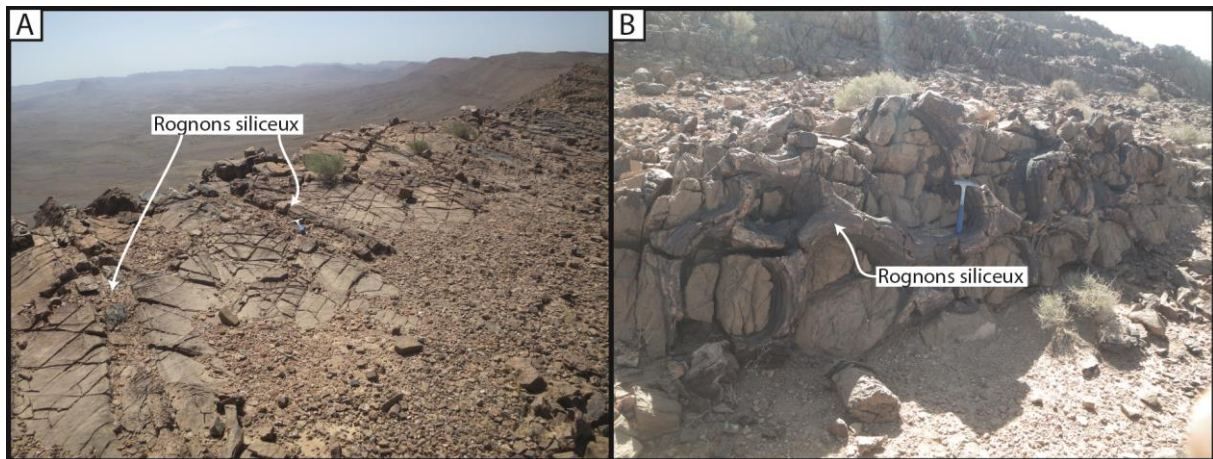


Figure 38 : Photographies de structures siliceuses diagénétiques de l'indice de Chaa'b Lhamrat.

3.1.3. La déformation

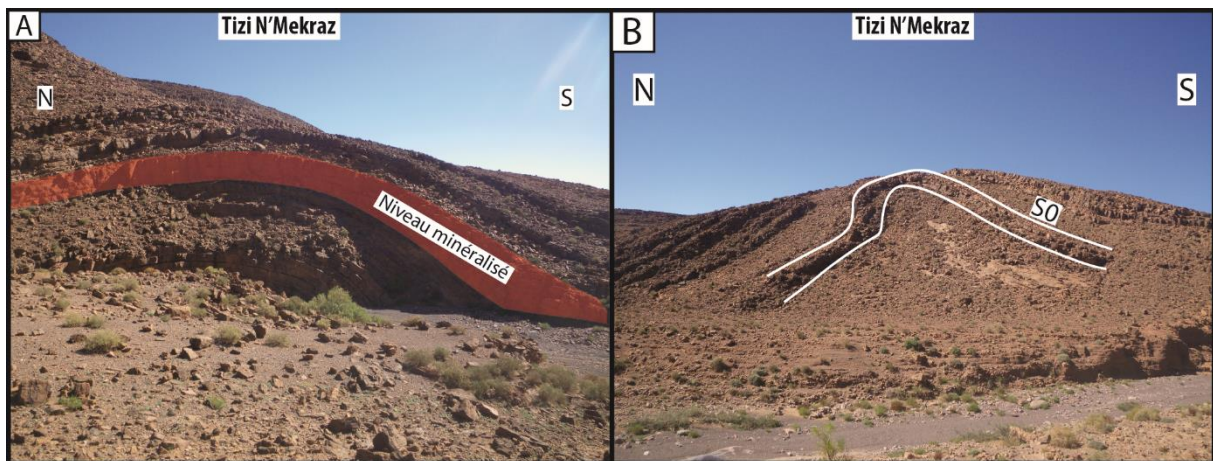


Figure 39 : Photographies des plis locaux de l'indice de Tizi N'Mekraz.

La déformation dans les secteurs de Oued R'Them et de Tizi N'Mekraz est très localisée. A Oued R'Them, on peut observer des plis, dont l'amplitude ne dépasse pas la dizaine de centimètres. Quelques plis ne dépassant pas la dizaine de centimètres d'amplitude ont été observés à un seul endroit (**Fig. 34 et 41**). En revanche, au niveau de l'indice de Tizi N'Mekraz, il est plus fréquent de trouver des plis d'amplitude plus importante, dépassant la dizaine de mètres, mais ces plis ne présentent pas de continuité latérale et verticale et restent donc localisés. Ces plis sont ouverts (**Fig. 39**) et présentent une orientation variable (**Fig. 36A et 41B**). En ce qui concerne l'indice de Chaa'b Lhamrat, la déformation est exprimée par des plis de direction N140° situés le long d'une faille de jeu apparent inverse et de même orientation. Ces plis sont des plis droits (**Fig. 40A**), des plis en crochons (**Fig. 40C**) et des plis déjetés avec des plan axiaux orientés de 50 à 70° vers le nord-est (**Fig. 40C, E, F et 41C**). En

plus des plis, on peut observer de nombreuses failles d'extension limitée à une dizaine de mètres (**Fig. 37A et 40B et C**). Deux familles directionnelles ont été étudiées : i) les failles orientées dans la direction N140° dont le jeu apparent est inverse (**Fig. 40C**) et ii) les failles décrochantes dextres orientées dans la direction N120°. Ces deux familles de failles décalent le niveau porteur minéralisé (**Fig. 40B**).

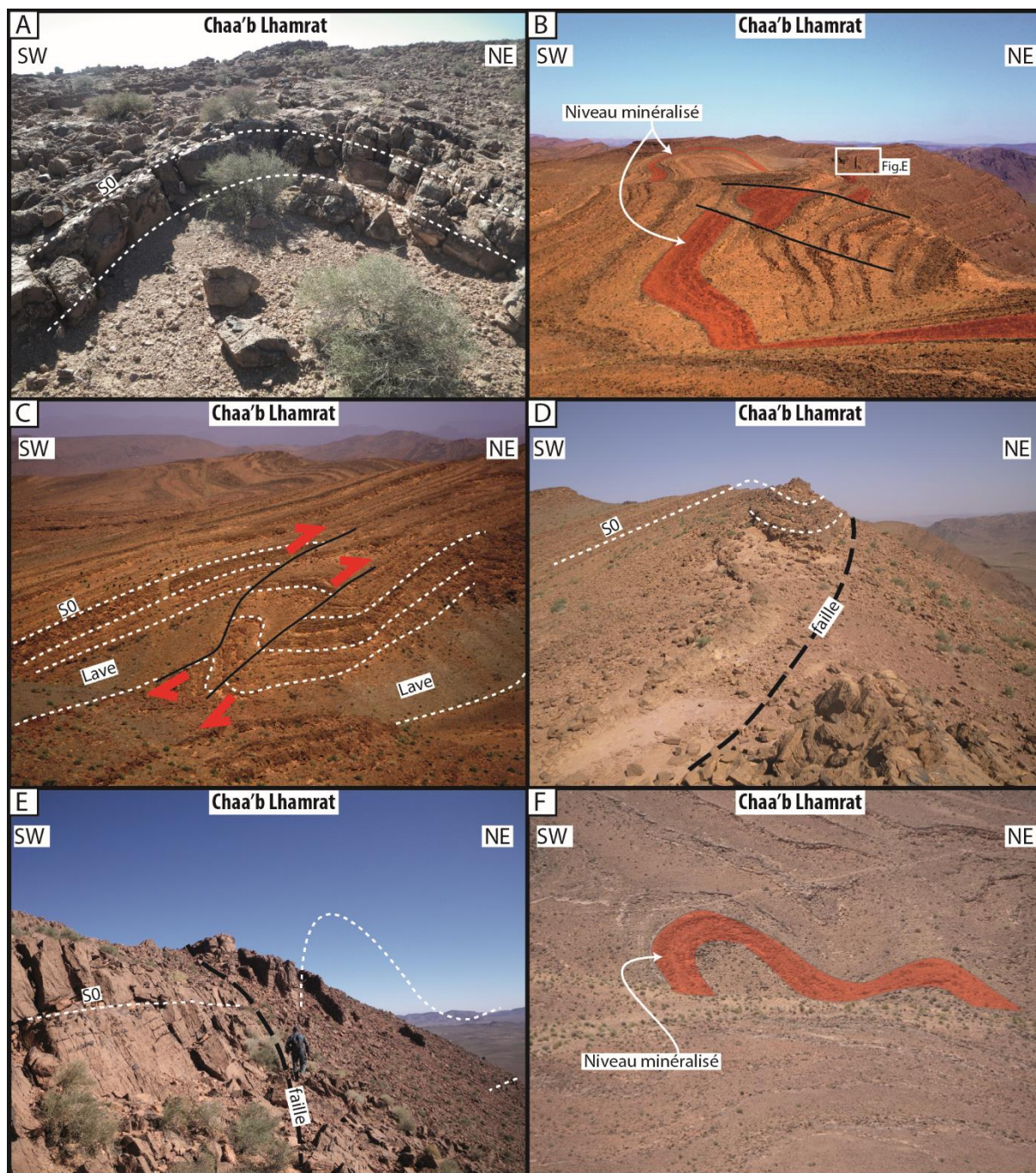


Figure 40 : Planche photographique des structures de déformation de l'indice de Chaab Lhamrat. A, charnière d'anticlinal de direction N140 ; B, failles de direction WNW-ESE de faible extension latérale recoupant le niveau porteur minéralisé ; C, Faille de direction NW-SE à jeux inverses associées à des plis en crochons ; D, Failles de direction N140 d'extension kilométrique ; E, Failles de direction N140 d'extension kilométrique avec une verticalisation des couches sédimentaires ; F, niveau minéralisé plissé par des plis orientés NW-SE.

Des fentes de tension ont pu être observées au niveau de l'indice de Tizi N'Mekraz d'orientation de direction N310° et inclinées de 10° vers le NW (**Fig. 41B**). En ce qui concerne la stratification, au niveau de l'indice de Oued R'Them son orientation reste constante dans la direction N320° et un pendage de 30° vers le nord-est (**Fig. 34 et 41B**). Pour l'indice de Tizi N'Mekraz son orientation est globalement constante, également avec une direction de N30° et un pendage de 25° vers le sud-est (**Fig. 36 et 41B**). Pour l'indice de Chaa'b Lhamrat, en dehors de la zone plissée, la direction moyenne est N132° pour un pendage de 23° vers le sud-ouest (**Fig. 37 et 41C**).

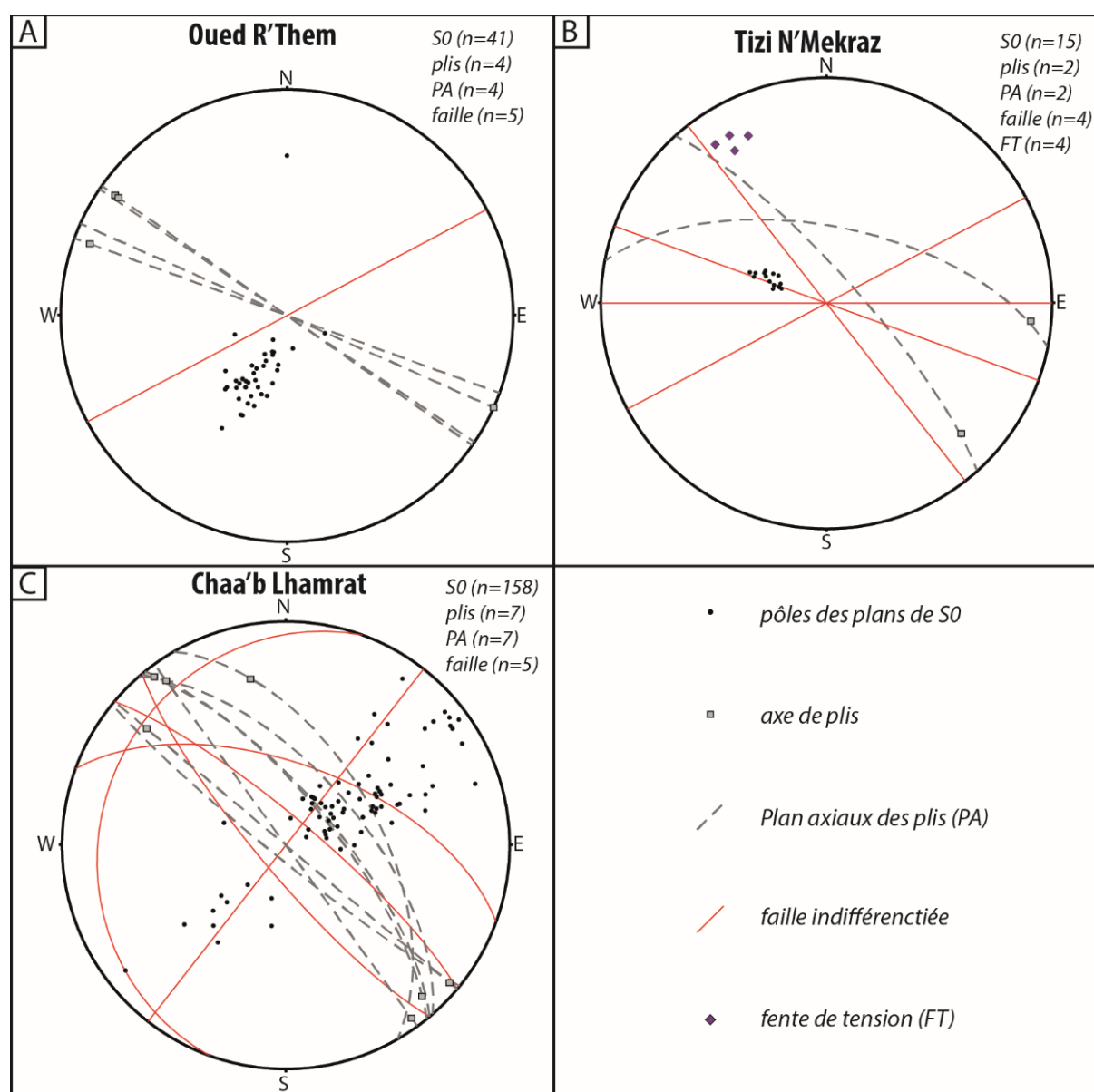


Figure 41 : Canevas de Schmidt avec les projections (hémisphère inf.) des données structurales des sites minéralisés de type « stratabound », avec « n » le nombre de mesures.

3.1.4. Textures macroscopiques

3.1.2.1. L'indice de Oued R'Them



Figure 42 : Planche photographique montrant les différentes texture associées à la minéralisation de l'indice de Oued'RThem. A, rognons siliceux du niveau porteur présentant des mouches et fissures à malachite ; B, géode en amande parallèle à la stratification, au toit du niveau porteur minéralisé ; C, géode en amande parallèle à la stratification au toit du niveau porteur minéralisé et connectée à des veines sécantes sur la stratification ; D, E et F, stockwork à bornite au sein du niveau porteur.

La minéralisation cuprifère de Oued R'Them est présente essentiellement sous la forme d'un stockwork sécant sur la stratification et de sulfures disséminés au sein des dolomies (Fig. 42B, D, E et F). Dans la partie supérieure du niveau porteur, sont localement présentes des géodes en amande, parallèles à la stratification, à quartz, dolomites et sulfures de cuivre (Fig. 42B). Ces géodes sont connectées directement au réseau de veines du

stockwork (**Fig. 42C**). Les rognons siliceux contiennent fréquemment des fissures ou des mouches de malachite (**Fig. 42A**).

3.1.2.2. L'indice de Tizi N'Mekraz

L'indice de Tizi N'Mekraz présente une minéralisation sous la forme d'un stockwork à gangue de quartz et dolomite (**Fig. 43A et D**) et à sulfures de cuivre. Ce stockwork peut être connecté à des niveaux de brèches ; plus ou moins épais à la base du niveau porteur, au sein des dolomies noires, ces brèches sont concordantes avec la stratification mais sont connectées au stockwork par l'intermédiaire de veines sécantes sur la stratification (**Fig. 43B, C, C' et E**). Des stylolites sont également présents au sein du niveau porteur, ils peuvent être parallèles à la stratification ou perpendiculaires à celle-ci (**Fig. 43E et F**). Par ailleurs ces stylolites contiennent localement des mouches de malachites ou de sulfures de cuivre (**Fig. 43F**). Le toit du niveau porteur de l'indice de Tizi N'Mekraz présente fréquemment sur 20 centimètres de puissance un niveau de dolomie noire à gros grains et à nodules de quartz et/ou dolomite et/ou sulfures de cuivre (**Fig. 44**). Lorsque les veines du stockwork sont bien exprimées, ces nodules se concentrent aux intersections des veines minéralisées (**Fig. 44A, D, C et E**). Toutefois, on peut aussi observer des nodules alignés dans la même direction que les veines (**Fig. 44D et C**). Localement, ces nodules sont directement connectés au stockwork minéralisé par l'intermédiaire des veines de même composition (**Fig. 44B**).

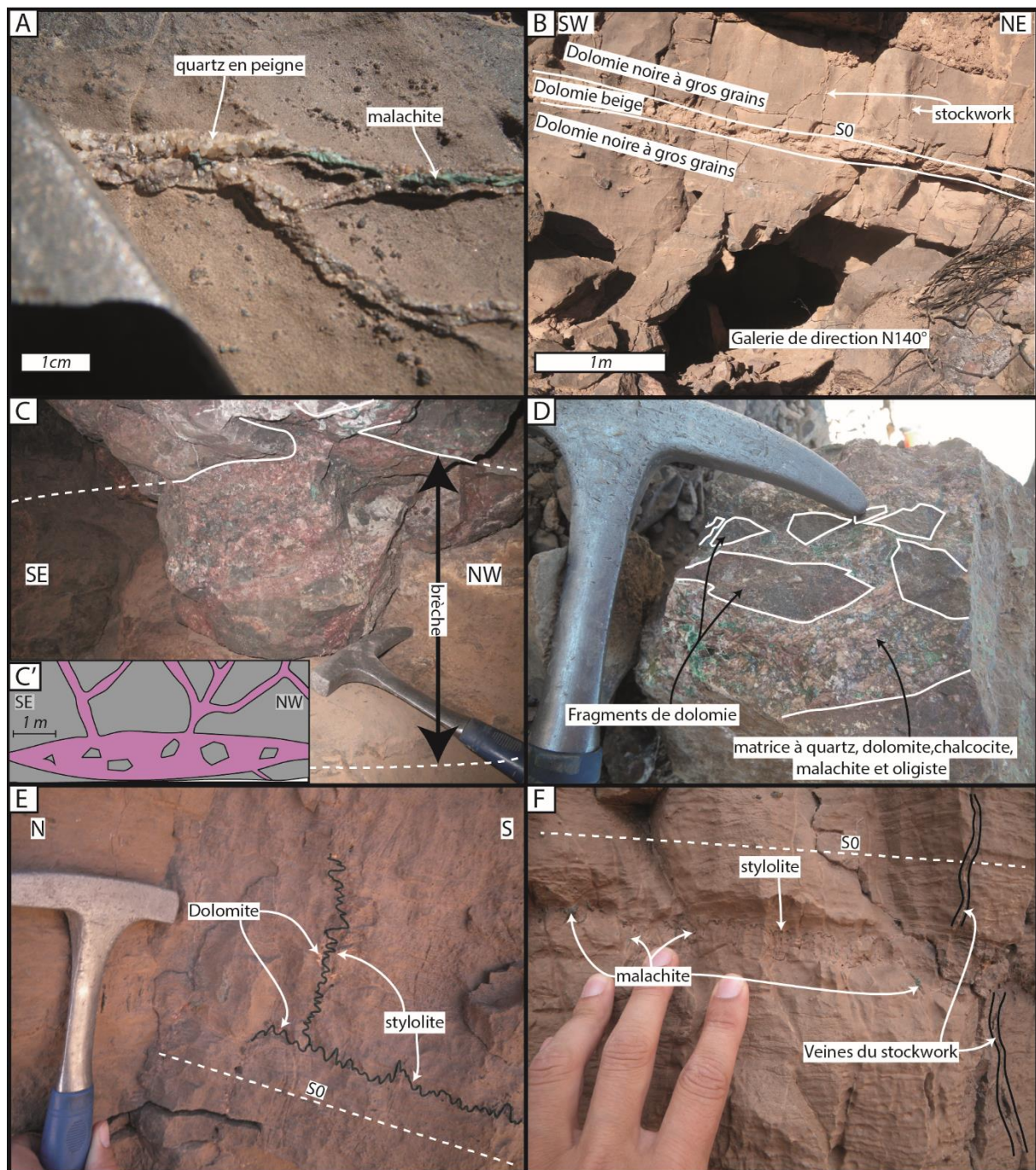


Figure 43 : Planche photographique montrant les différentes textures associées à la minéralisation de l'indice de Tizi N'Mekraz. A, veines du stockwork à quartz en peigne et malachite, sécantes sur le plan de la stratification (la photographie a été prise parallèlement à la S0) ; B, entrée d'une galerie de direction N140° dans le banc de dolomies noires inférieur du niveau porteur ; C, niveau bréchique parallèle à la stratification sur un parement de la galerie ; C', schéma extrait du carnet de terrain de la paroi de la galerie ; D, échantillons de la brèche parallèle à la stratification, prélevés dans la galerie, à fragments anguleux de dolomies dans une matrice de quartz, dolomite, chalcocite, malachite et oligiste ; E, stylolites parallèles et perpendiculaires à la stratification au sein du niveau porteur ; F, stylolite à malachite au sein du niveau porteur minéralisé.

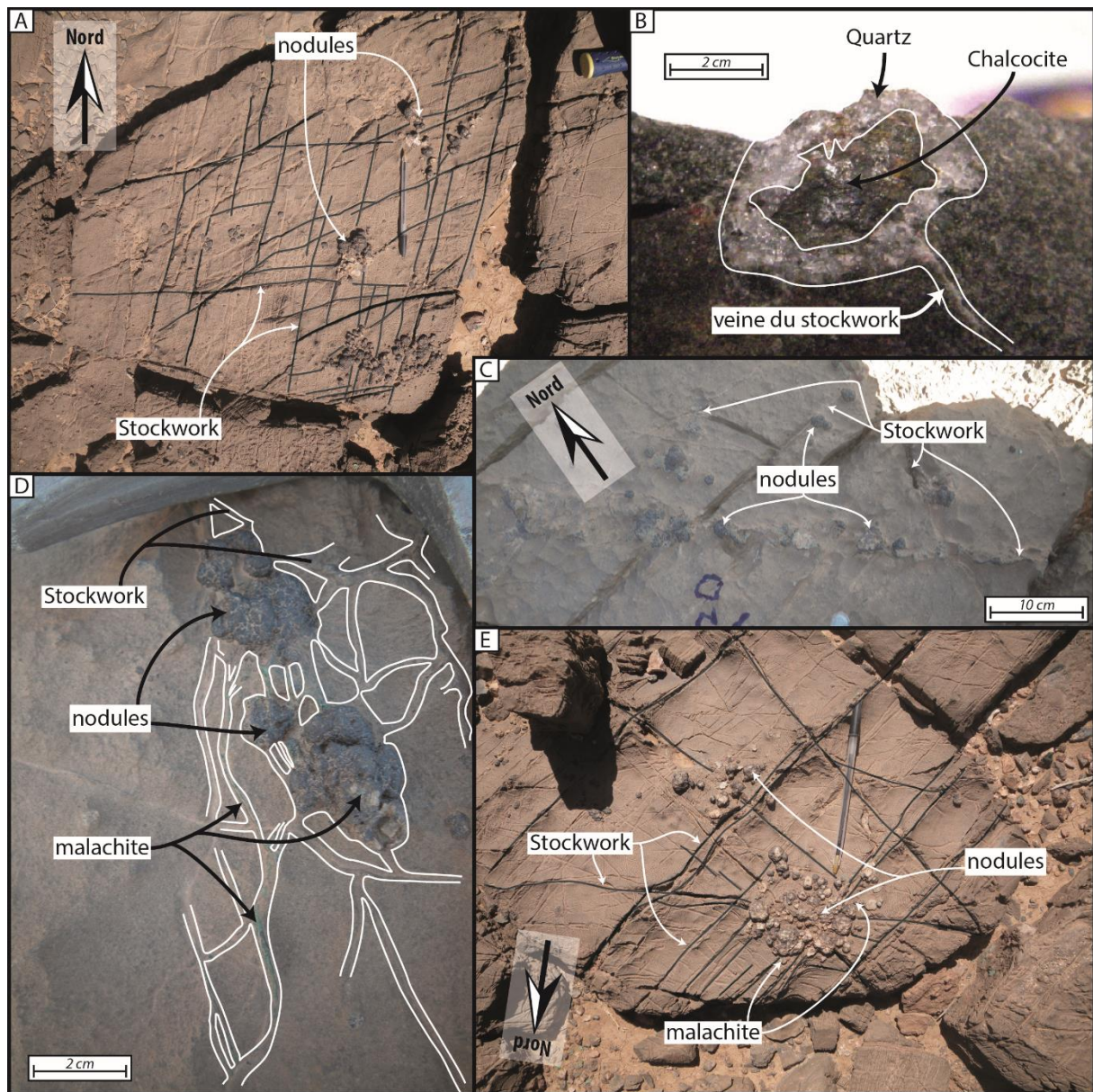


Figure 44 : Planche photographique montrant les différentes texture associées à la minéralisation de l'indice de Tizi N'Mekraz. A, Vue du dessus du niveau porteur minéralisé découpé en "puzzle" par les veines du stockwork et connexion entre des nodules et le stockwork ; B, vue en coupe d'un nodule à quartz et chalcocite connecté à une veine de quartz sécante sur la stratification ; C, alignement de nodules le long d'une veine du stockwork minéralisé ; D, connexion entre le stockwork minéralisé et les nodules minéralisés ; E, concentration de nodules minéralisés au niveau du croisement de veines du stockwork minéralisé.

3.1.2.3. L'indice de Chaa'b Lhamrat

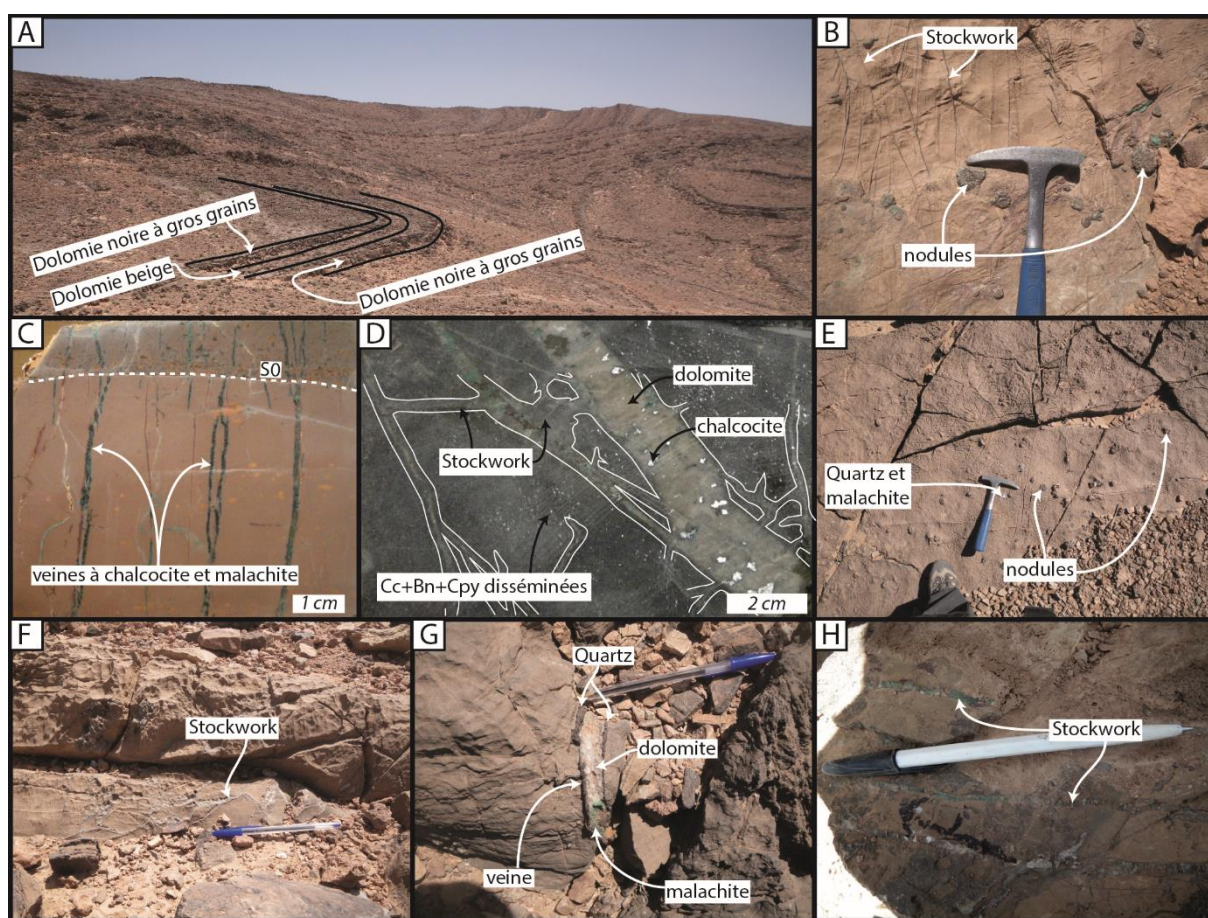


Figure 45 : Planche photographique montrant les différentes texture associées à la minéralisation de l'indice de Chaa'b Lhamrat. A, niveau porteur minéralisé de Chaa'b Lhamrat ; B, faciès à nodules de la partie supérieure du niveau porteur minéralisé ; C, stockwork à chalcocite sécant sur la stratification au sein du niveau porteur minéralisé ; D, stockwork à dolomite et chalcocite ainsi que des disséminations de sulfures dans la dolomie ; E, nodules à quartz et malachite de la partie supérieure du niveau minéralisé ; F, stockwork du niveau porteur minéralisé ; G, veine du stockwork à quartz aux éponges et dolomite et malachite au cœur ; H, veines du stockwork du niveau porteur minéralisé. Cc: chalcocite, Bn: bornite, Cpy: chalcopyrite.

La minéralisation de Chaa'b Lhamrat est essentiellement présente sous la forme d'un stockwork sécant sur la stratification (**Fig. 45C, D, F, G et H**). Les veines de ce stockwork sont composées d'une gangue de quartz aux éponges et de dolomite au cœur (**Fig. 45G**) associée principalement à de la chalcocite (**Fig. 45C et D**) et de la malachite (**Fig. 45C et H**). La chalcocite, la bornite et la chalcopyrite sont également présentes à proximité du stockwork sous forme disséminée dans l'encaissant dolomitique (**Fig. 45D**). Comme à Tizi N'Mekraz, dans la partie supérieure du niveau porteur, un niveau à nodule de quartz, dolomite et chalcocite est également présent (**Fig. 45B et E**).

3.1.5. Orientation des veines

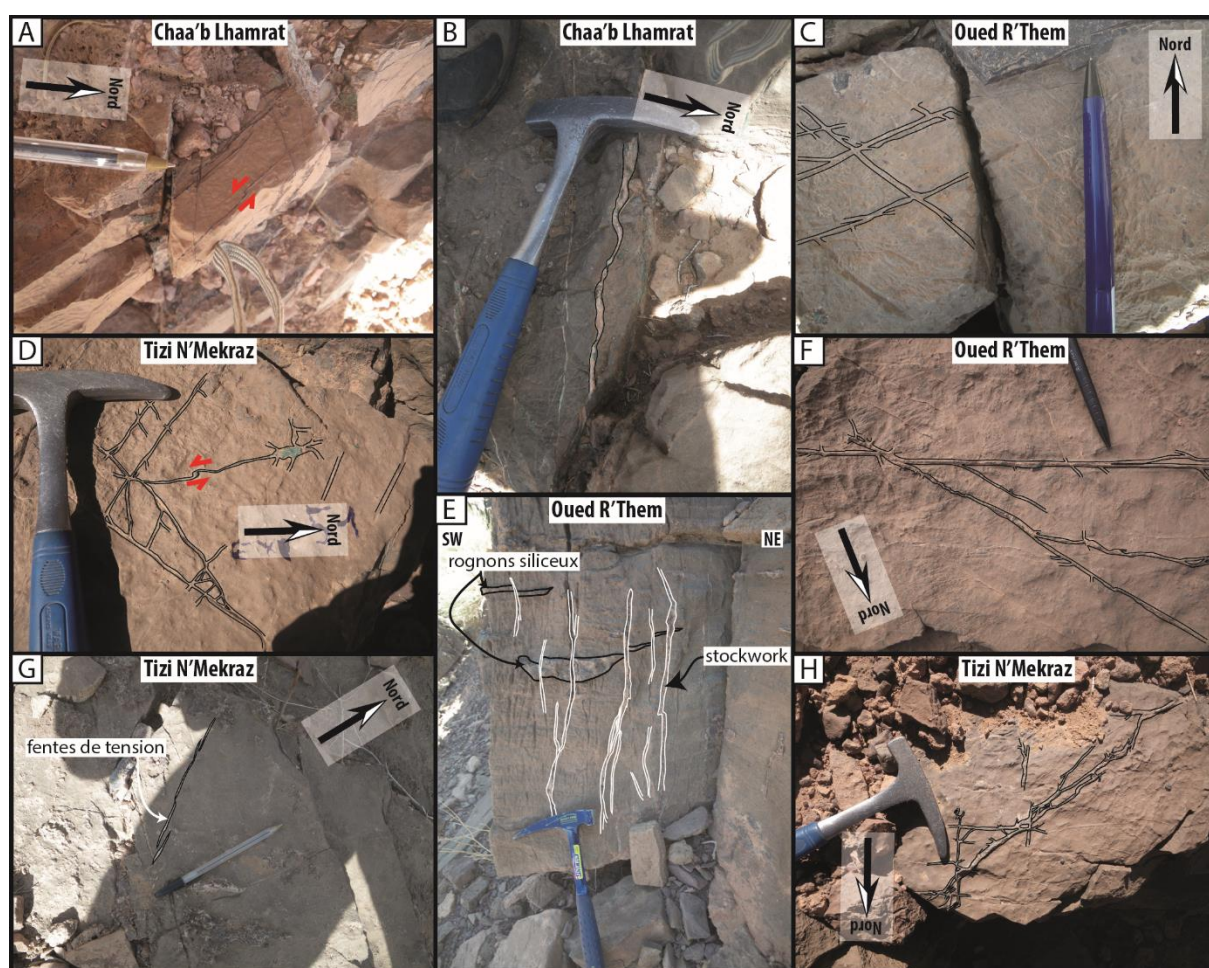


Figure 46 : Planche photographique des textures des veines du stockwork associé à la minéralisation au sein des trois indices de types « stratabound ».

Au niveau des trois indices de type « stratabound », les veines du stockwork cuprifère découpent l'encaissant selon un plan parallèle à la stratification. Dans le plan parallèle à la stratification, une il en résulte une texture en puzzle (**Fig. 46A, C, D, F et H**). Il est fréquent d'observer, dans ce plan, des fragments non déplacés, assimilables à des parallélépipèdes (**Fig. 46A, C, D et F**). Des fentes de tensions ont également été observées à Tizi N'Mekraz (**Fig. 46G**). Dans le plan perpendiculaire à la stratification, les veines du stockwork sont le plus fréquemment perpendiculaires à la S0 et sécantes sur les rognons siliceux du niveau porteur (**Fig. 46E**). Les indicateurs de mouvement sont difficilement observables OU nous avons que très rarement observés des indicateurs de mouvement (**Fig. 46A et D**). Dans la grande majorité des cas, le décalage observé entre les veines est faible. La composition minéralogique des veines ne varie pas en fonction de leur direction (**Fig. 47**). Par ailleurs, plusieurs familles d'orientation de veines ont pu être mises en évidence sur les trois indices de

type « stratabound »: (i) pour Oued R'Them : deux familles de failles orientées dans la direction N040° et N130° avec des pendages respectifs de 90 et ~ 10° vers le sud-ouest (Fig. 16 A). Une famille NE-SO à pendage vertical et une autre NW-SO à pendage verticale ou légèrement incliné vers le sud-ouest (**Fig. 47A**) ; (ii) pour Tizi N'Mekraz : une famille N140° à pendage verticale et une famille N220° à pendage vertical ou légèrement incliné vers le nord-ouest (**Fig. 47B**) ; (iii) pour Chaa'b Lhamrat : une famille N0° à pendage vers l'Est et une famille N320° à pendage incliné vers le nord-est ou le sud-ouest (**Fig. 47C**). Les orientations NO-SE et NE-SO sont les plus fréquentes sur l'ensemble des indices (**Fig. 47D**). Sur l'ensemble des trois indices, les orientations NO-SE et NE-SO sont présentes (**Fig. 47D**).

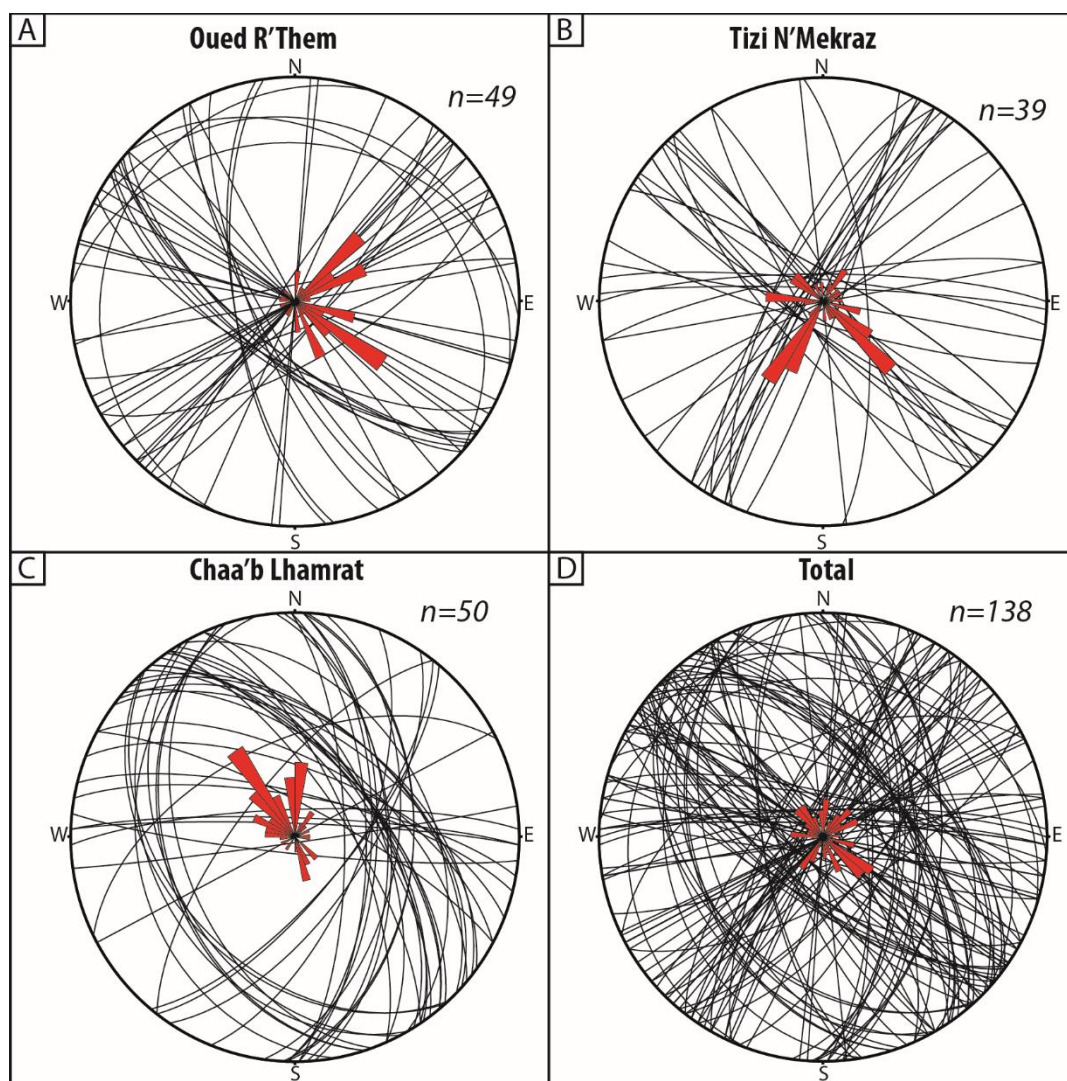


Figure 47 : Canevas de Schmidt avec les projections (hémisphère inf.) des données d'orientation des veines du stockwork minéralisé en cuivre des sites minéralisés de type « stratabound », avec « n » le nombre de mesures (classe de 10°, 30 % des données sont représentées du centre à la périphérie du canevas) .

3.2. LE TYPE « FOLDED-BAND »

3.2.1. Cartographie structurale et coupes à l'échelle de l'objet minéralisé

3.2.1.1. Le gisement de Jbel Laassel (la montagne de miel) et l'indice d'Amekssa (le berger)

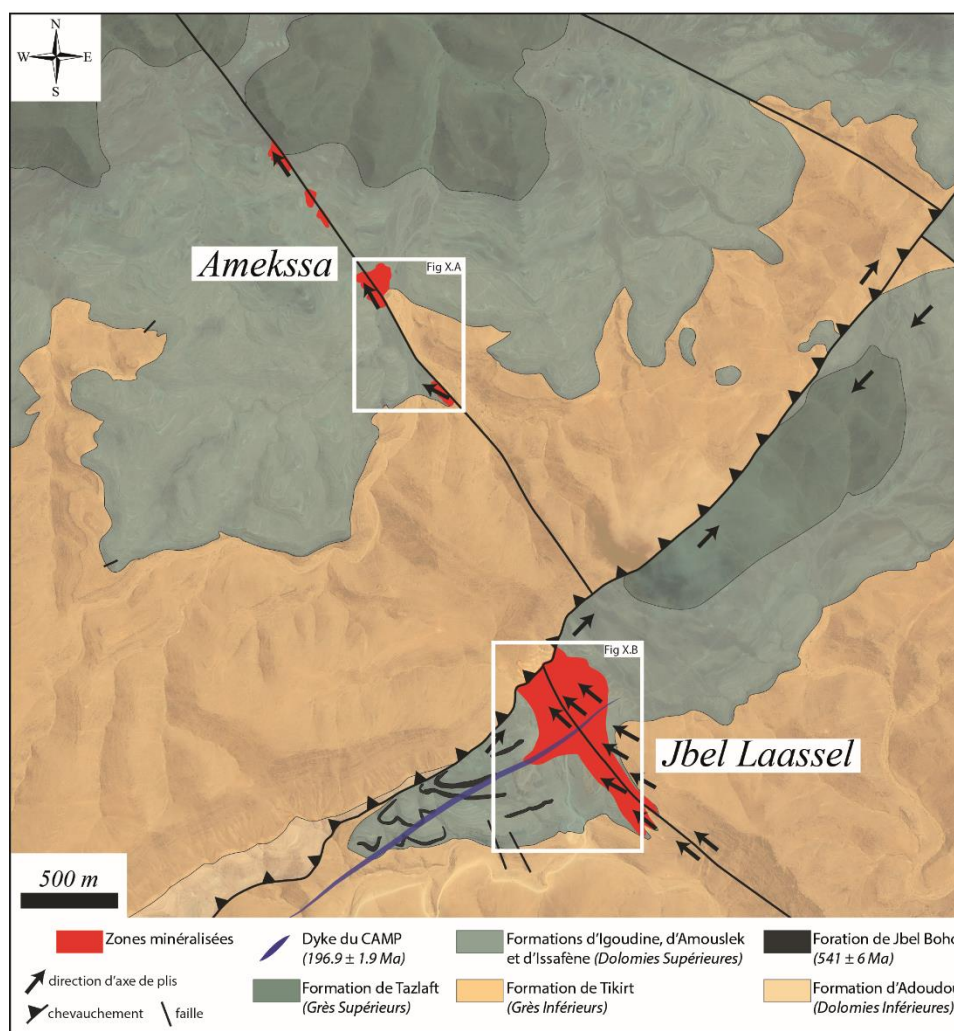


Figure 48: Carte géologique du secteur de Jbel Laassel (la montagne de miel) et d'Amekssa (le berger) (modifiée d'après (Kersit, 1984).

Le gisement de Jbel Laassel et l'indice d'Amekssa sont localisés à l'extrême nord-est de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (**Fig. 31**). La minéralisation est présente au sein des formations d'Igoudine, d'Amouslek et d'Issafène (**Fig. 48**) le long d'une faille sub-v verticale de direction N140. Ces deux occurrences sont séparées l'une de l'autre par un chevauchement de direction N30, mettant en contact anormal la formation de Tikirt, au nord, sur les formations d'Igoudine d'Amouslek et d'Issafène encaissant le gisement de Jbel Laassel au sud (**Fig. 48**). Un synclinal d'extension plurikilométrique de même direction que le

chevauchement est présent au sud de ce dernier, faisant apparaître en son cœur la formation de Tazlaft au nord-est du gisement de Jbel Laassel (**Fig. 48**). Cartographiquement le chevauchement décale les structures N140 ce qui suggère une antériorité des structures N140 par rapport au chevauchement (**Fig. 48**). Au niveau de l'indice d'Amekssa, plusieurs plis de direction N30 sont présents 100 mètres à l'Ouest de la zone minéralisée (**Fig. 49A**). Une deuxième famille de plis, en termes d'orientation est présente de part et d'autre de la faille sub-verticale de direction N140. Cette zone plissée, nommée par la suite « folded-band », de même direction que cette faille, est large d'environ 300 mètres au niveau du gisement de Jbel Laassel et est restreinte à 10 à 80 mètres de large au niveau de l'indice d'Amekssa (**Fig. 48 et 49**). Au niveau du gisement de Jbel Laassel, des sills de lave basiques de composition dioritique, attribués à la formation du Jbel Boho, sont intercalés au sein des formations des de Tikirt, d'Igoudine, d'Amouslek et d'Issafène. De plus, un dyke de dolérite attribué au CAMP est sécant sur l'ensemble des formations (**Fig. 49B**). Ces roches magmatiques en sills et dykes, n'ont pas été observées au niveau de l'indice d'Amekssa (**Fig. 49B**).

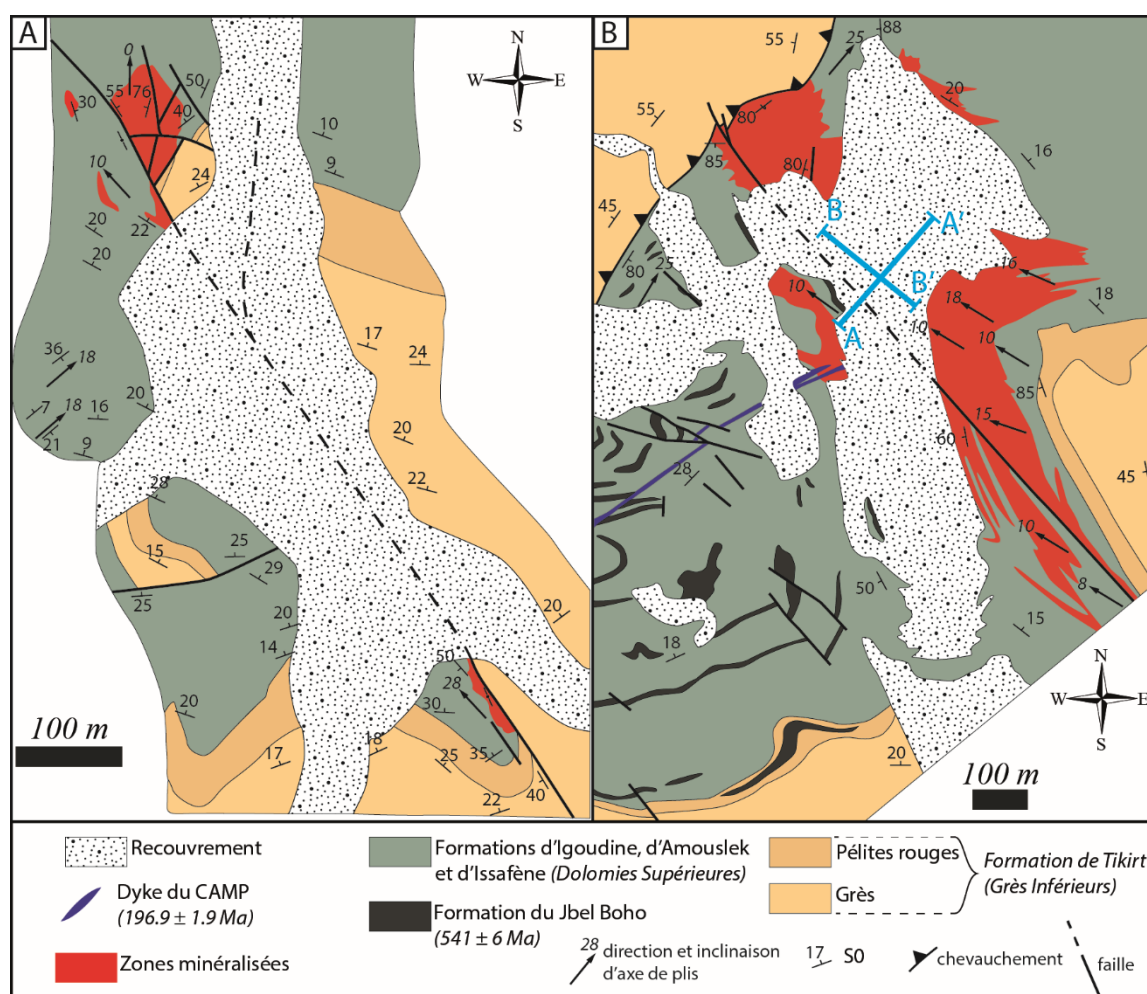


Figure 49 : A, Carte géologique du secteur d'Amekssa (modifiée d'après (Bourque, 2013). B, Carte Géologique du secteur de Jbel Laassel (modifiée d'après (Kersit, 1984).

Les limites des corps minéralisés en surface sont systématiquement associées aux limites de la « folded_band ». En profondeur, la puissance des corps minéralisés est plus importante au niveau des charnières des anticlinaux dans le plan NE-SW, soit le plan perpendiculaire à la direction de la « folded-band » (**Fig. 50**), et elle semble homogène dans le plan NW-SE, parallèle à la direction de la « folded-band » (**Fig. 50**). Par ailleurs, les sills de lave attribués à la formation du Jbel Boho sont affectés par les plis de la « folded-band ». Les faciès minéralisés correspondent à des siltites beiges et verdâtres ainsi qu'à des bancs dolomitiques des formations d'Igoudine, d'Amouslek et d'Issafène. En revanche les niveaux pélitiques rougeâtre et les niveaux de sills de lave ne sont que très rarement minéralisés (**Fig. 50 et 51**).

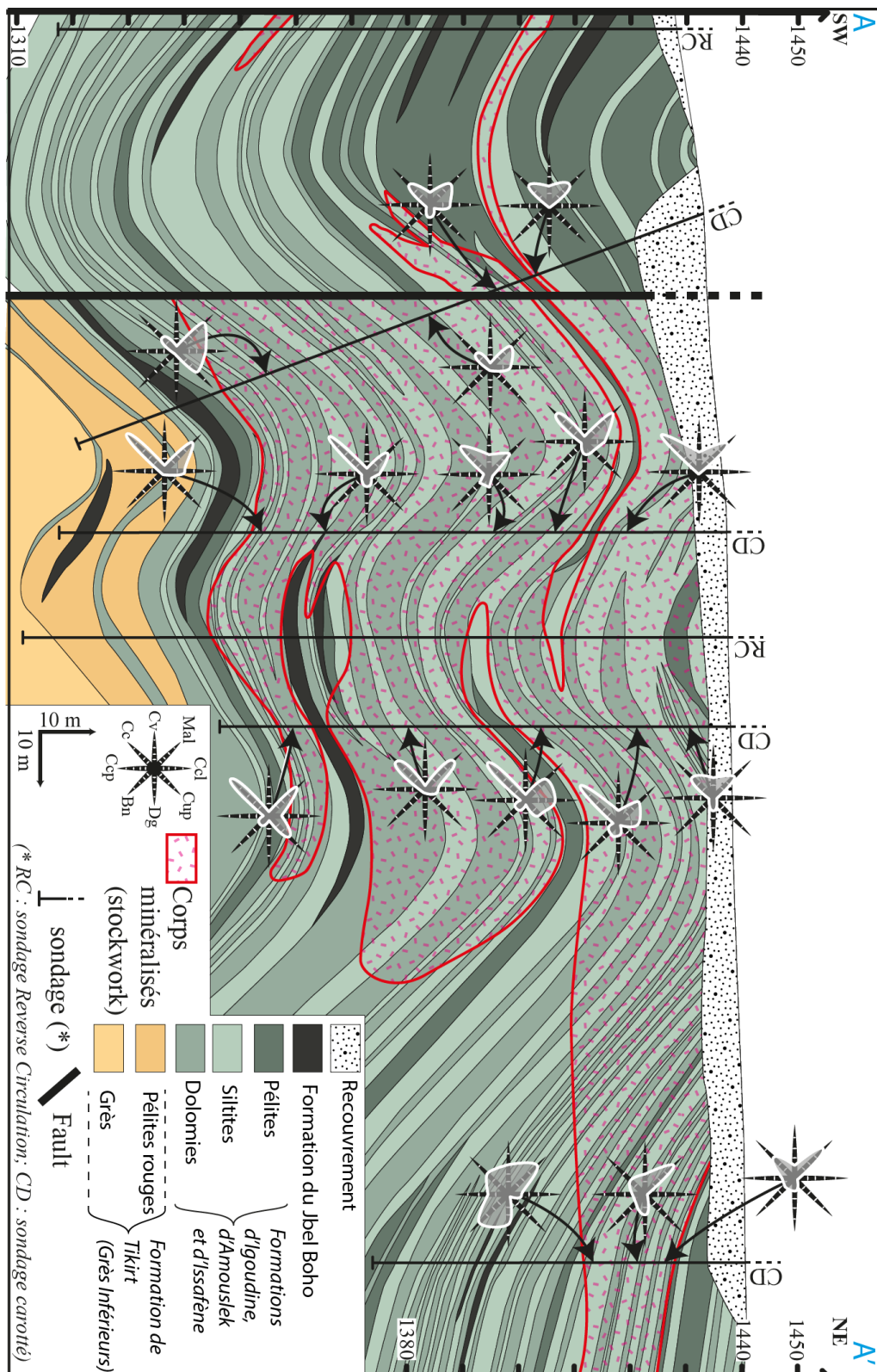


Figure 50 : Coupe géologique (section A-A' sur la **figure 49.B**) montrant les limites des corps minéralisés ainsi que les abondances minéralogiques, observées sur les sondages carottés et en lame mince, représentées sous la forme de spider diagramme. Les abondances sont exprimées du centre vers les bords par 5 paliers : (1) au centre, absent, (2) en trace, (3) fréquent, (4) abondant, (5) aux extrémités du spider diagramme, très abondant.

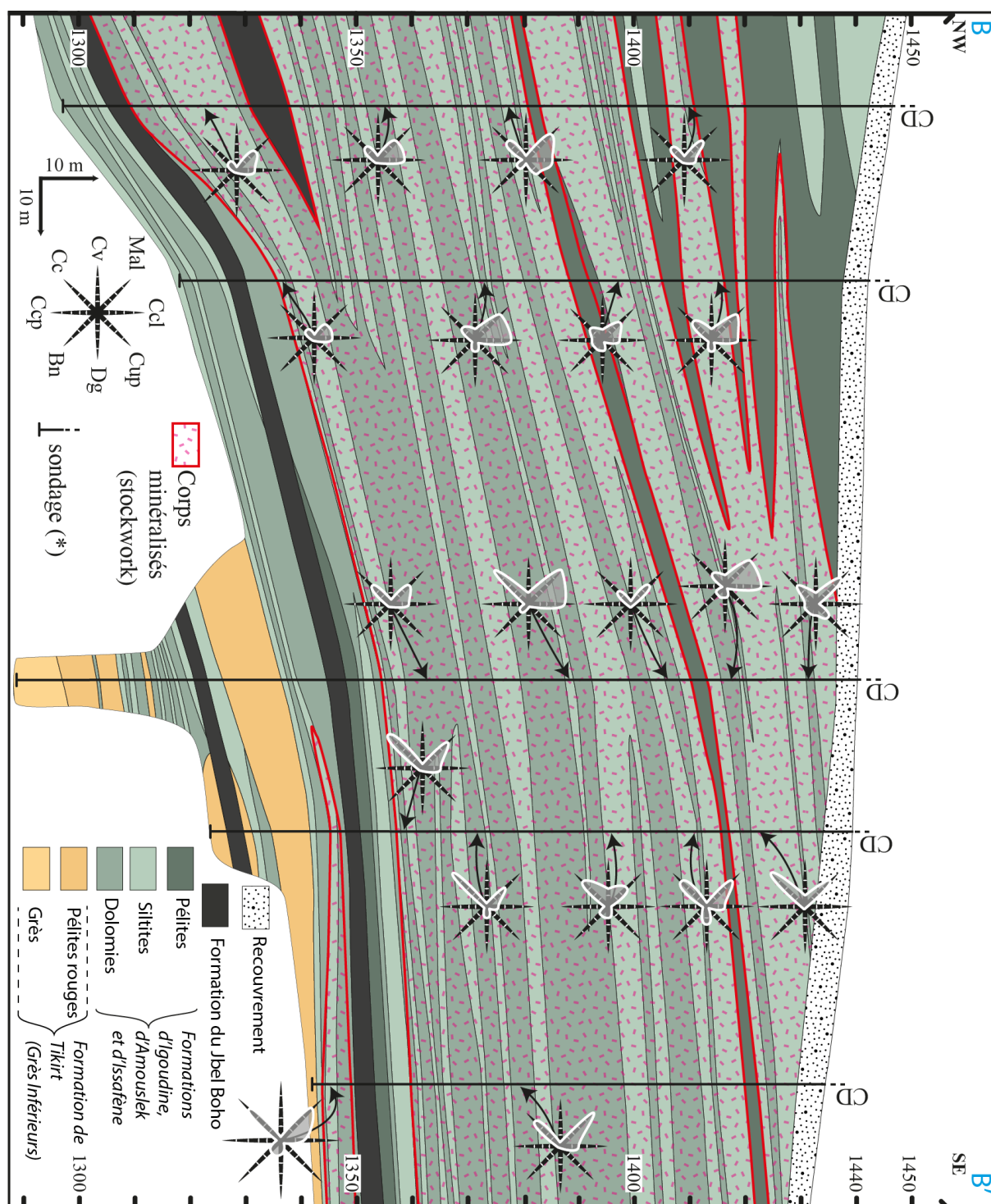


Figure 51 : Coupe géologique (section B-B' sur la **figure 49.B**) montrant les limites des corps minéralisés ainsi que les abundances minéralogiques, observées sur les sondages carottés et en lame mince, représentées sous la forme de spider diagramme. Les abundances sont exprimées du centre vers les bords par 5 paliers : (1) au centre, absent, (2) en trace, (3) fréquent, (4) abondant, (5) aux extrémités du spider diagramme, très abondant.

3.2.1.2. L'indice de Assif N'Zaïd (l'oued de Zaïd)

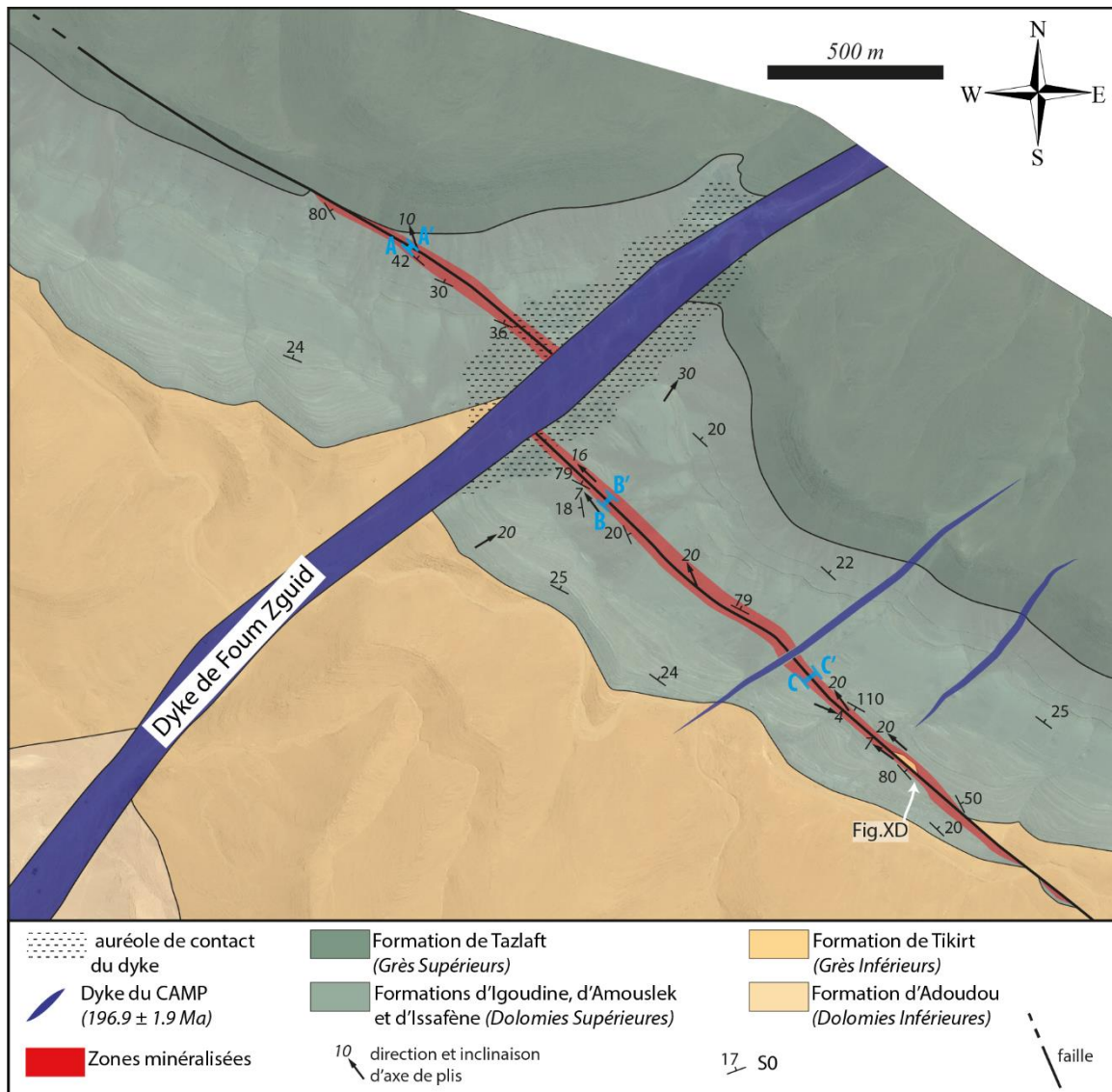


Figure 52 : Carte géologique et gîtologique de l'indice d'Assif N'Zaïd.

L'indice d'Assif N'Zaïd est situé à 30 kilomètres au nord de la mine de Bleida, au niveau de l'intersection entre le dyke de Foug Zguid et les formations d'Igoudine, d'Amouslek et d'Issafène (**Fig. 31**). La minéralisation est présente au sein de ces trois formations (**Fig. 52**) le long d'une faille de direction N130 à pendage de 80 à 88° vers le nord-est. La faille, comme les corps minéralisés sont décalés en dextre apparent par le dyke de Foug Zguid (**Fig. 52**) et deux structures magmatiques de même orientation sont présentes dans la partie Est de l'indice (**Fig. 52**). Des plis de direction N130 à 150 sont présents de part et d'autre de la faille et forme une « folded-band » d'une largeur variant du mètre à la dizaine de mètres (**Fig. 52**). Des plis de direction N30 sont présents à proximité du dyke dans la formation d'Igoudine et d'Issafène (**Fig. 52**). Les formations au contact du dyke présentent

une couleur noire jusqu'à une distance de 20 à 80 mètres du dyke (**Fig. 52**) suggérant un métamorphisme de contact lié à l'emplacement du magma basique. Les corps minéralisés sont restreints au contact avec les failles senestres et inverses de direction N120 à 150, aux zones plissées et aux niveaux de dolomies et de siltites (**Fig. 53**).

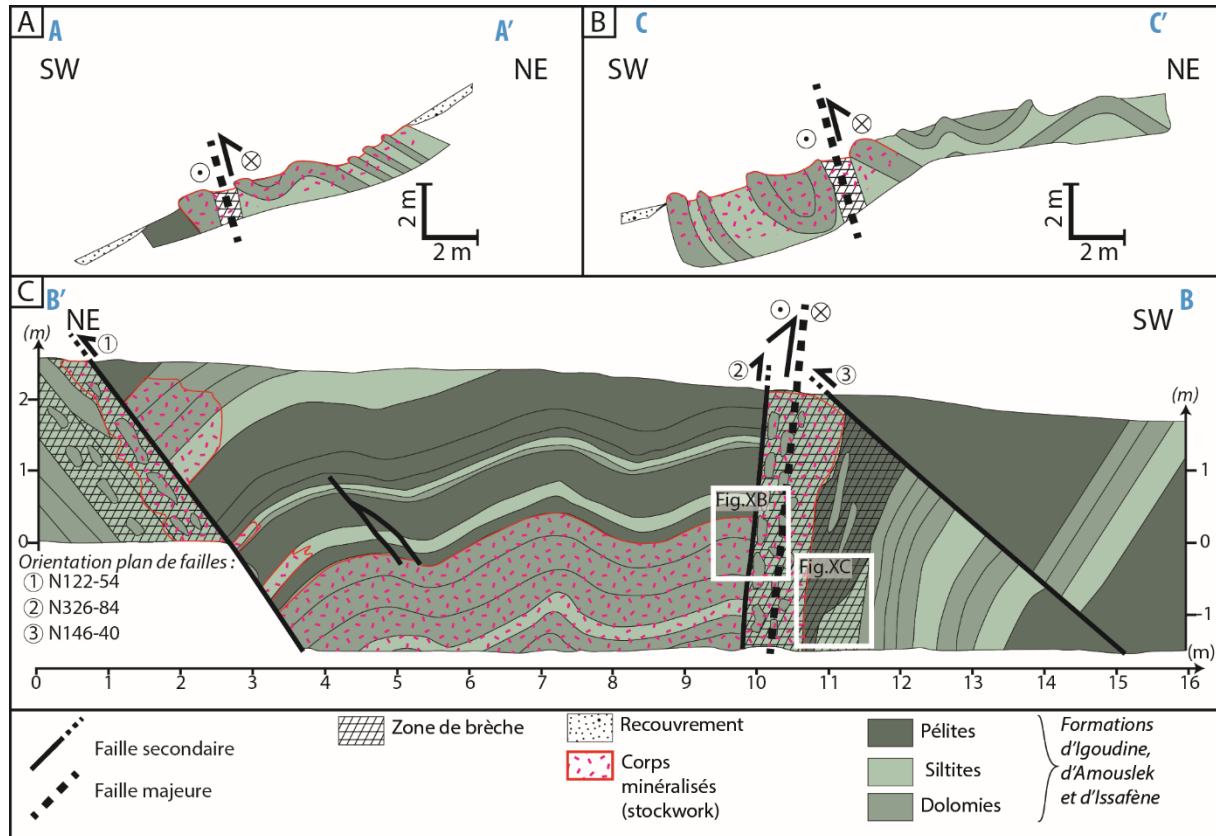


Figure 53 : A et B, Levés de surface dans la partie nord-ouest (AA') et dans la partie sud-est (CC') l'indice d'Assif N'Zaïd ; C, levé de tranchée (B'B) dans la partie centrale de l'indice d'Assif N'Zaïd (localisation **figure. 52**).

3.2.1.3 Le gisement de Jbel N'Zourk (la montagne bleue)

Le gisement de Jbel N'Zourk est localisé à l'extrême Ouest de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (**Fig. 31**) au sein de la formation d'Adoudou. La minéralisation est présente au contact d'une faille inverse de direction N160 associée à des plis, de direction N120 à N160, formant une « folded-band » de part et d'autre de la faille (**Fig. 54**). Cette faille met en contact la formation d'Adoudou sur la formation Lie de Tikirt (**Fig. 54B**). Il s'agit du seul cas de « folded-band » minéralisée en cuivre observé au sein de la formation d'Adoudou mais elle semble présenter les mêmes caractéristiques que celle localisées dans les formations d'Igoudine, d'Issafène et d'Amouslek. L'explication du niveau de décollement sera décrite dans la section 3.3.1 et 2.

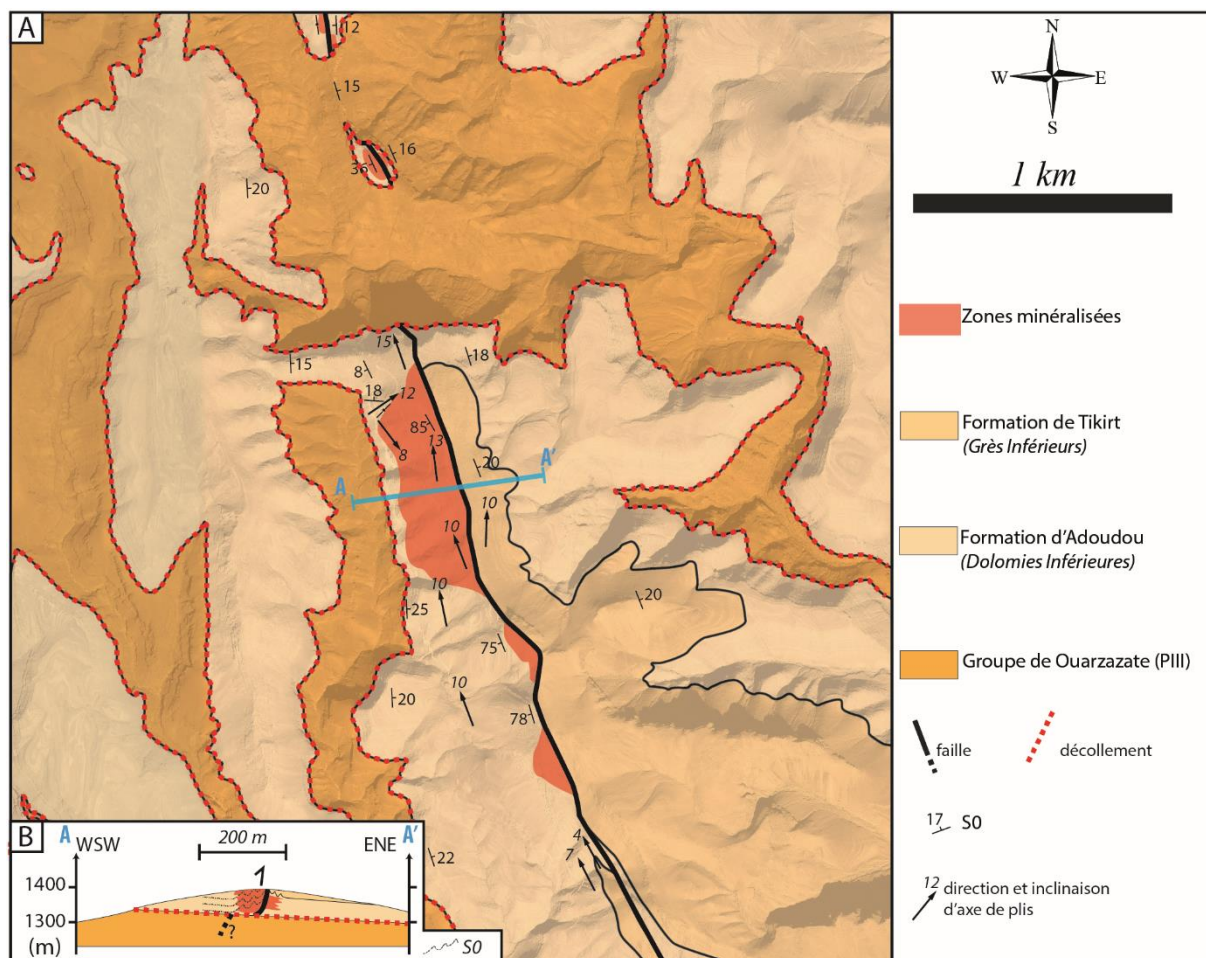


Figure 54 : A, carte géologique du gîte de Jbel N'Zourk ; B, coupe schématique du secteur de Jbel N'Zourk.

3.2.2. Les plis

3.2.2.1. Typologie des plis de la « folded-band »

Les occurrences cuprifères de Jbel Laassel, d'Amekssa, d'Assif N'Zaïd et de Jbel N'Zourk sont toutes associées à une zone de faille associées à des plis, nommée « folded-band », de direction comprise entre N130 et N160, au sein de la formation d'Adoudou et de Tikirt pour le gisement de Jbel N'Zourk et au sein des formation de Tikirt, d'Igoudine, d'Amouslek et d'Issafène pour les trois autres occurrences. Cette « folded-band » est constituée de plis d'amplitude essentiellement pluri-métrique et localement décimétrique (**Fig. 55**). Il s'agit de plis isopaques (**Fig. 55B, G et C**), de plis en genou (**Fig. 55A et E**) ou de plis déversés (**Fig. 55F**). Ces plis peuvent être ouverts (**Fig. 55C**) à serrés (**Fig. 55F**). Une schistosité de fracture est fréquemment développée au niveau des charnières des plis (**Fig.**

55A). Ces plis peuvent plisser l'encaissant sur une distance de quelques mètres à une centaine de mètres et disparaître en terminaison périclinale.

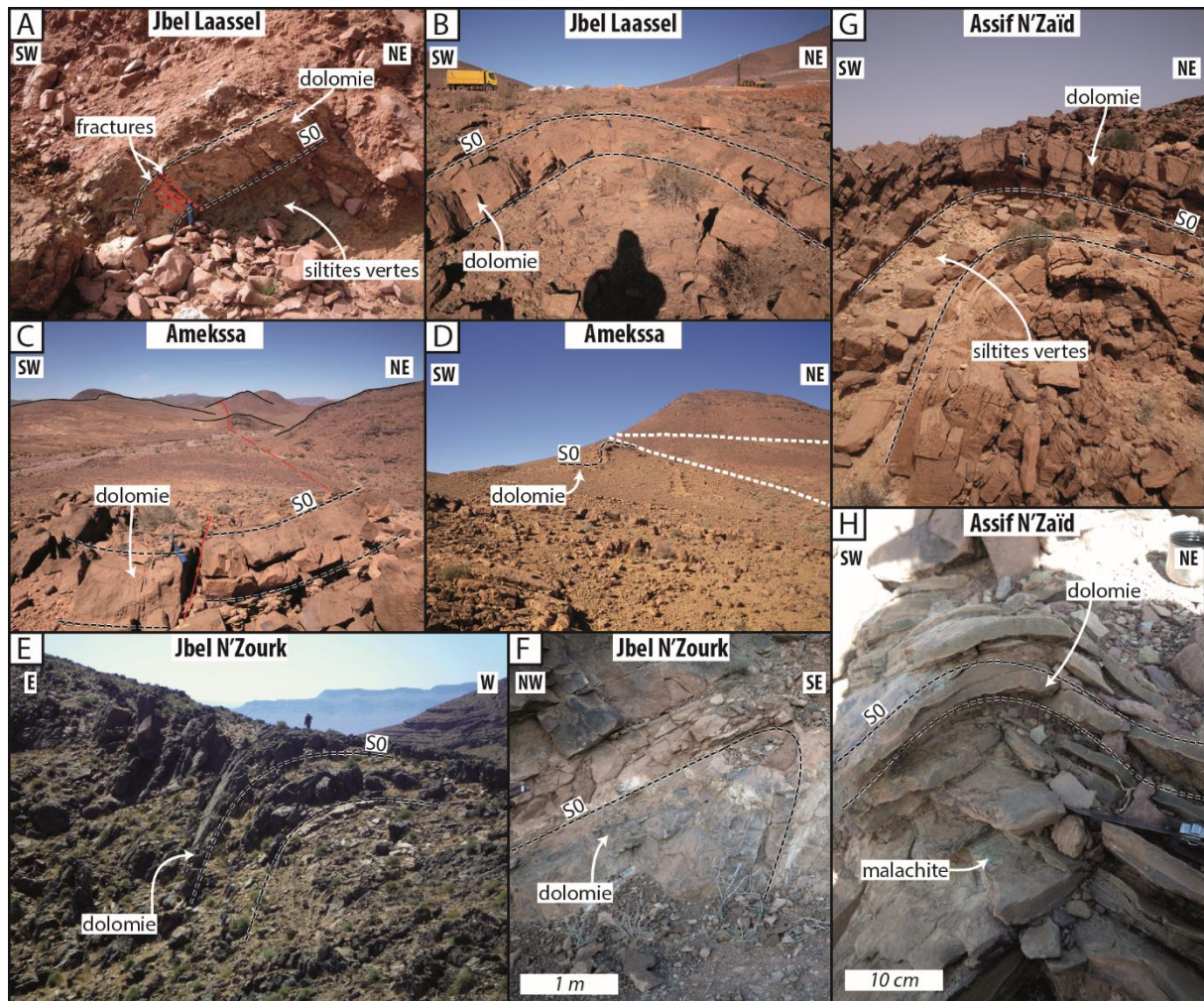


Figure 55 : Planche photographique des types de plis de direction N140 à N160. A, anticlinal en genou déjeté vers le SW de Jbel Laassel ; B, anticlinal droit et isopaque de Jbel Laassel ; C, synclinal ouvert isopaque de l'indice d'Amekssa ; D, plis crochons au contact de la faille de l'indice d'Amekssa ; E, anticlinal en genou du gîte de Jbel N'Zourk ; F, anticlinal déversé du gîte de Jbel N'Zourk ; G, anticlinal isopaque et droit de l'indice d'Assif N'Zaïd ; H, anticlinal isopaque et droit, d'amplitude décimétrique, de l'indice de Assif N'Zaïd.

Concernant le lien entre les veines du stockwork et les plis NO-SE des « folded-band » : des textures d'ouverture en « saddle-reef » ont été observées au niveau des charnières des anticlinaux (**Fig. 56A**). De plus les veines du stockwork ont tendance à être sécantes sur la stratification de manière perpendiculaire au flanc des plis (**Fig. 56B**). Des sigmoïdes indiquant un jeu inverse ont été observées au niveau des bancs moins compétents (siltites ou pélites), au niveau des flancs de plis, sous-entendant des glissements bancs sur bancs (**Fig. 56C**).

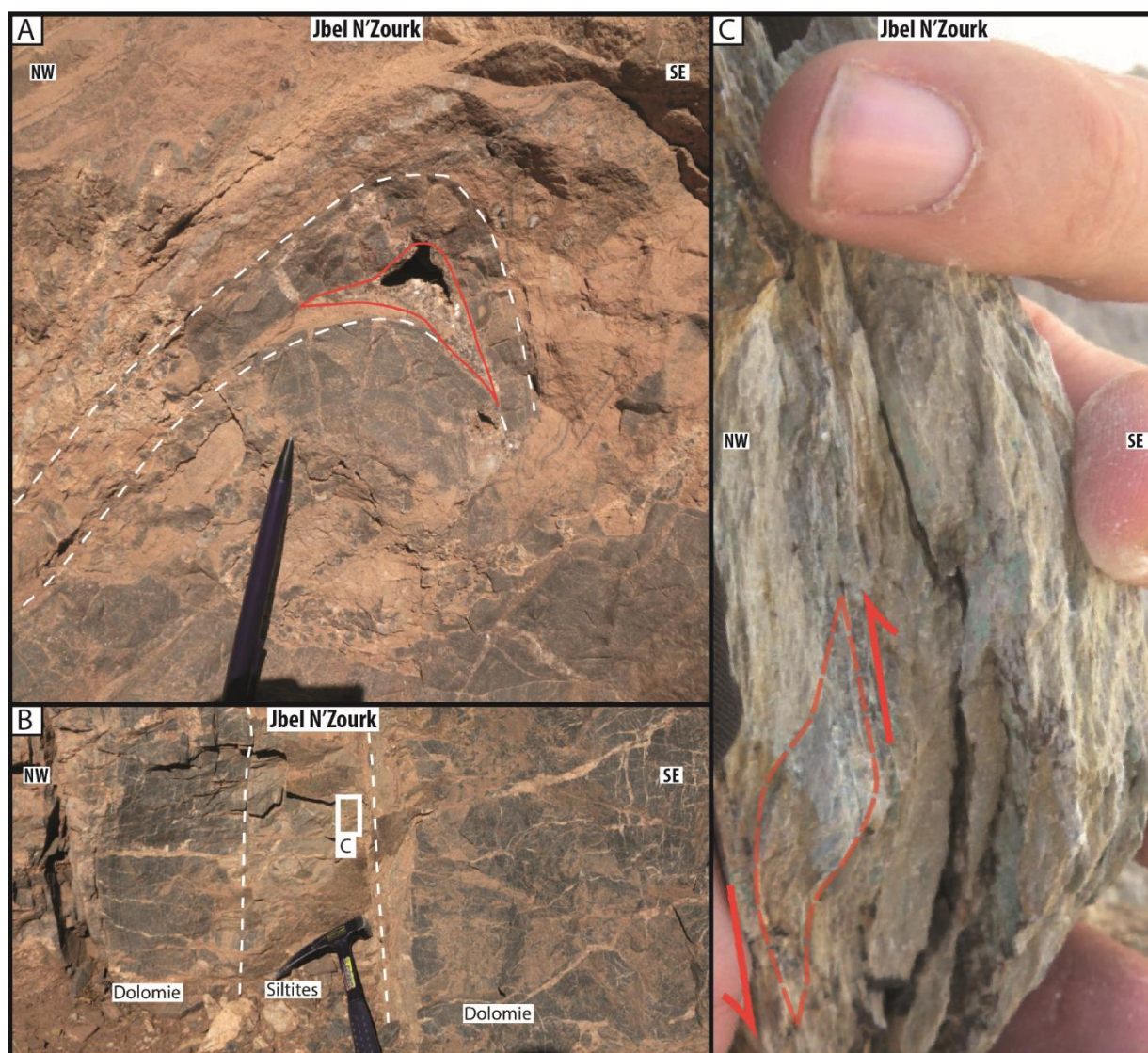


Figure 56 ; Planche photographique illustrant les relations entre les veines du stockwork cuprifère et les plis de la « folded-band » (prise au niveau du gisement de Jbel N'Zourk) : A, anticlinal avec une ouverture en « saddle reef » minéralisée au niveau de la charnière ; B, flanc sud-est du pli de la figure A montrant des veines perpendiculaire au flanc ; C, zoom sur un échantillon orienté du niveau de siltites intercalé entre les deux bancs de dolomies du flanc de plis de la figure B, une sigmoïde indiquant un jeu inverse est observée.

3.2.2.2. Les plis NE-SW

Les plis de direction N20 à N70 ont une amplitude pluri-métrique à plurikilométrique. Ce sont des plis isopaques et ouverts (**Fig. 57**). Ils peuvent être associés spatialement à des chevauchements de même direction comme cela est le cas au niveau du gisement de Jbel Laassel (**Fig. 57A**). Aucune relation de recoupement ou de type boîte à œuf n'a été observée à l'intersection entre ces deux directions de plissement.

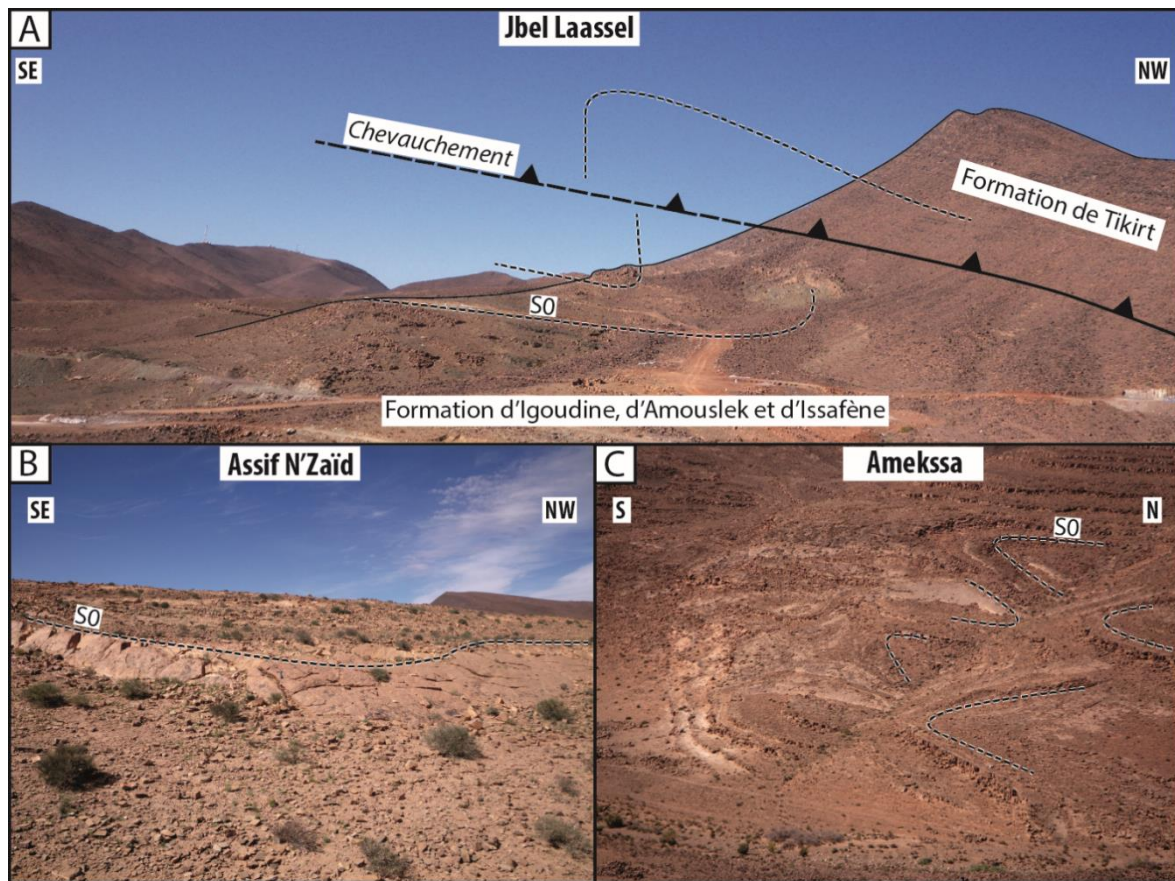


Figure 57 : Planche photographique des plis de directions N30 : A, Vue du synclinal kilométrique associé au chevauchement à vergence SE qui affecte le secteur du gisement de Jbel Laassel ; B, pli ouvert à proximité de l'indice d'Assif N'Zaïd ; C, plis ouvert à proximité de l'indice d'Amekssa.

3.2.3. Les failles

Les quatre sites de type « folded-band » sont associés à des failles cassantes, senestre et inverse, d'extension déca-kilométrique (**Fig. 31**). Par ailleurs ces failles sont systématiquement localisées au centre des « folded-band » (**Fig. 48, 49, 52, 54 et 58**). Elles possèdent une direction comprise entre N130 et N150 et sont verticales à sub-verticales avec un pendage de 80 à 89° vers l'Est ou le Nord-Est. Elles peuvent être associées à d'autres failles de même direction (**Fig. 53C**) mais d'extension limitée. En tranchée, ces failles majeures se matérialisent par des niveaux de brèches polygéniques métriques à pluri-métriques (**Fig. 59**). En effet, ces brèches sont composées de fragments de taille hétérogène, millimétrique à métrique, et de natures lithologiques différentes : siltites vertes ou beige, dolomies, pélites (**Fig. 59**). La matrice est composée de cette même diversité lithologique, mais broyée, et ce jusqu'au stade de la gouge (**Fig. 59A et C**).

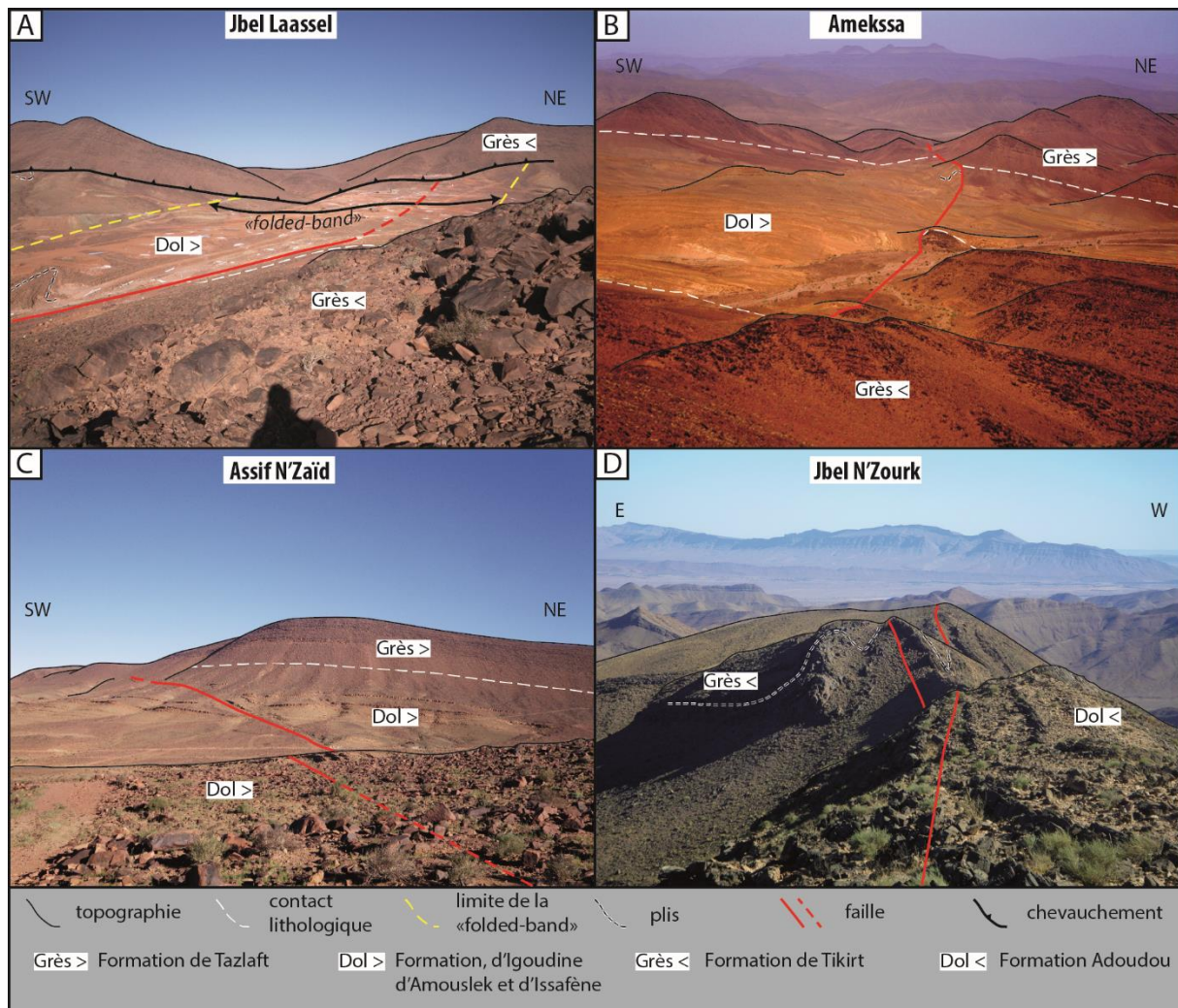


Figure 58 : Planche photographique montrant les failles majeures des différents sites de type « folded-band » : A, Jbel Laassel ; B, Amekssa ; C, Assif N'Zaïd ; D, Jbel N'Zourk.

Les fragments sont souvent anguleux et ils peuvent être en contact les uns avec les autres. Certains fragments ont notamment été peu déplacés et ils forment alors des zones de brèche assimilable à des brèches en puzzle ou « mosaïque » (**Fig. 59A, B et C**). Un fragment pluri-métrique de grès appartenant à la formation de Tikirt, sous-jacente, a été observé au sein de cette brèche, au niveau de l'indice d'Assif N'Zaïd (**Fig. 59D**). Des fragments, déjà cimentés par du quartz au sein d'une brèche puzzle, peuvent former un seul et même fragment entouré et « isolé » par de la gouge indiquant un caractère pluri-épistodique de la formation de cette brèche. Localement des veines de quartz et de carbonates sont présentes en remplissage des fissures au niveau des épontes des zones bréchiques (**Fig. 59A**). Ceci atteste probablement d'une fragmentation assistée par les fluides.

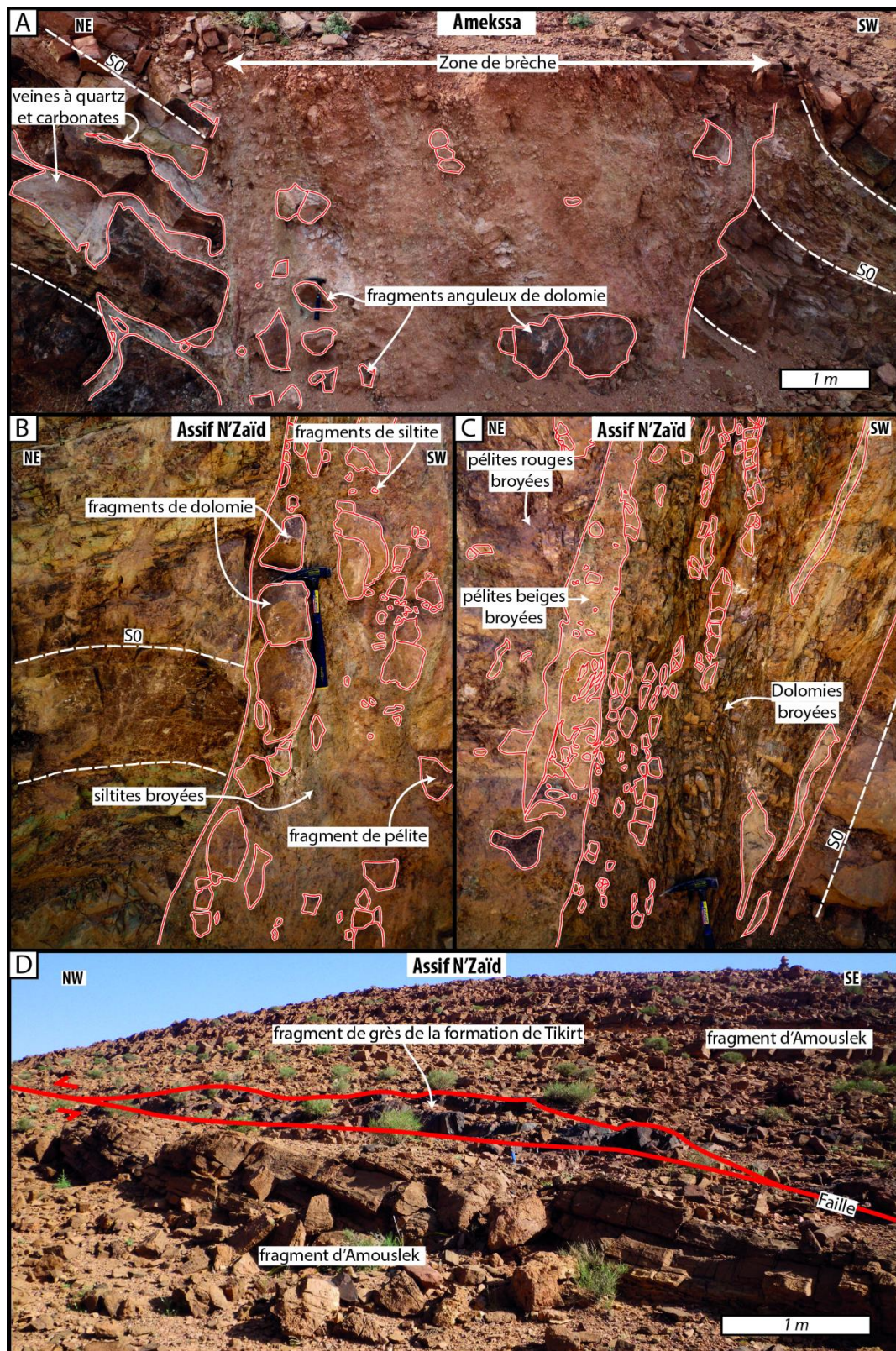


Figure 59 : Planche photographique : A, zone de brèche dans une tranchée de l'indice d'Amekssa ; B et C, zone de brèche dans la tranchée de la figure XC de l'indice d'Assif N'Zaïd ; D, fragment pluri-métrique de grès de la formation de Tikirt au sein de la structure faillée d'Assif N'Zaïd.

3.2.4. Microstructures

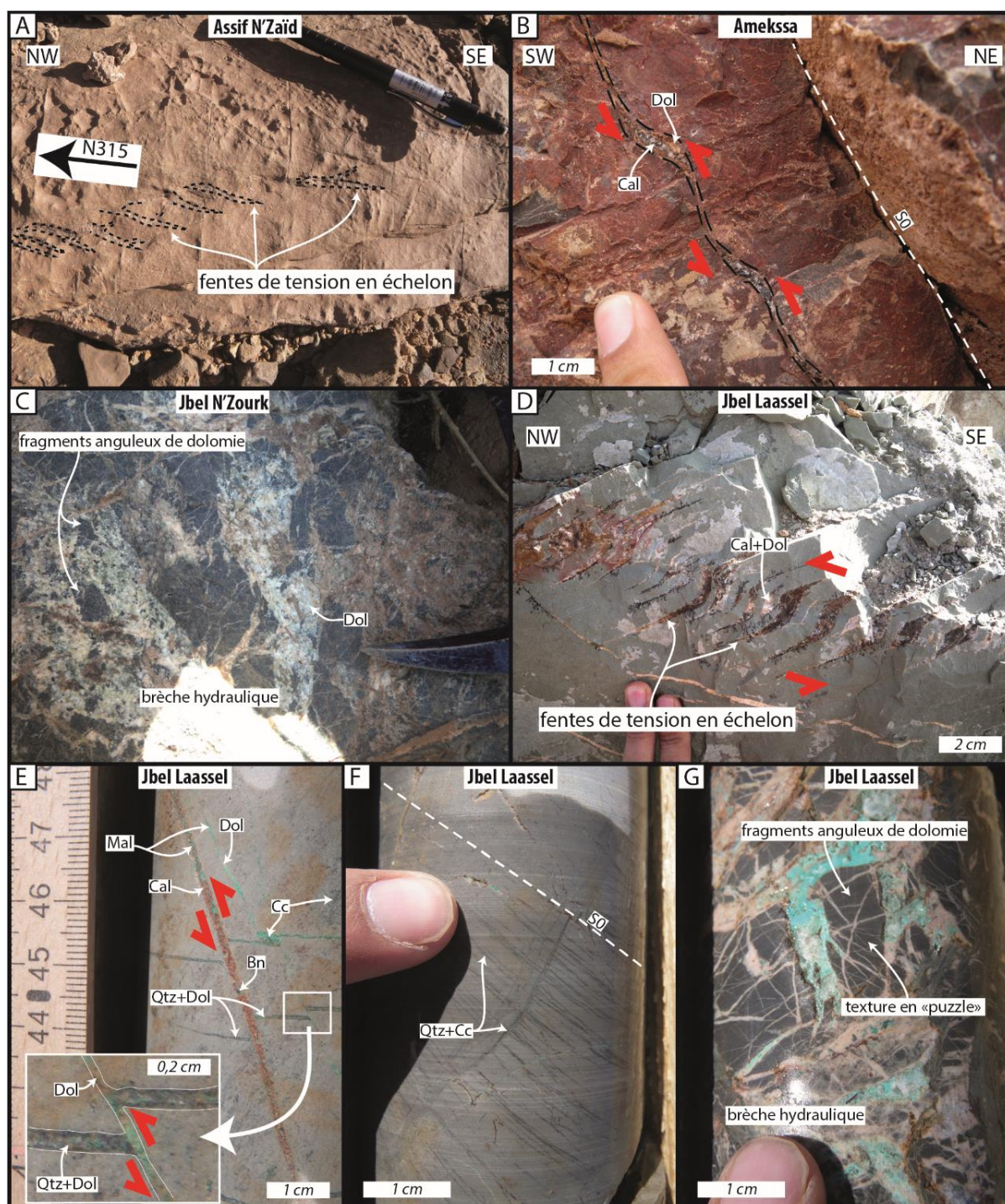


Figure 60 : Planche photographique des différentes textures et micro-structures observées sur les indices de type « folded-band » : A, fentes de tension à remplissage de quartz observées sur la charnière d'un anticlinal de la « folded-band » de l'indice d'Assif N'Zaïd ; B, micro-faille parallèle au plan de S_0 , à remplissage de dolomite et de calcite, de l'indice d'Amekssa ; C, texture de brèche hydraulique de l'indice de Jbel N'Zourk ; D, fentes de tension en échelon, à remplissage de carbonate, du gisement de Jbel Laassel ; E, recoupement de veines en mouvement apparent inverse sur un échantillon de sondage carotté du gisement de Jbel Laassel ; F, stockwork à quartz et chalcocite sécant sur les plans de S_0 et percolant dans ces derniers sur un échantillon de sondage carotté du gisement de Jbel Laassel ; G, texture de brèche hydraulique sur un échantillon de sondage carotté du gisement de Jbel Laassel.

Des micro-structures sont présentes au sein des minéralisations de type « folded-band » :

- des fentes de tension à remplissage de quartz et/ou carbonates sont présentes sur les charnières des anticlinaux (**Fig. 60A**) ou sur les flancs de plis (**Fig. 60D**),
- des microfailles à mouvement apparent inverse formant des pull-apart, à remplissage de quartz et/ou de carbonates (**Fig. 60B**),
- des textures de brèches hydrauliques, à fragments anguleux en puzzle (**Fig. 60C et G**),
- des veines à quartz et dolomite recoupées, via un mouvement apparent inverse, par des veines à calcite (**Fig. 60D**),
- des stockwork composés de veines, à quartz et sulfures de cuivre, sécantes sur les plans de S0 et ré-ouvrant ces derniers (**Fig. 60E**).

3.2.5. Les données structurales

Comme décrit précédemment, deux familles de plis sont distinguables : les plis NW-SE parallèles à la « folded-band » et les plis NE-SW normaux à la « folded-band ». Les plans de stratification S0 pour les occurrences cuprifères de Jbel Laassel, d'Amekssa et d'Assif N'Zaïd sont dispersés selon un plan perpendiculaire aux axes de plis de la « folded-band », 20°/N310° en moyenne soit des axes à faible plongement (**Fig. 61A et B**). Ces plis NW-SE ont des plans axiaux sub-verticaux ou à pendage de 75 à 30° vers le Nord-Est pour l'ensemble des indices de type « folded-band » (**Fig. 61**). La famille de plis de direction NE-SW possède une orientation axiale moyenne sur l'ensemble des sites de 30°/N40-60° (**Fig. 61**). Les plans axiaux de cette famille de plis ont un pendage compris entre 90° et 40° vers le Nord-Ouest (**Fig. 61**).

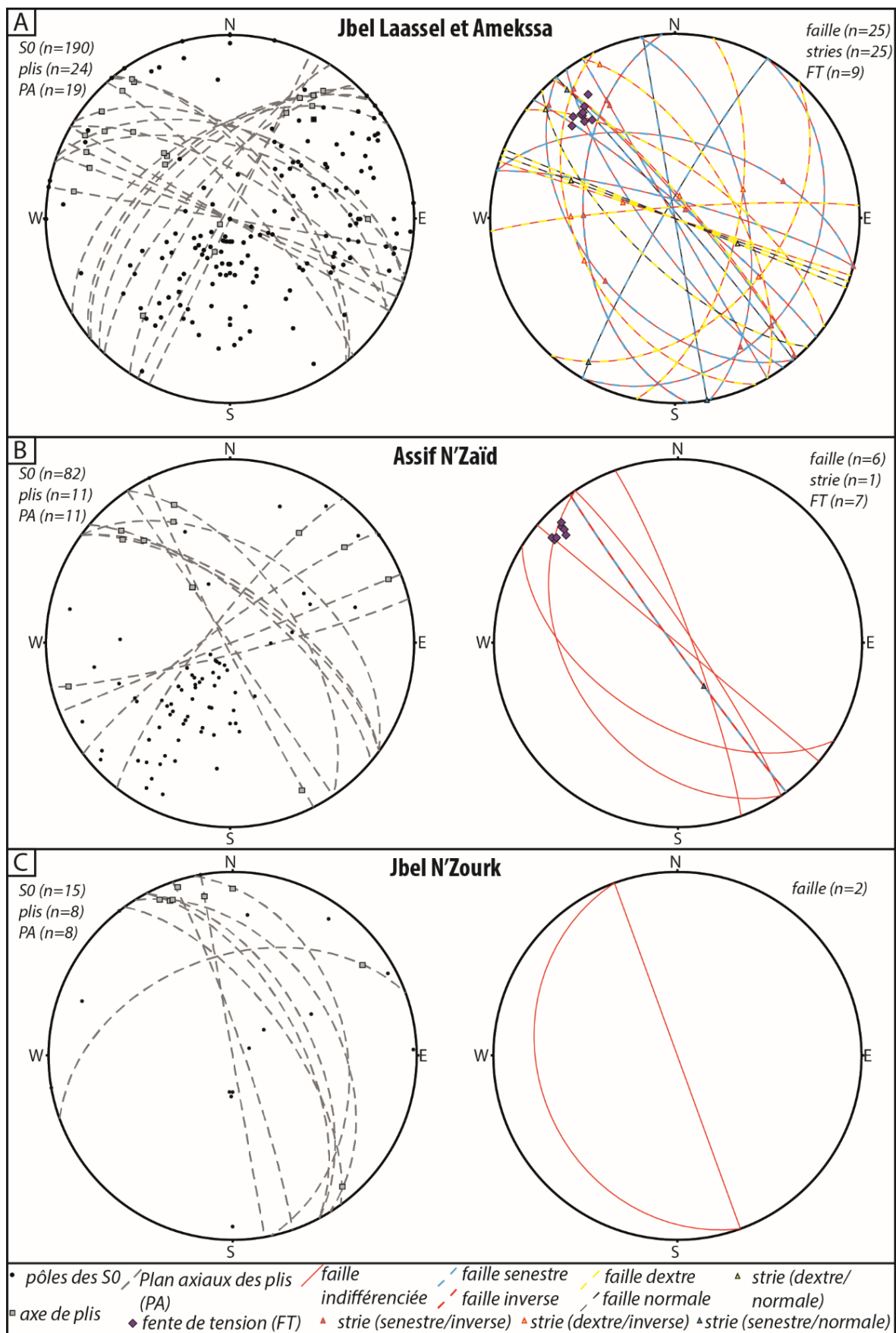


Figure 61 : Canevas de Schmidt avec les projections (hémisphère inf.) des données structurales des sites minéralisés de type « folded-band », avec « n » le nombre de mesures.

Plusieurs failles ont été observées, notamment au niveau du gisement de Jbel Laassel dont l'exploitation en carrière a facilité les mesures de stries. Les failles inverses-senestres sont majoritaires et possèdent une direction moyenne N140°E avec un pendage variant de 90° à 60° vers le SO ou le NE (**Fig. 61A et B**). Les failles dextres-inverses possèdent une direction moyenne N110° avec un pendage généralement vertical à sub-vertical (**Fig. 61A**). Les failles normales-senestres ou normales-dextres sont peu présentes (**Fig. 61A**). Ces données cinématiques sur ces failles ont permis de revenir au meilleur tenseur de contrainte possible (**Fig. 62**) par la méthode proposée par (Delvaux and Sperner, 2003) (méthode d'inversion optimisée). Les résultats sont présentés pour tous les sites et stations comportant des plans de faille avec des stries et une cinématique claire sur la **Figure 61**. L'ensemble de ces failles correspondent à un système en compression avec sigma 1 orienté 11°/N131, sigma 2 15°/N38 et sigma 3 71°/N256 (**Fig. 63**).

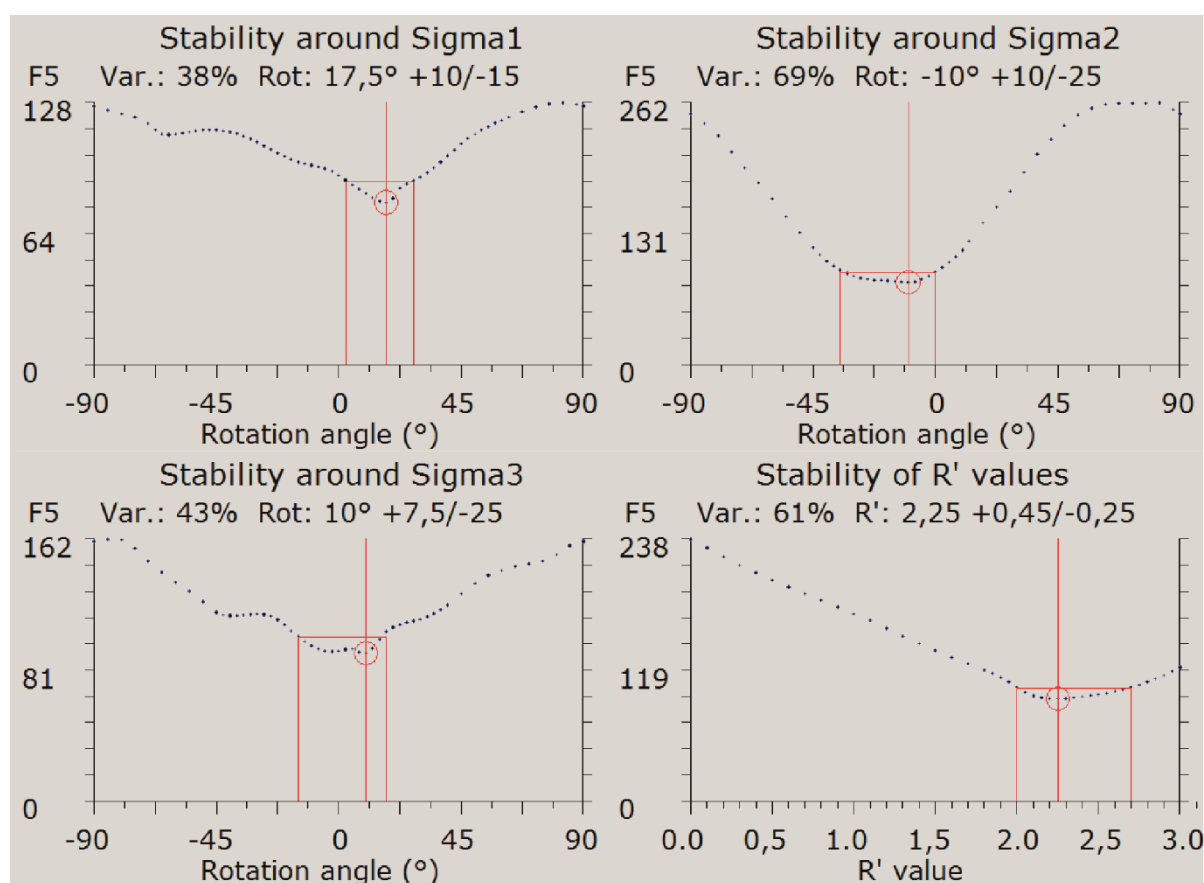


Figure 62 : Graphiques binaires montrant les résultats de l'optimisation des contraintes pour les contraintes sigma 1, 2, 3 et pour la valeur de stabilité de R'. Chaque graphique représente les valeurs d'optimisation de la fonction F5 en fonction de l'angle de rotation des contraintes. Une régression linéaire a été effectuée, la valeur minimale d'optimisation de F5 indique le meilleur angle de rotation des contraintes optimisées. Ces graphiques sont le résultat de l'analyse des données de 25 plans de failles striées mesurés dans la carrière d'exploitation du gisement de Jbel Laassel à l'aide du logiciel Wintensor V5.8.2 (Delvaux and Sperner, 2003).

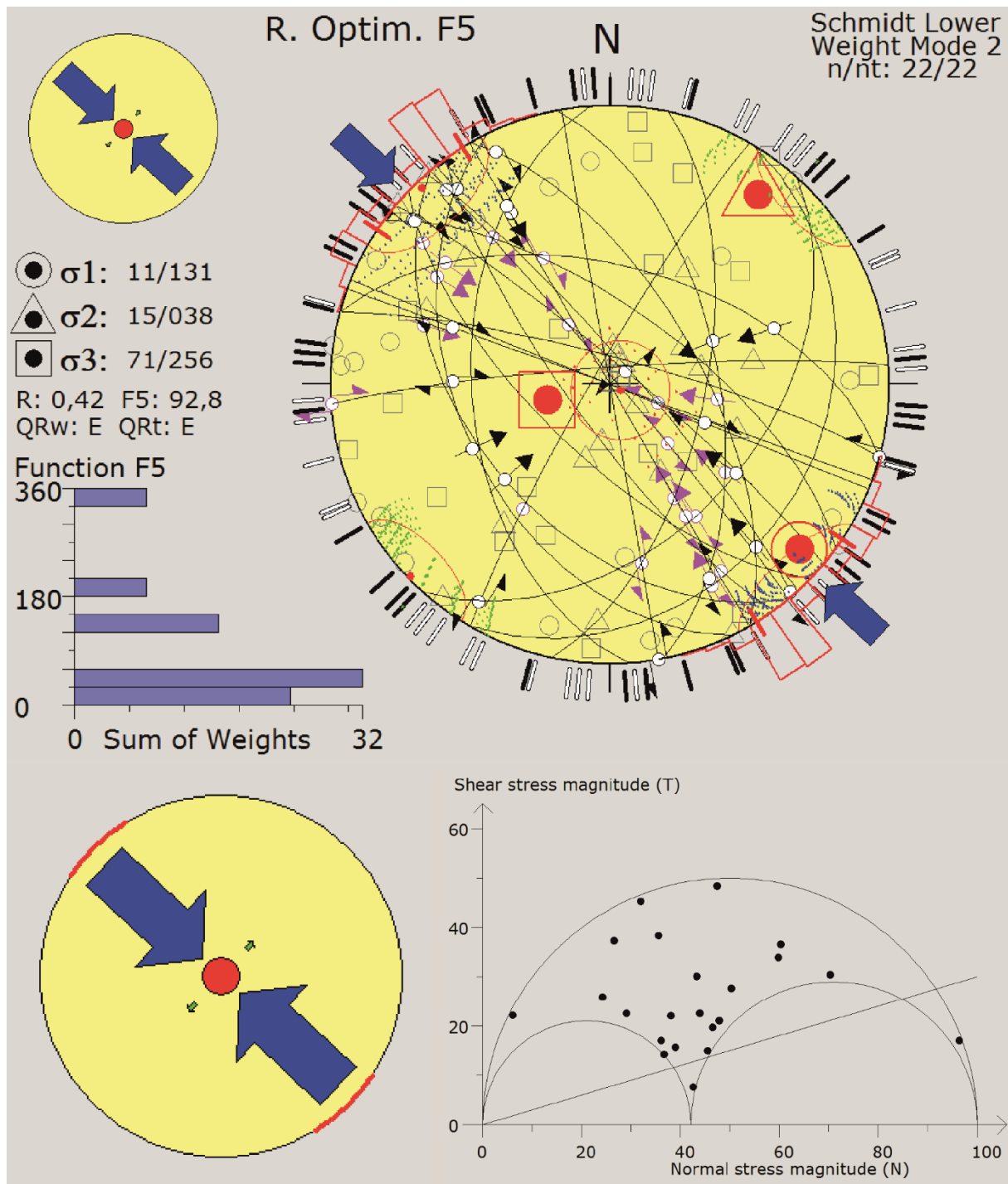


Figure 63 :Planche graphique des résultats du calcul des contraintes optimisées par le logiciel Wintensor V5.8.2 (Delvaux and Sperner, 2003) sur l'analyse des données de 25 plans de failles striées mesurés dans la carrière d'exploitation du gisement de Jbel Laassel. Les flèches bleues représentent sigma 1.

3.2.6. Textures et structures macroscopiques

3.2.6.1. *Jbel Laassel et Amekssa*

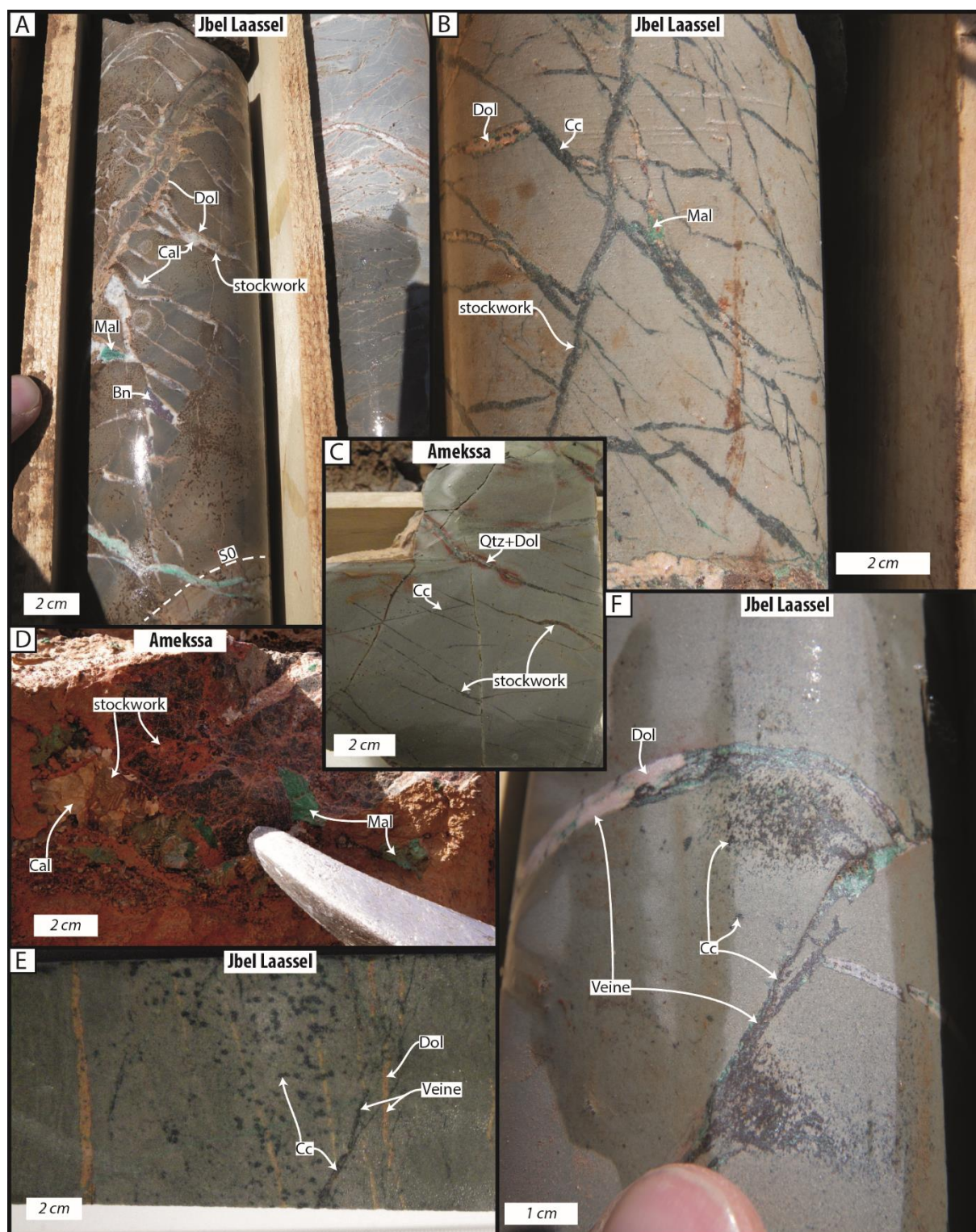


Figure 64 : Planche photographique des textures du gisement de Jbel Laassel et de l'indice d'Amekssa : A, stockwork à calcite et dolomite sur un échantillon de sondage carotté ; B, stockwork à dolomite et chalcocite sur un échantillon de sondage carotté ; C, stockwork à quartz, dolomite et chalcocite ; D, stockwork à calcite et malachite ; E, minéralisation

disséminée de chalcocite d'un échantillon de sondage carotté ; F, minéralisations disséminées à chalcocite connectées à des veines du stockwork à chalcocite d'un échantillon de sondage carotté.

La minéralisation de Jbel Laassel et d'Amekssa est présente essentiellement sous la forme d'un stockwork à quartz, dolomite, calcite, chalcocite et malachite (**Fig. 64A, B, C et D**). Localement, la minéralisation cuprifère se présente sous la forme de mouches de chalcocite disséminées dans l'encaissant (**Fig. 64E**). Ces disséminations peuvent être intimement connectées à des veines du stockwork de même composition minéralogique (**Fig. 64F**).

3.2.6.2. Assif N'Zaïd

La minéralisation de l'indice d'Assif N'Zaïd est présente sur le terrain essentiellement sous la forme d'un stockwork à dolomite, calcite, bornite et malachite (**Fig. 65A et B**). Ces veines peuvent être sécantes sur la stratification ou parallèles à celle-ci (**Fig. 65A**).

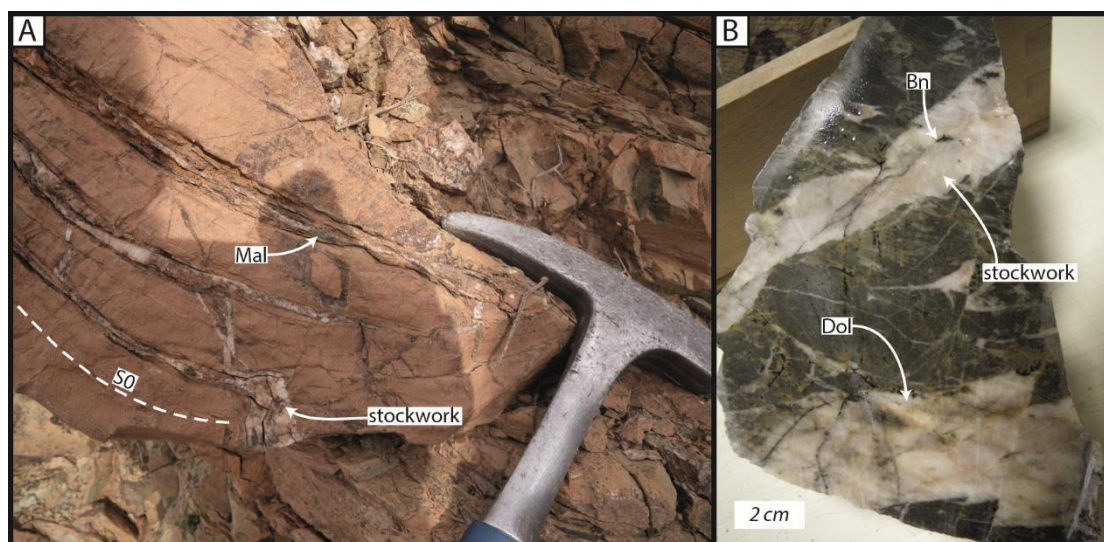


Figure 65 : Planche photographique des textures observées au niveau de l'indice d'Assif N'Zaïd : A, stockwork à calcite et malachite recoupant et réempruntant les plans de stratification d'un banc de dolomie ; B, stockwork à dolomite et bornite.

3.2.6.3. Jbel N'Zourk

La minéralisation du gisement de Jbel N'Zourk est présente sur le terrain essentiellement sous la forme d'un stockwork à dolomite, calcite, chalcocite, bornite et malachite (**Fig. 66A et C**). Localement des brèches à fragments anguleux d'encaissant dolomitiques cimentés par des sulfures de cuivre et de la malachite sont présentes dans le plan de stratification (**Fig. 66B**). Des mouches de sulfures de cuivre disséminées sont également présentes (**Fig. 66D**) et elles peuvent être associées à des veines du stockwork (**Fig. 66E**).

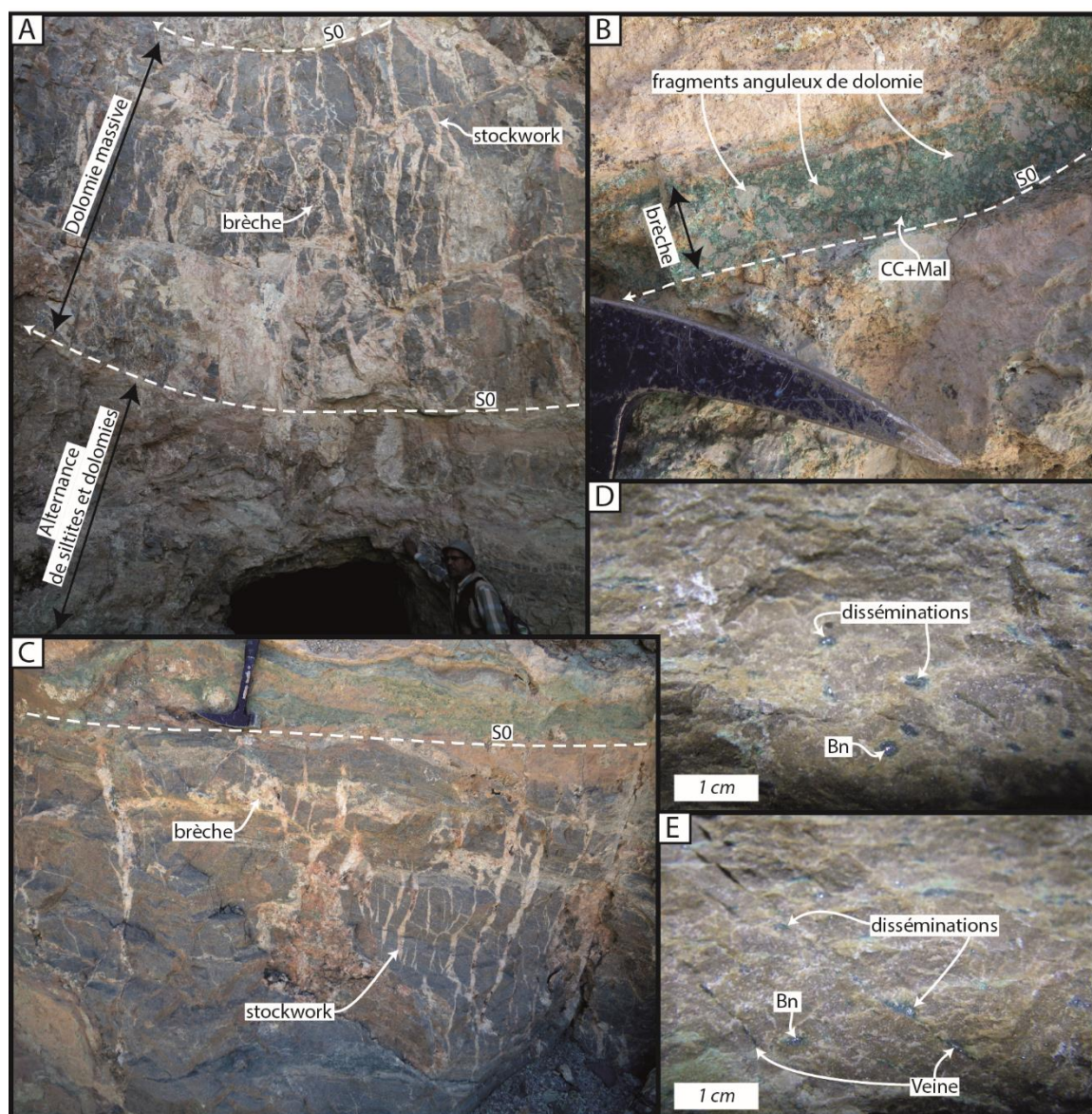


Figure 66 : Planche photographique des textures observées au niveau du gisement de Jbel N'Zourk.

3.2.7. Orientation des veines du stockwork

Sur l'ensemble des indices de types « folded-band », la famille de veine de direction N140 est la plus abondante (**Fig. 67**). Ces veines sont soit verticales ou bien avec un pendage moyen de 60° vers le Sud-ouest ou le Nord-Est (**Fig. 67**). Une deuxième famille de direction N25° est présente de manière plus ou moins importante au sein de l'ensemble des indices (**Fig. 67**).

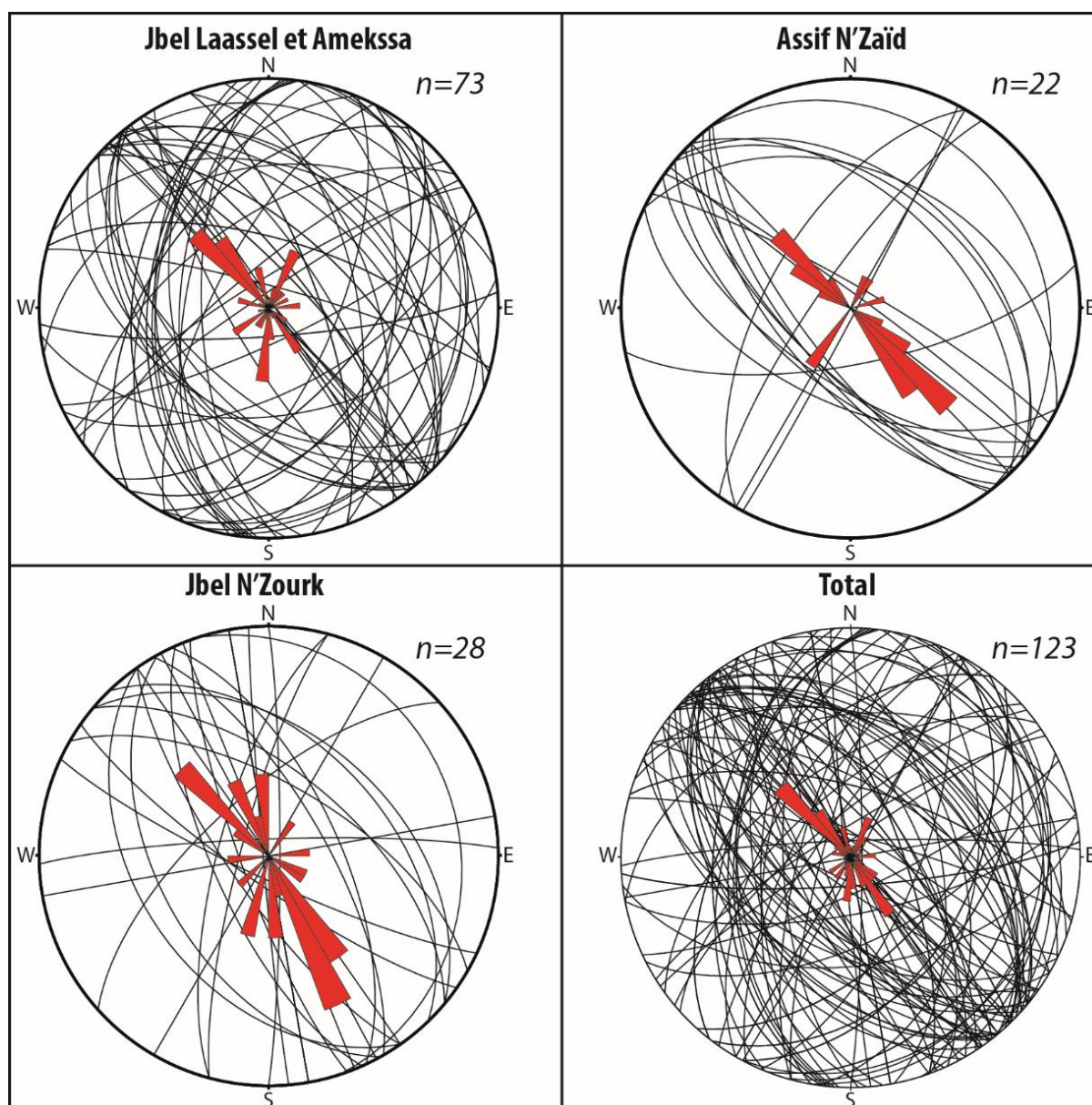


Figure 67 : Canevas de Schmidt avec les projections (hémisphère inférieur), des données d'orientation des veines des stockwork minéralisés en cuivre des différents sites de type « folded-band », avec « n » le nombre de mesures (classe de 10°, 30 % des données sont représentées du centre à la périphérie du canevas).

3.3. GEOMORPHOLOGIE ET DEFORMATION DE LA COUVERTURE

Les qualités exceptionnelles d'affleurement de l'Anti-Atlas permettent d'effectuer de nombreuses observations en interprétant les paysages. Ainsi, plusieurs descriptions de panorama ont été réalisées (**Fig. 68**), notamment dans le but de comparer les modes de déformation de la couverture avec ceux décrit dans l'Anti-Atlas occidental mais aussi de comprendre l'extension des failles associées à la minéralisation de type « folded-band ».

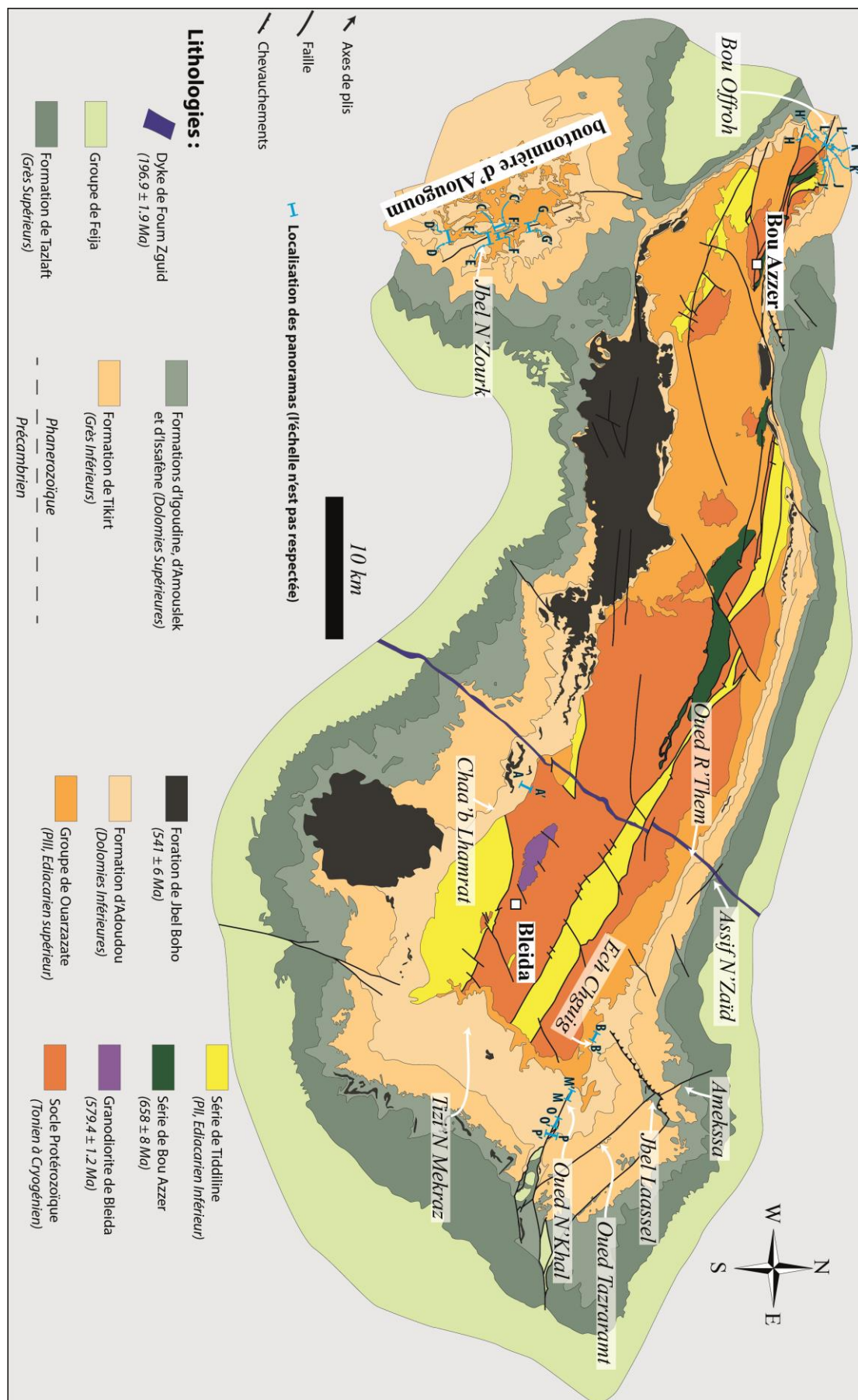


Figure 68 : Carte géologique de la boutonnière e Bou Azzer-El Graara avec la localisation des panoramas réalisés.

3.3.1. Les décollements

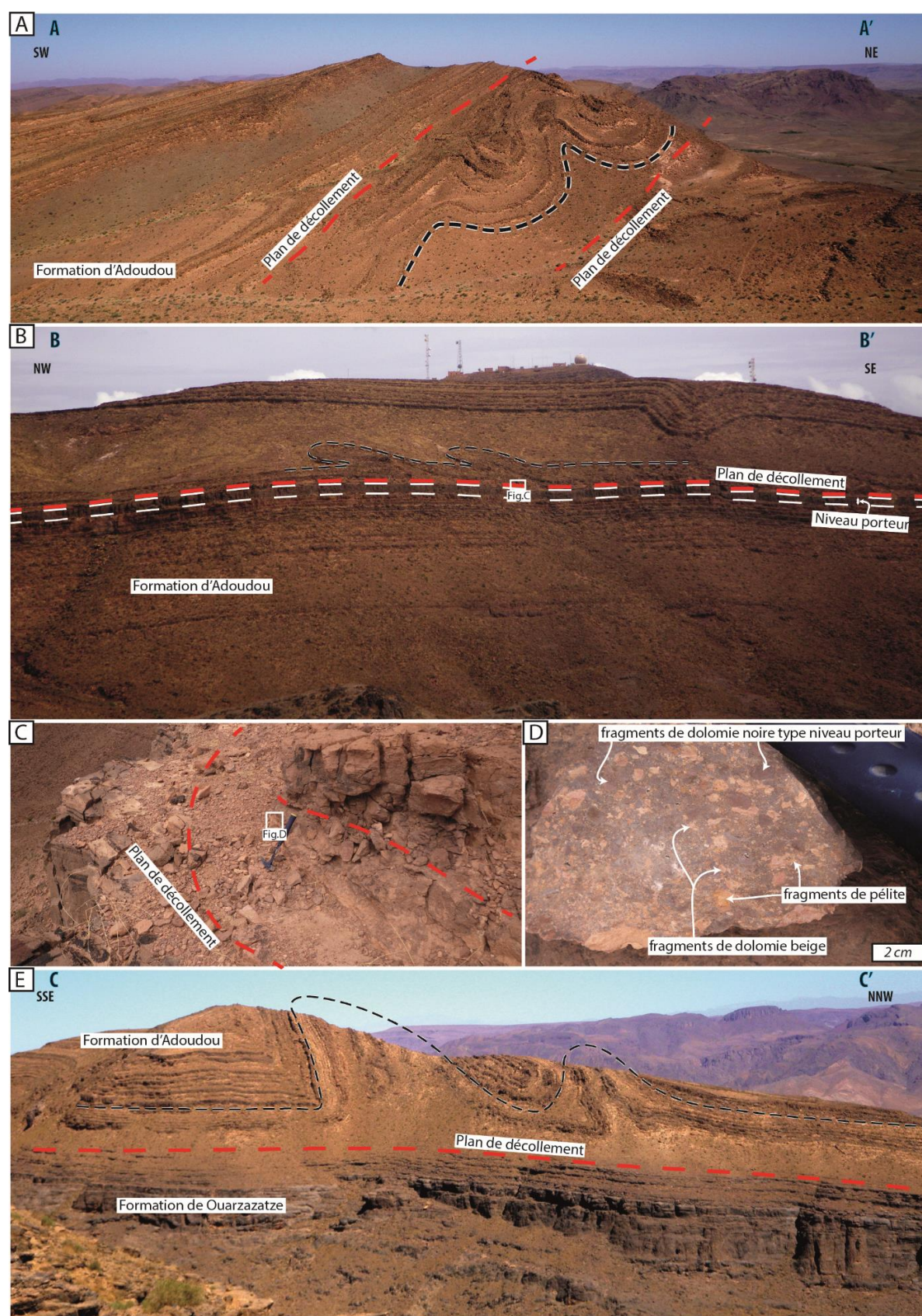


Figure 69 : Planche photographique (la localisation des paysages est donnée figure 68). A, Vue des niveaux de décollement au sein de la formation d'Adoudou au nord de l'indice de Chaa'b Lhamrat ; B, Vue du niveau porteur de l'indice d'Ech

Chguig et d'un niveau de décollement au sein de la formation d'Adoudou ; C et D, zoom sur le niveau de brèche marquant le niveau de décollement repéré sur la figure B ; E, Vue du niveau de décollement entre la formation de Ouarzazate et la formation d'Adoudou situé au nord-ouest du gisement de Jbel N'Zourk.

Au sein de la formation d'Adoudou, plusieurs indicateurs de niveau de décollement ont pu être observés (**Fig. 69 et 70**). Ces décollements peuvent être localisés à la base et au toit d'un niveau plissé de cette formation (**Fig. 69A**). Ils sont également présent localement au niveau du toit du niveau porteur associé à la minéralisation de type « stratabound » (**Fig. 69B**) comme c'est le cas à l'ouest de l'indice d'Ech Chguig. Le niveau porteur ne semble pas être macroscopiquement minéralisé en cuivre à l'endroit où ce décollement a été observé. Ce niveau de décollement est matérialisé par un niveau de brèches métrique à pluri-métriques (**Fig. 69C**) à fragments anguleux composés de l'ensemble des lithologies de la formation d'Adoudou (pélites, siltites et dolomies) (**Fig. 69D**). En revanche, aucune évidence de mouvement, tel des plans striés, n'a été observée au niveau de ces décollements. Un niveau de décollement a été observé à la base de la formation d'Adoudou, entre cette dernière et la formation de Ouarzazate (**Fig. 69E et F**). Ce niveau de décollement est marqué par des plis décamétriques à métriques au sein de la formation d'Adoudou (**Fig. 69E et F**). Au niveau de la charnière de l'anticlinal formant la boutonnière d'Alougoum, au sud-ouest de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, un pli en « M » s'est formé au-dessus du niveau de décollement entre la formation d'Adoudou et celle de Ouarzazate (**Fig. 70**).



Figure 70 : Photographie du niveau de décollement de la formation d'Adoudou sur le groupe de Ouarzazate au niveau de la charnière de l'anticlinal de la boutonnière d'Alougoum (la localisation du paysage est donnée **figure 68**).

3.3.2. La faille de Jbel N'Zourk

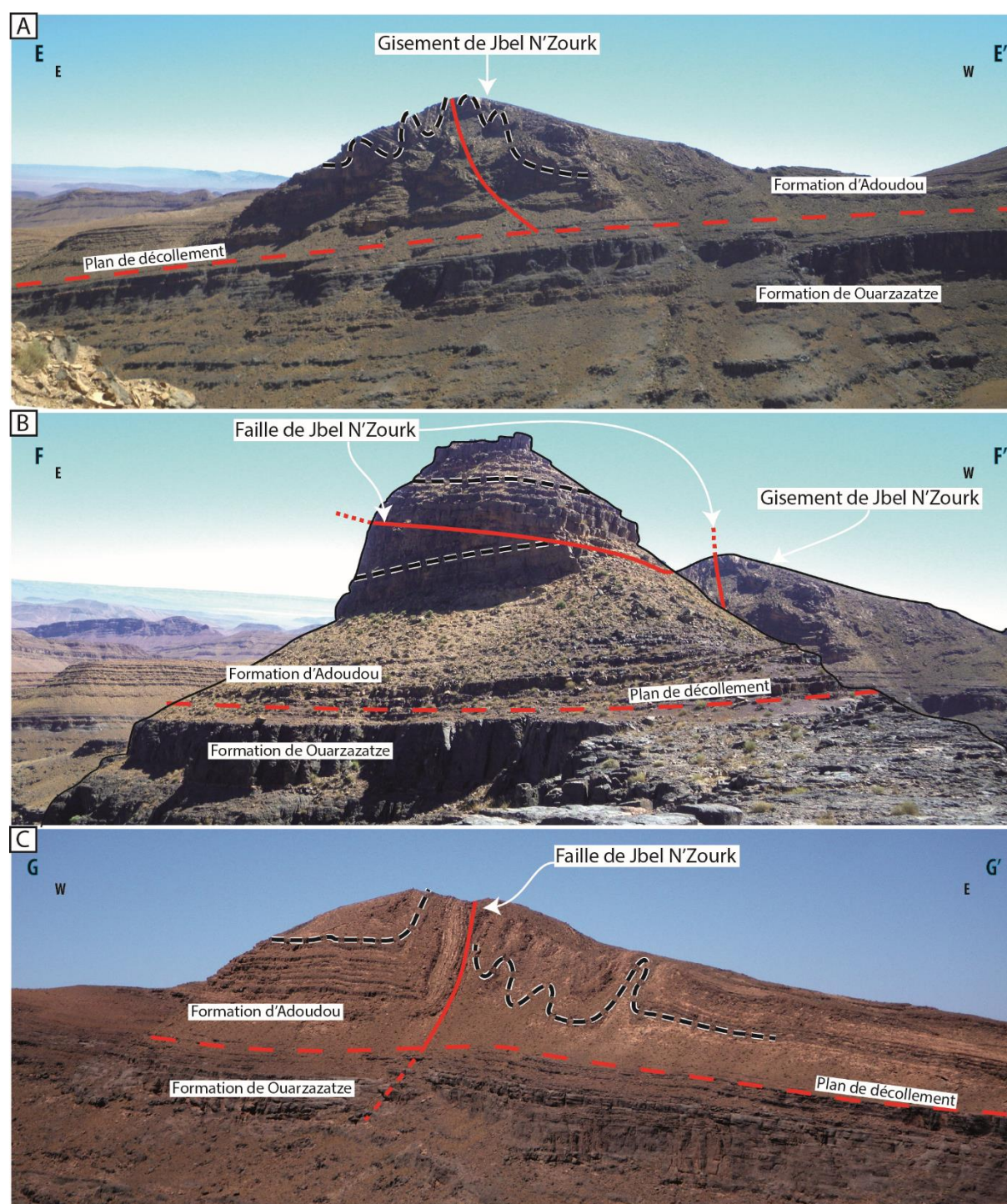


Figure 71 : Planche photographique de la faille de Jbel N'Zourk et de son extension vers le nord, respectivement du sud vers le nord : A, B et C (la localisation des paysages est donnée figure 68).

La faille de Jbel N'Zourk associée à la « folded-band » de ce gisement a été suivie sur 5 kilomètres au nord du gisement afin de déterminer sa relation avec l'interface entre les formations d'Adoudou et de Ouarzazate. Cette faille semble parfois être recoupée par ce décollement (**Fig. 71A**), parfois elle paraît s'amortir sur ce même niveau de décollement (**Fig.**

71B). Localement des indices de prolongement dans les unités sous-jacentes sont observés (**Fig. 71.C**). En revanche la « folded-band » continue sur toute la zone du passage de la faille et un stockwork cuprifères est présent comme cela a été signalé par Leblanc (1975).

3.3.3. Le passage de l'Accident Majeure de l'Anti Atlas dans la couverture néoprotozoïque à cambrienne

A proximité des zones de passage de l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas (AMAA), les niveaux de décollements décrits précédemment sont présents et forment localement des structures en duplex à la limite de la formation d'Adoudou et de Ouarzazate (**Fig. 72A**). Au nord-ouest de Bou Azzer la couverture forme dans le paysage une nappe chevauchante sur la formation de Ouarzazate (**Fig. 72B**). Au nord du secteur de Bou Offroh (**Fig. 68**), la formation de Ouarzazate semble montrer un « bombement » associée à des failles, à jeu apparent inverse, dont une semble passer à travers la formation d'Adoudou (**Fig. 72C**). Des plis sont présents au niveau de ce « bombement » dans la formation d'Adoudou (**Fig. 72C**). Au niveau du secteur de Bou Offroh l'AMAA se traduit par une faille passant de la formation de Ouarzazate à la formation d'Adoudou (**Fig. 73A**) et continuant en carte dans le socle Protérozoïque (**Fig. 68**). De part et d'autre de la faille des plis dysharmoniques sont présents dans la formation d'Adoudou ainsi que des niveaux de décollement intra-formation d'Adoudou et à la transition entre cette formation et celle de Ouarzazate (**Fig. 73A**). Le long de cette faille, des fissures à malachite sont présentes au sein de la formation d'Adoudou comme cela a été signalé par Leblanc, (1975). A l'autre extrémité de la boutonnière, c'est au niveau de la zone de Oued N'Khal que l'AMAA passe dans la couverture (**Fig. 68**). Ce passage est marqué par une faille, de jeux apparent inverse, mettant en contact le socle protérozoïque sur les formations de Ouarzazate et d'Adoudou (**Fig. 73B et C**). En arrière-plan, dans le paysage de la **figure 73B**, une zone de « folded band » semble être recoupée par un décollement au sein de la formation d'Adoudou. Plus à l'Est, en suivant l'AMAA au sein de la formation d'Adoudou, plusieurs lambeaux de pélites verte appartenant au groupe de Feïja sont en contact anormal avec la formation d'Adoudou (**Fig. 68 et 74**). Ces contacts correspondent à des failles pouvant être marquées par des zones de brèches puissantes de plusieurs mètres. Des traces de malachite, dans des plans de fractures, ont été observées au sein des pélites vertes de l'un de ces lambeaux du groupe de Feïja, sans observer de sulfures (**Fig. 74A**). Quatre plans de failles striés ont pu être mesurés au niveau du passage de l'AMAA aux deux extrémités de la boutonnière (**Fig. 75**).

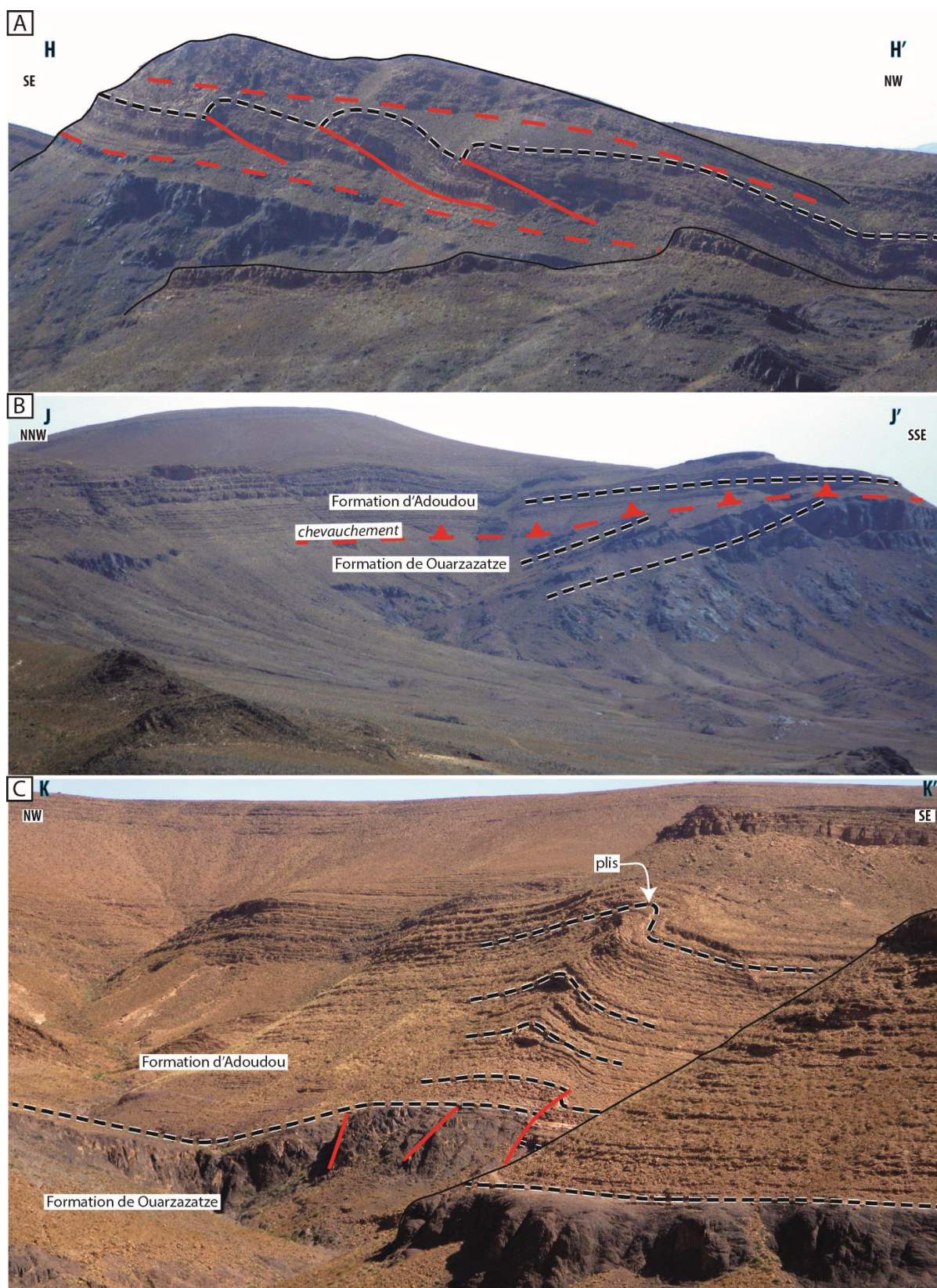


Figure 72 : Planché photographiques des panoramas réalisés depuis la zone de Bou Offroh (la localisation des paysages est donnée **figure 68**) : A, chevauchement en duplex au sein de la formation d'Adoudou et niveau de décollement au sein de la

formation d'Adoudou mais aussi sur la formation de Ouarzazate, situé au sud de la zone de Bou Offroh ; B, Vue d'un chevauchement de la formation d'Adoudou sur la formation de Ouarzazate, situé au nord-ouest du secteur de la mine de Bou Azzer ; C, Vue de failles passant de la formation de Ouarzazate à la formation d'Adoudou dans laquelle se sont formés des plis (nord de la zone de Bou Offroh).

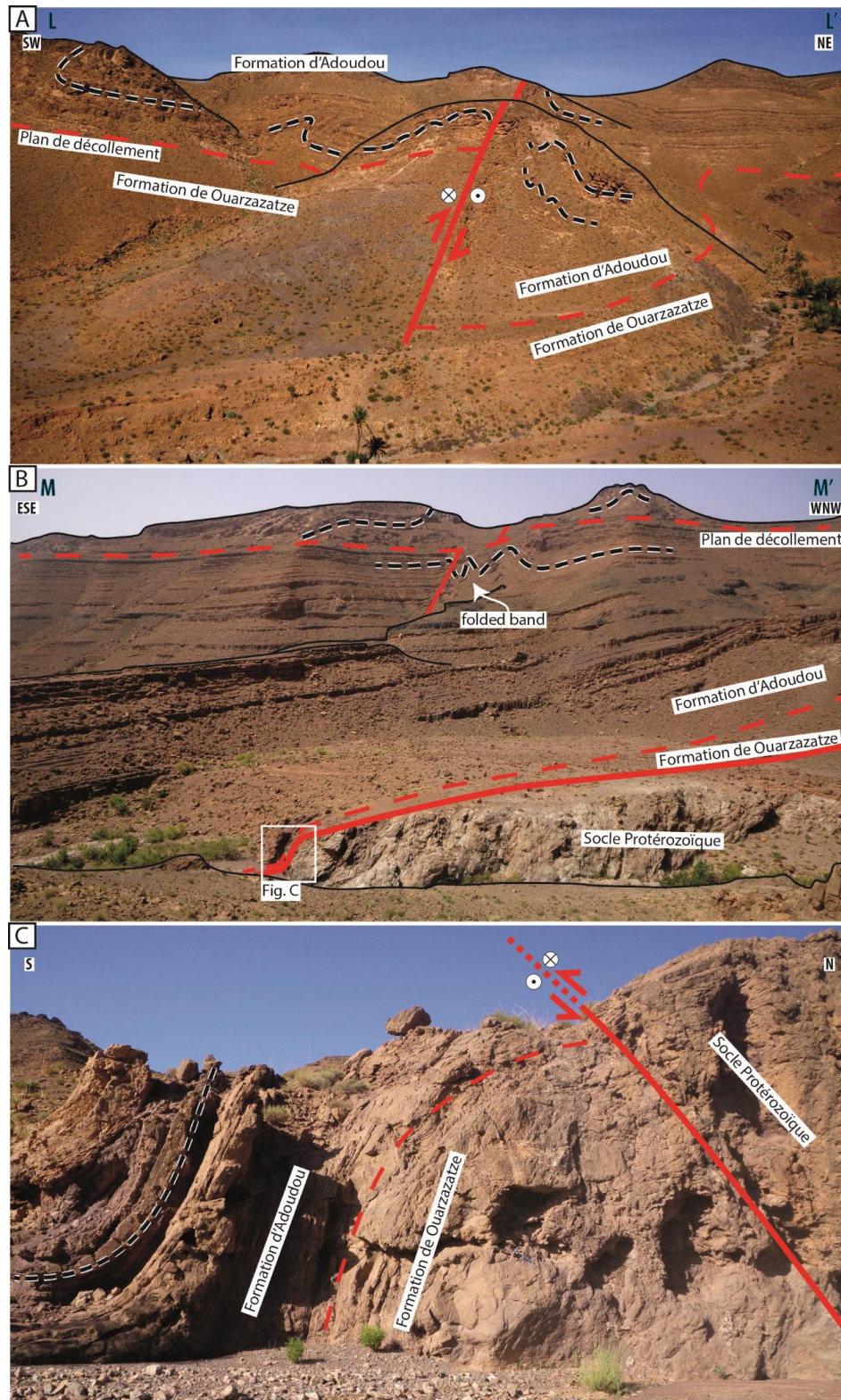


Figure 73 : Planche photographique des zones de passages de l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas dans la couverture néoprotézoïque à cambrienne (la localisation des paysages est donnée **figure 68**) : A, faille passant de la formation de

Ouarzazate à la formation d'Adoudou, plissement de celle –ci et niveau de décollement au niveau de la zone de Bou Offroh; B, faille passant du socle protérozoïque à la formation de Ouarzazate et à la formation d'Adoudou, folded band dans la formation d'Adoudou recoupé par un décollement au niveau de la zone de Oued N'Khal ; C, faille mettant en contact le socle protérozoïque et la formation de Ouarzazate de la zone de Oued N'Khal.

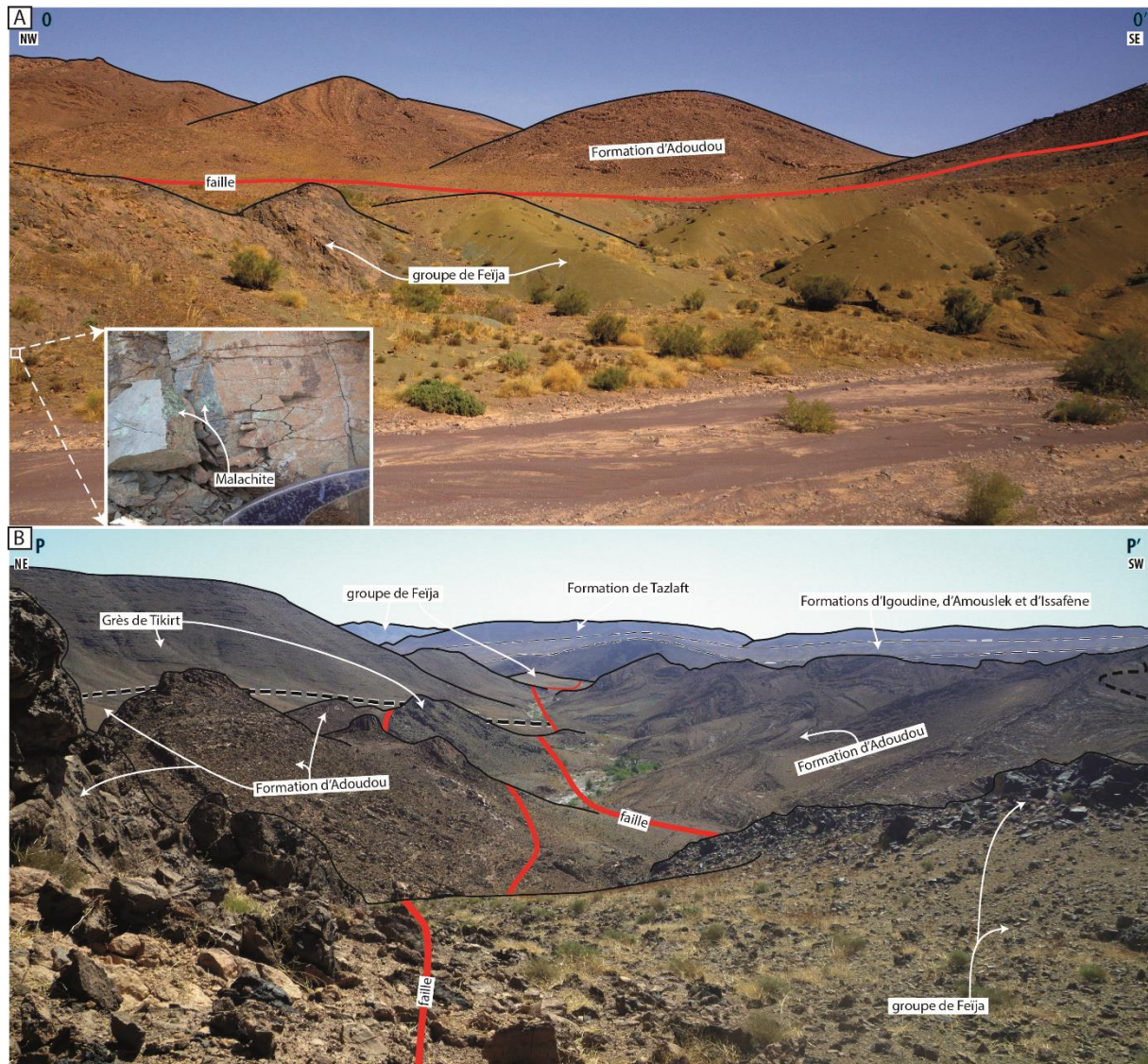


Figure 74 : Planche photographique prise au niveau du passage de l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas (AMAA) dans la couverture néoprotérozoïque à cambrienne (la localisation des paysages est donnée **figure 68**) : A, Lambeau appartenant au groupe de Feija, contenant localement des traces de malachite, en contact anormal avec la formation d'Adoudou ; B, extension vers l'est de la déformation au niveau du passage de l'AMAA avec la présence de lambeau de roches appartenant à la formation des grès de Tikirt et du groupe de Feija en contact anormal avec la formation d'Adoudou.

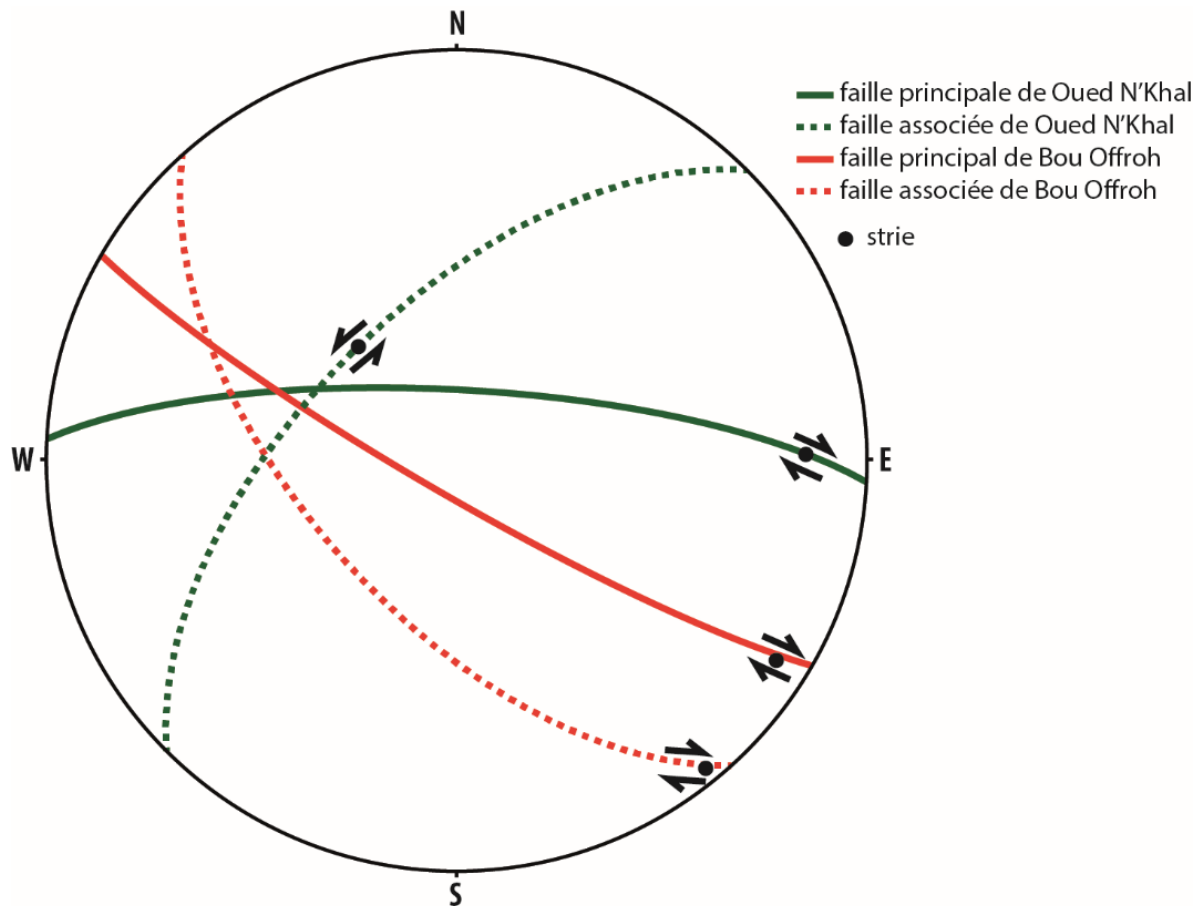


Figure 75 : Canevas de Schmidt avec les projections, depuis l'hémisphère nord, des données structurales des orientations des failles et des stries associées mesurées au niveau de l'AMAA.

3.4. APERÇU DES OCCURRENCES CUPRIFERES DU SOCLE PRECAMBRIEN

Durant la compression Panafricaine, au moins deux schistosités sont décrites. Une S1 affectant l'ensemble des unités antérieure à la formation de Tiddiline et une S2 affectant l'ensemble des unités, jusqu'à la série de Tiddiline. Cette phase associée à la S2 induirait des plissements de la S1 au niveau de zone de cisaillement ductile Panafricaine (El Hadi et al., 2010).

3.4.1. La minéralisation de type Bleida : une association avec des failles cassante N70

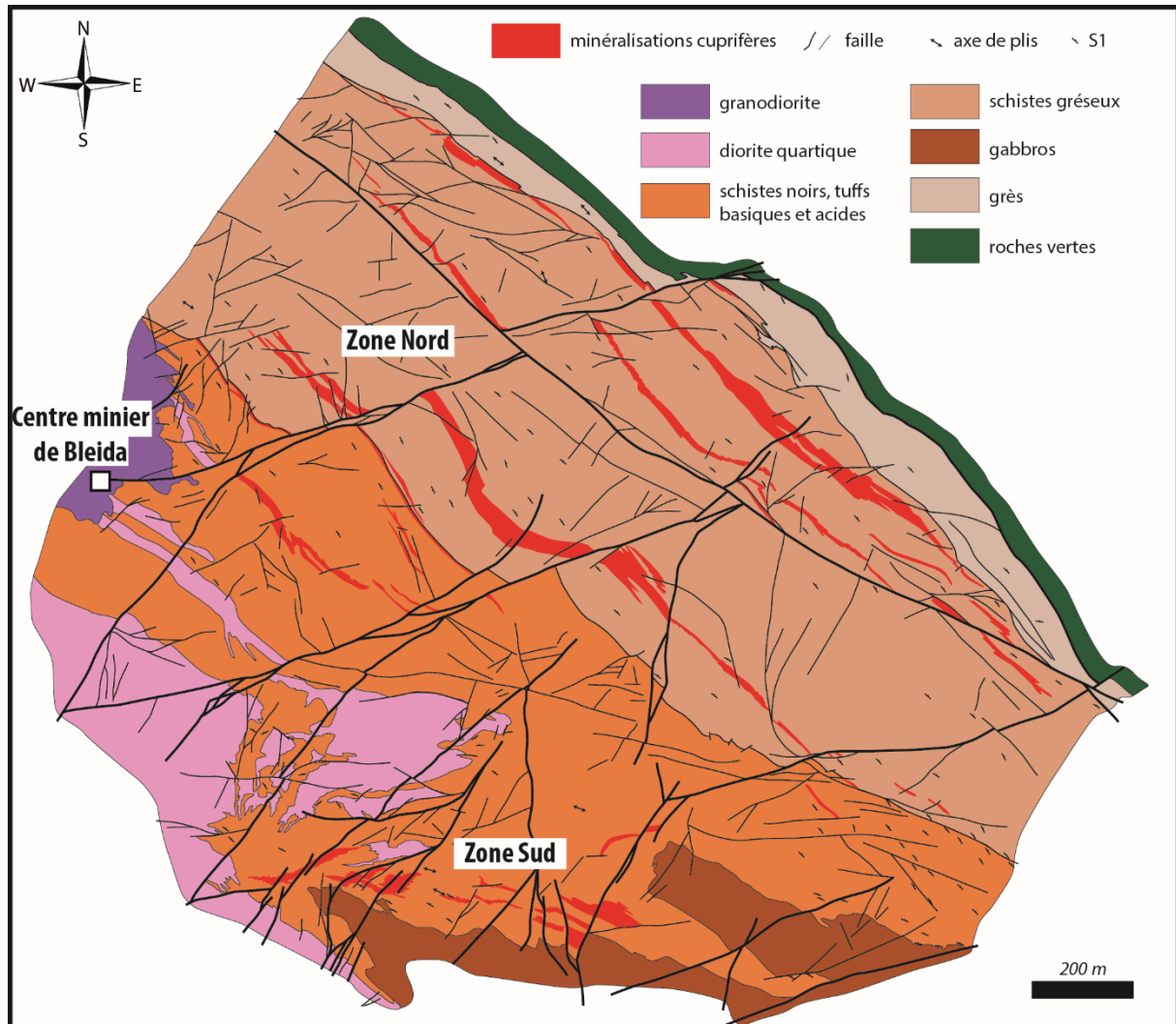


Figure 76 : Carte géologique de surface des secteurs minéralisés du gisement de Bleida (modifié d'après Service géologique de Bleida Somifer, 1982).

La minéralisation du gisement de Bleida est divisée en deux types : Nord et Sud (**Cf chapitre 1.5.1.1**) (**Fig. 76**). Pour rappel : (i) les minéralisations de type Nord correspondent à des niveaux pyriteux stratiformes, au sein d'une alternance de roche schisto-gréseuses, qui sont minéralisés en cuivre à l'intersection avec des failles de directions N70 (**Fig. 77**), (ii) les minéralisations de types Sud correspondent à l'intersection entre des failles également de directions N70 et de schistes noirs (Lhou Maacha et al., 2011; Maacha, 2013). Ces deux types sont donc contrôlés spatialement par ces failles cassantes, de jeu apparent senestre et d'extension kilométrique (**Fig. 76**). Elles sont sécantes sur l'ensemble des lithologies du socle protérozoïque, incluant la granodiorite de Bleida (**Fig. 76**) datée à $579,4 \pm 1,2$ Ma (U/Pb sur

zircon) (Inglis et al., 2004). Ces failles sont recoupées par une autre famille de failles, de direction N130 et d'extension plurikilométrique (**Fig. 76**).

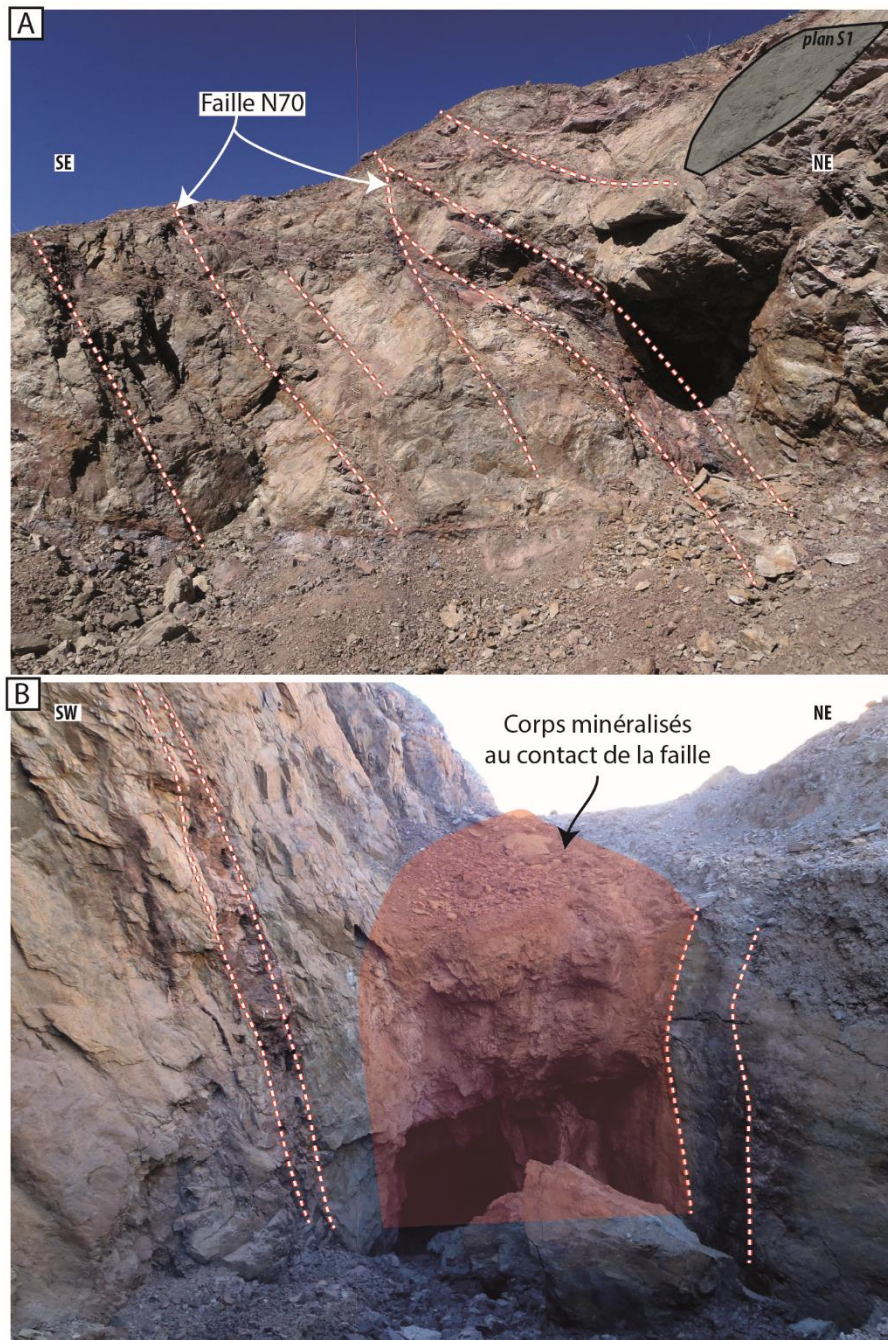


Figure 77 : Photographies montrant l'association spatiale entre les failles N70 de Bleida et la minéralisation de la zone sud (amas 2) cuprifère ainsi que la relation entre faille et S1.

En sondage le niveau pyriteux du type Nord apparaît sous la forme d'une alternance de ruban sombre contenant des pyrites de taille inférieure à 100 μm (**Fig. 77A**). Il est recoupé par au moins deux générations de pyrites postérieures dont au moins une s'est mise en place en régime cassant de manière sécante sur la schistosité S1 (pyrite 3, **Fig. 78A**). La minéralisation cuprifère est présente essentiellement sous la forme d'un stockwork à chalcoppyrite ou bornite

sécant sur la schistosité S1 de l'encaissant (**Fig. 78B**) et également sur les plissements de cette schistosité (**Fig. 78C**). Les veines de ce stockwork contiennent localement une gangue à quartz (**Fig. 78C**) et dolomite (**Fig. 78B**). La minéralisation de type Sud est présente également sous la forme d'un stockwork à bornite et chalcoppyrite (**Fig. 79A**) sécante sur la schistosité S1 de l'encaissant (**Fig. 79C et D**). Localement le stockwork à sulfures de cuivre est recoupé par des veines à quartz et dolomites montrant des textures bréchiques ainsi que des géodes traduisant un certain degré d'ouverture (**Fig. 79B**).

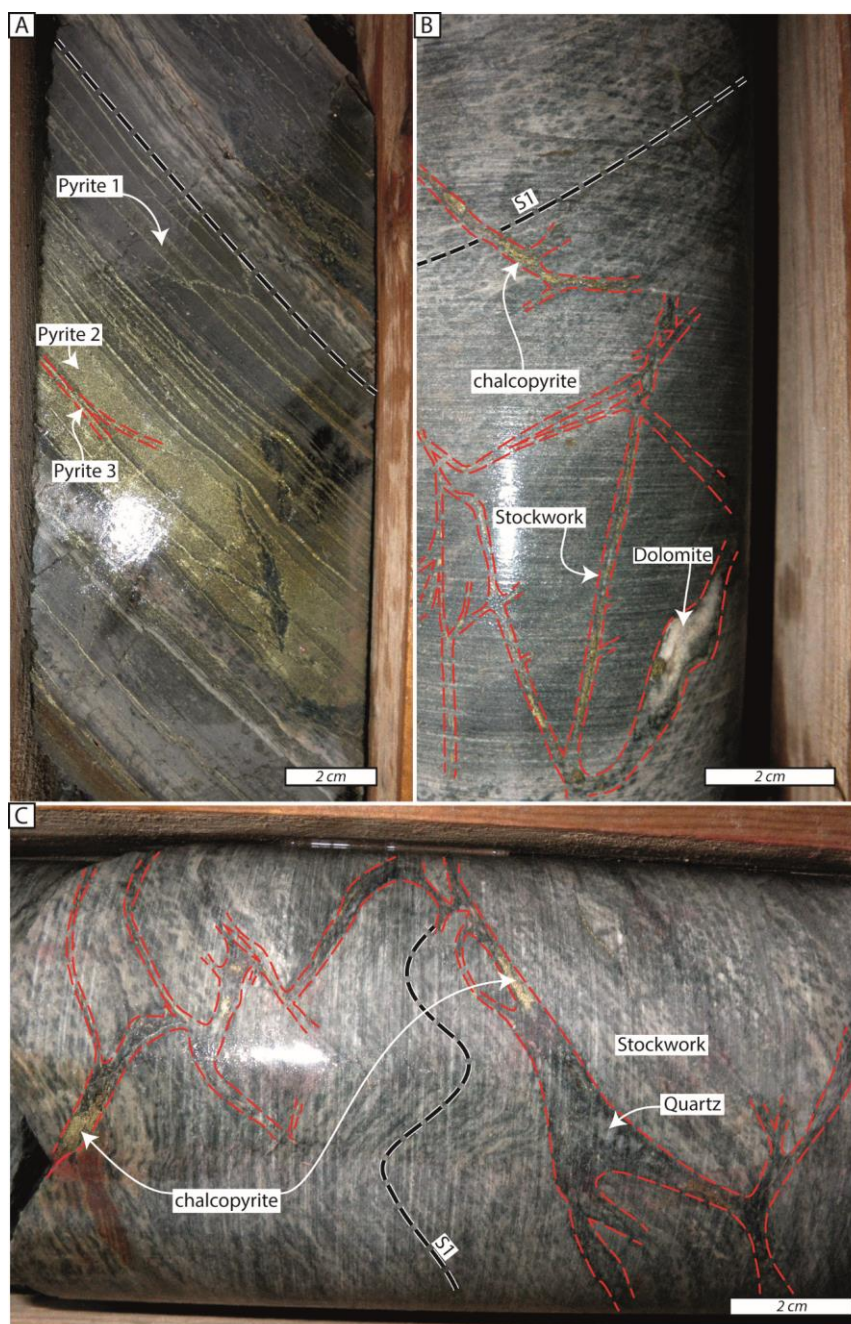


Figure 78 : Planche photographique synthétisant les différentes textures et structures observées sur les sondages carottés de la zone nord du gisement de Bleida : A, les trois générations de pyrites au sein du niveau pyriteux minéralisé ; B, stockwork à chalcoppyrite et dolomite sécant sur la S1 ; C stockwork à quartz et chalcoppyrite sécant sur le plissement de la S1.

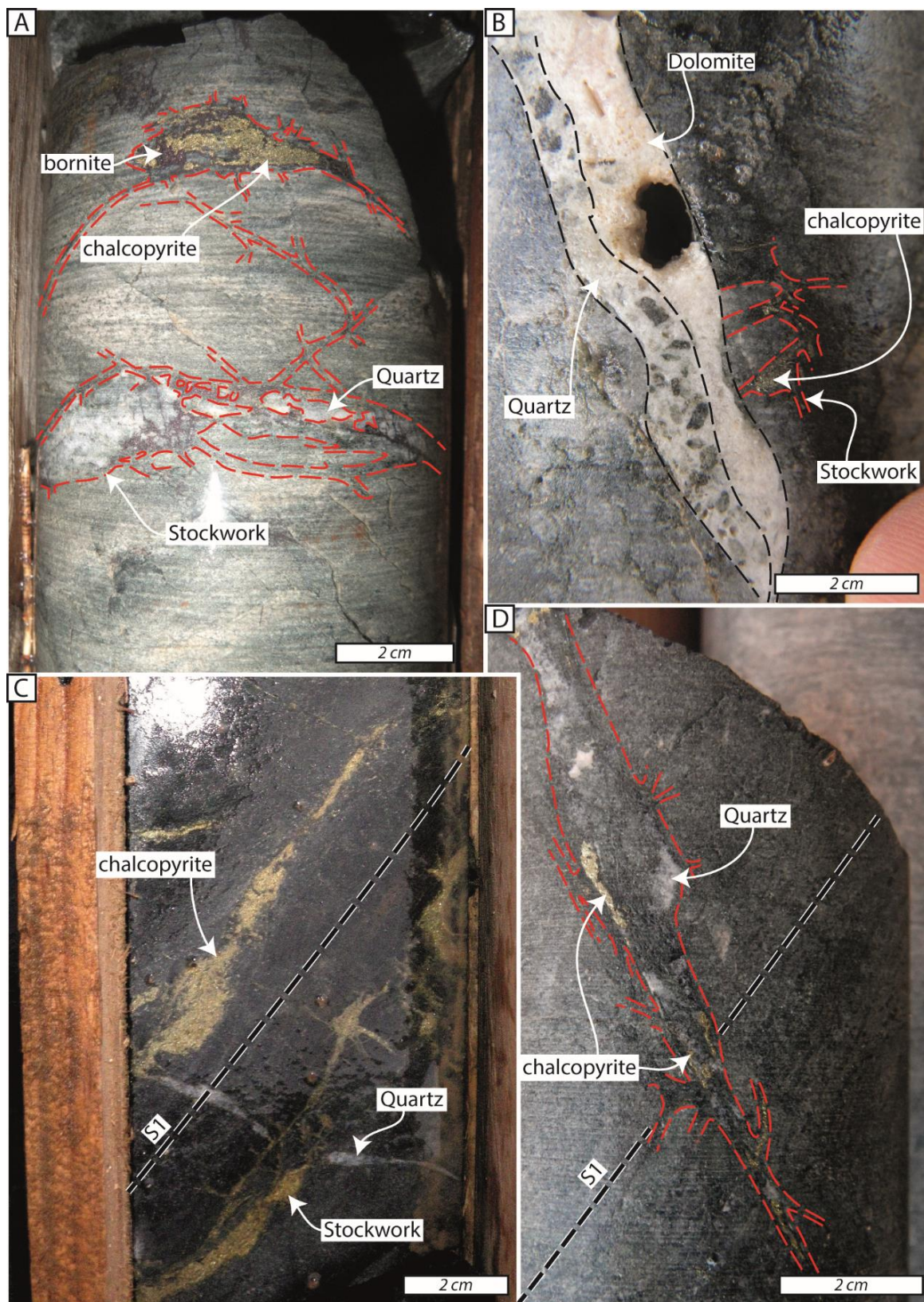


Figure 79 : Planche photographique synthétisant les différentes textures et structures observées sur les sondages carottés de la zone Sud du gisement de Bleida : A, stockwork à bornite, chalcopyrite bréchifiant l'encaissant ainsi qu'une veine à quartz ; B, veine à quartz et dolomite sécante sur le stockwork à chalcopyrite ; C, Stockwork à chalcopyrite sécant sur l'encaissant et sur une veine à quartz ; veine à quartz et chalcopyrite recoupant sur la S1.

3.4.2. L'association avec des failles N120 à travers les exemples des indices de Belgrade, Tanaladat et Garat En Nous

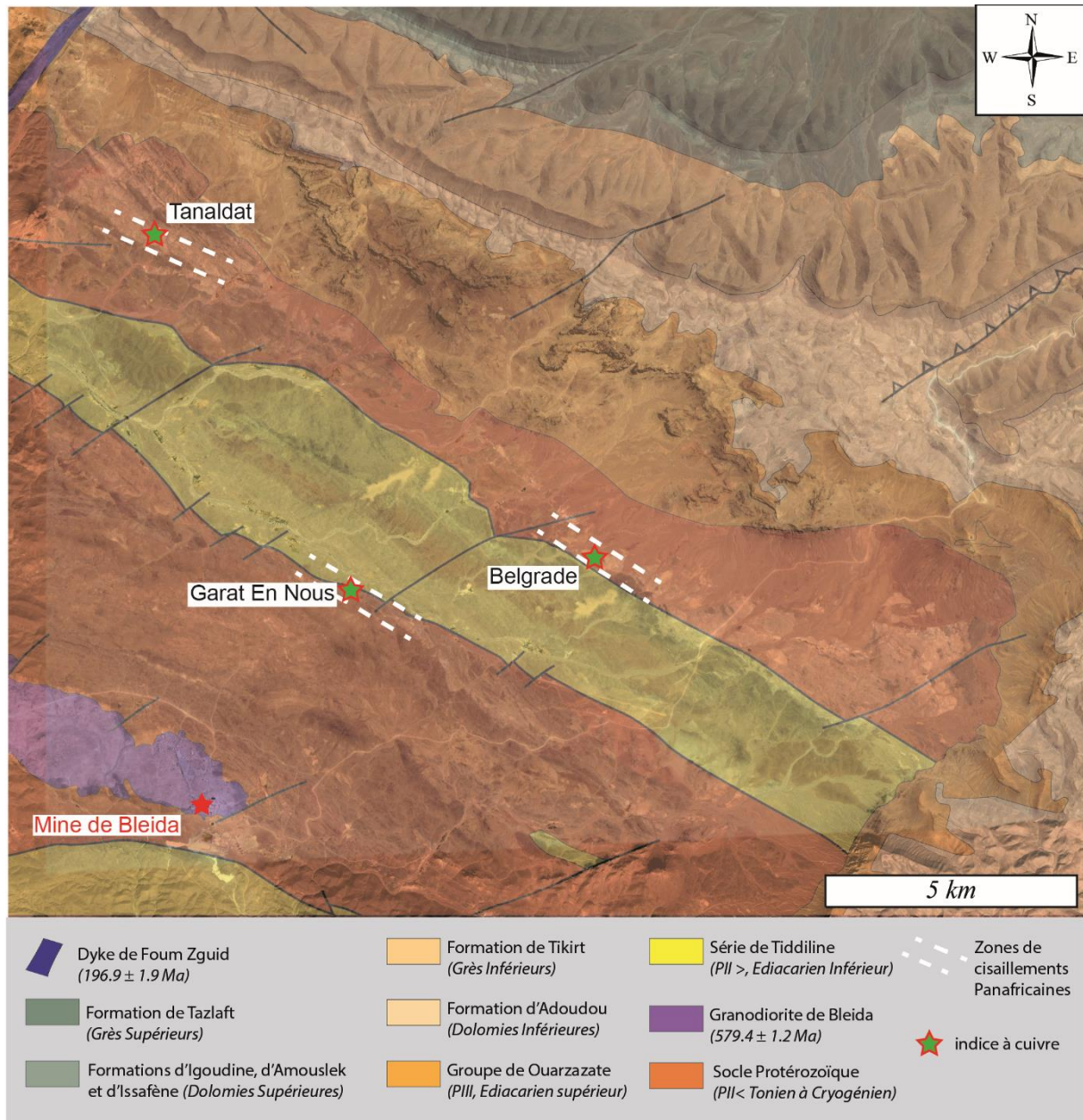


Figure 80 : Carte géologique du secteur Est de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara superposée aux photographies satellites montrant la localisation de trois indices cuprifères du socle Protérozoïque.

Un autre type de minéralisation que celui de type Bleida (Nord et Sud) a été observé au sein de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Ces minéralisations sont localisées au sein de zones de cisaillement panafricaines de direction N110° à N 130° (**Fig. 80**). Trois indices ont été choisis pour illustrer ce type de minéralisation : Garat En Nous car la morphologie des corps est bien marqué en surface et les indices de Tanaladat et Belgrade car étant des tranchées d'exploration de la campagne de 2015, ces affleurements ont permis d'observer les relations

entre les zones minéralisées et l'encaissant. En surface ces corps minéralisés sont présents sous la forme de lentilles discontinues au sein de zone interprétée comme des cisaillements ductiles panafricains (**Fig. 81B**) (El Hadi et al., 2010). Ces lentilles peuvent avoir une puissance allant de quelque centimètre à une dizaine de mètre pour une extension latérale métrique à plusieurs dizaines de mètres. La zone de déformation panafricaine est marquée par la présence sur une zone large de 10 à 100 mètres de nombreux plis et microplis ainsi que des boudins de quartz étirés dans la schistosité (**Fig. 81C, 82C, 83C et 84**). Cependant aucune S2 n'a été observée de plan axial n'a été observé au sein de ces microplis ce qui sous-entend une formation non ductile de ces plis. Les corps minéralisés sont constitués en surface par des roches silicifiées à malachite (**Fig. 81D**).

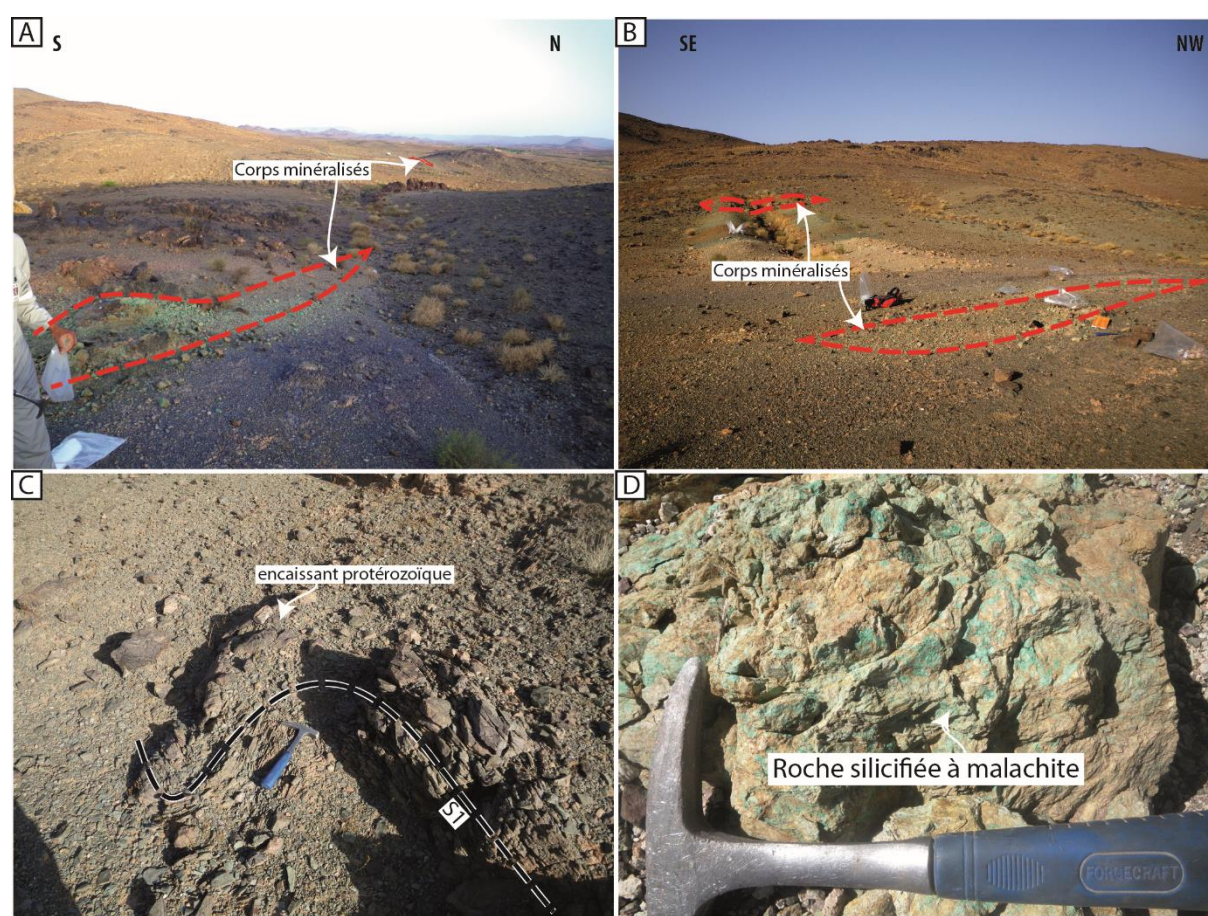


Figure 81 : Planche photographique des observations morphologiques de l'indice de Garat En Nous : A, corps minéralisés sous forme de lentilles ; B, corps minéralisés parallèles ; C, encaissant plissé à proximité des lentilles minéralisées en cuivre ; D, aperçu d'une lentille minéralisée.

En tranchée, les corps minéralisés sont associés à une altération silico-carbonatée appelée localement par les géologues d'exploration « carapace silico-carbonatée ». Cette altération est sécante sur la schistosité S1 et sur le plissement affectant cette schistosité (**Fig. 82A, B**). Les zones altérées sont composées d'ankérite brune et de quartz (**Fig. 82D et G**).

ainsi que de veines noires à bornite et chalcoppyrite (**Fig. 82F**). Les corps minéralisés sont également caractérisés par une altération « blanchâtre » s'exprimant en enveloppe autour des corps minéralisés (**Fig. 83A et B**) ou en stockwork recoupant la schistosité S1 de l'encaissant (**Fig. 82E et 83A, B et D**). L'enveloppe formée par cette altération blanchâtre recoupe également les plis de l'encaissant (**Fig. 83D**).

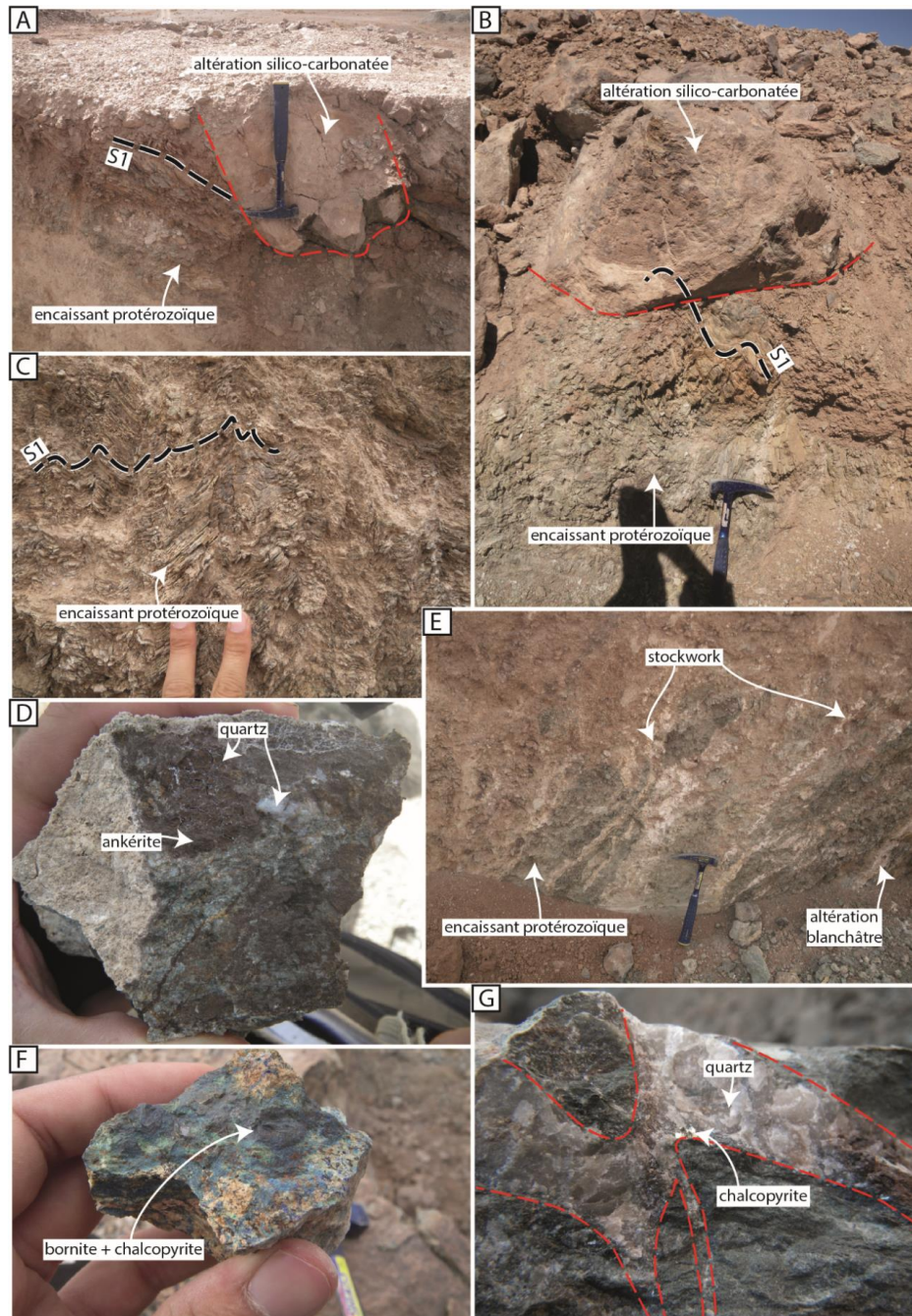


Figure 82 : Planche photographique des observations réalisées en tranchée au niveau de l'indice minéralisé de Tanal dat : A, altération silico-carbonatée recoupant la schistosité S1 de l'encaissant ; silicification et carbonatation de l'encaissant plissée ; C, plissement de la schistosité S1 observé systématiquement à proximité des zones minéralisées en cuivre ; D, échantillon prélevé au niveau de l'encaissant ayant subi une altération silico-carbonatée, présence d'ankérite brune et de quartz en remplissage de fissure ; E, stockwork recoupant l'encaissant protérozoïque à remplissage blanchâtre observé à

proximité de la zone minéralisée en cuivre ; F, bande noire au sein des zones à altération silico-carbonatée composée de bornite et de chalcopryrite ; G, stockwork à quartz et chalcopryrite recoupant l'encaissant.

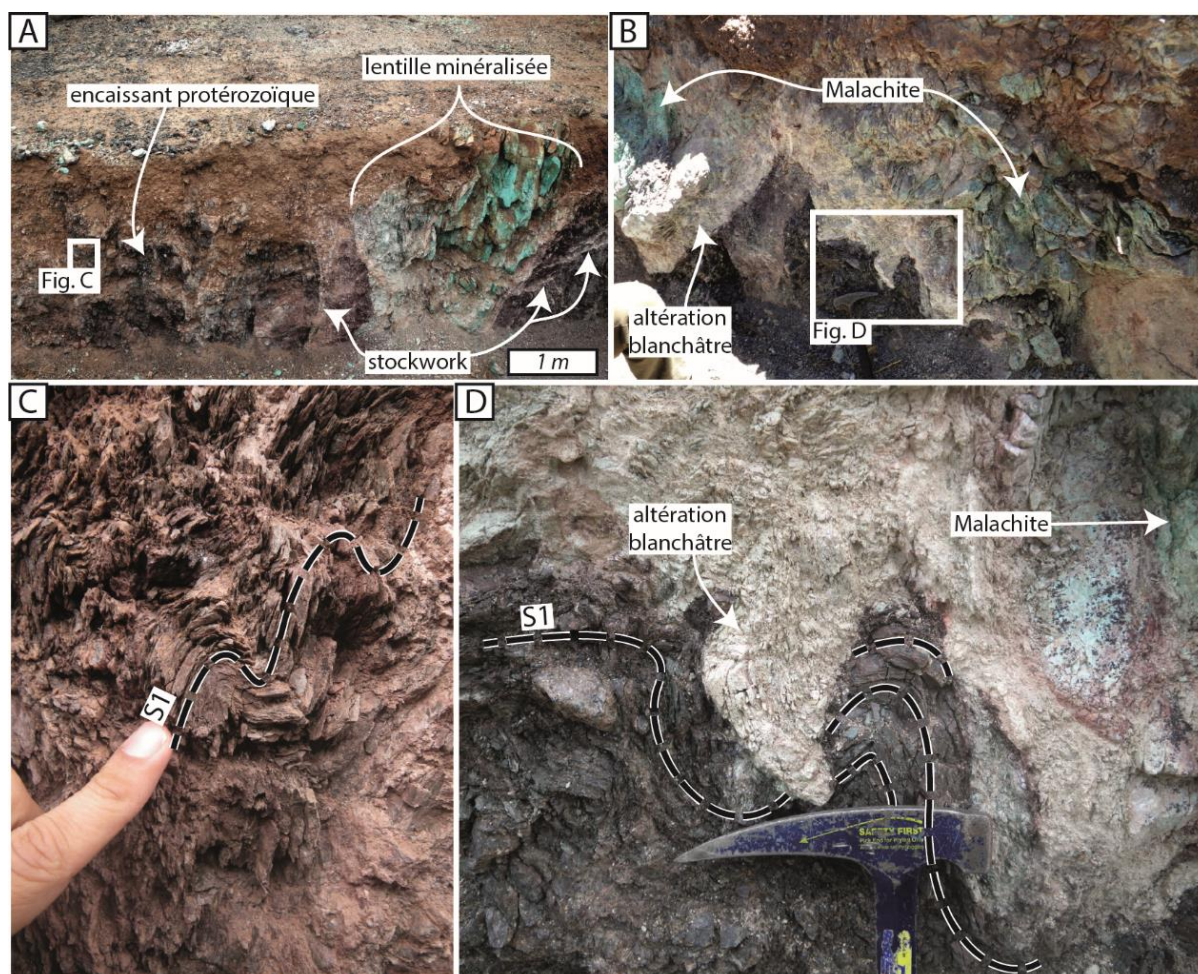


Figure 83 : Planche photographique des observations réalisées en tranchée au niveau de l'indice minéralisé de Belgrade : A, lentilles minéralisée vue en coupe connecté à un stockwork à remplissage blanchâtre sécant sur le socle protérozoïque encaissant ; B, altération blanchâtre au contact des corps minéralisés en cuivre. C, plissement de la schistosité S1 observé systématiquement à proximité des zones minéralisées en cuivre ; D, limite de l'altération blanchâtre associée à la minéralisation cuprifère recoupant le plissement de la schistosité S1.

Les lentilles minéralisées au sein de ces trois indices ont une orientation similaire de direction N110° à N140° à pendage vertical ou allant jusqu'à 50° vers le nord-est ou le sud-ouest (**Fig. 84**). Elles sont associées à des failles cassantes de même direction et de pendage équivalent à jeu décrochant dextre ou senestre (**Fig. 84**). Il est a noté que les axes des plis et des micro-plis mesurés sont parallèles au plan de failles cassante laissant suggérer des plis d'entraînement (**Fig. 84**).

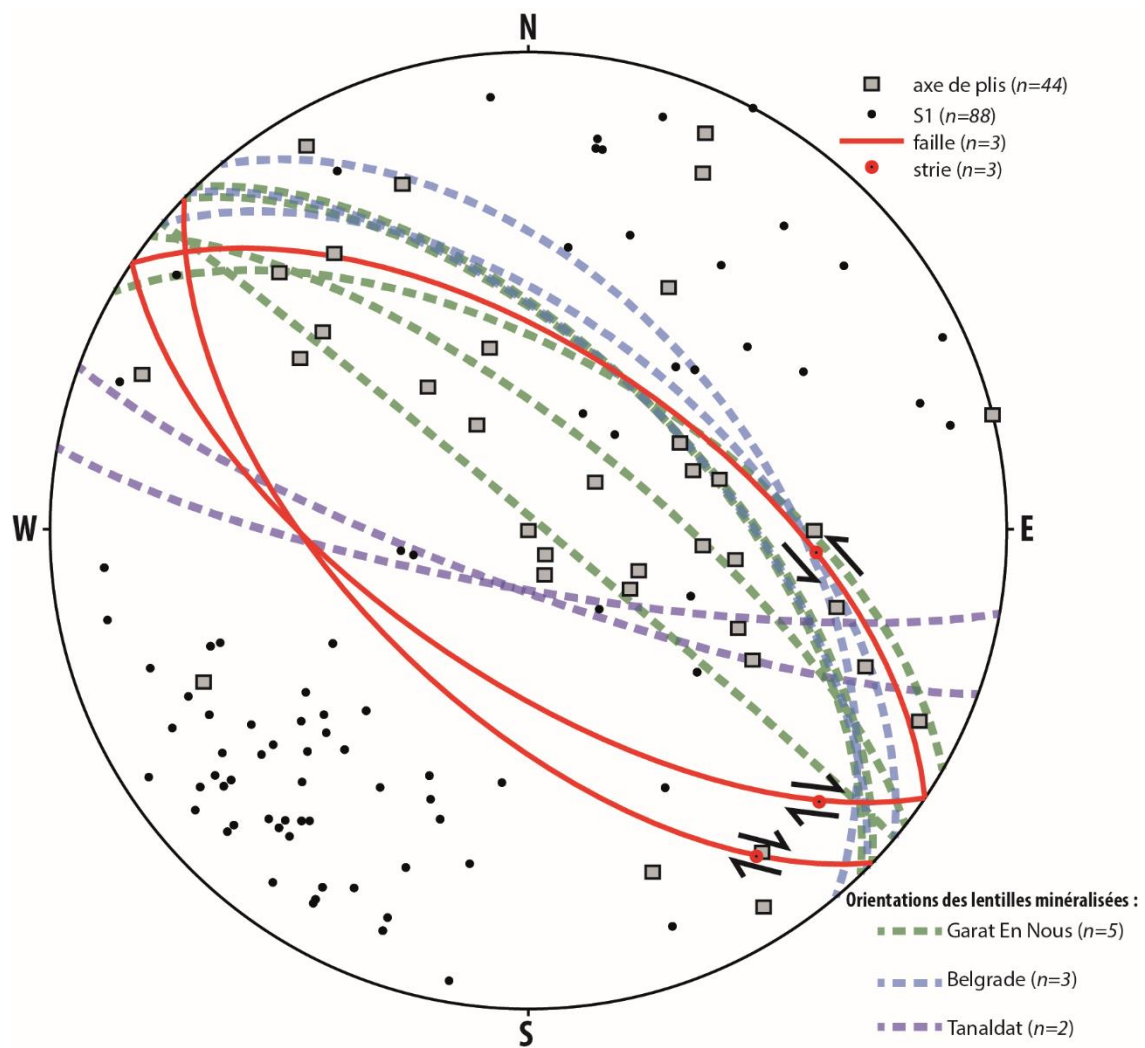


Figure 84 : Canevas de Schmidt avec les projections en hémisphère inférieure des données structurales mesurées au niveau des indices de Tanalbat, Belgrade et Garat En Nous, avec « n » le nombre de mesures.

Chapitre 4. Minéralogie et textures microscopiques des minéralisations de la couverture Néoprotérozoïque à Cambrienne

Mise en contexte : comme cela a été souligné dans l'introduction de ce manuscrit, ces minéralisations cuprifères n'ont pas fait l'objet d'études approfondies. Concernant les minéralisations du pourtour de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, il n'existe aucune données publiées décrivant leur minéralogie et les textures qui leur sont associées. De plus, à l'échelle de l'Anti-Atlas, un des arguments pour évoquer une origine syngénétique de ces concentrations cuprifères serait la présence de textures disséminées dans les roches encaissantes. La présence de veines est, quant à elle, fréquemment présentée comme un argument plaçant en faveur d'une remobilisation tectonique postérieure à la phase de dissémination. Ce chapitre a, par conséquent, comme objectif : (i) de présenter les différentes textures associées aux deux types de minéralisation présentés dans le chapitre précédent, (ii) d'identifier leur minéralogie, (iii) d'établir des séquences paragenétique afin de pouvoir comparer les différents sites entre eux. Par soucis de ne pas alourdir ce chapitre, les illustrations permettant de justifier les séquences paragenétique seront présentées de manière complète pour l'indice de Oued R'Them, en ce qui concerne le type « stratabound » et pour le gisement de Jbel Laassel, concernant le type « folded-band ». Les illustrations des textures présentées sont associées à l'ensemble des indices et elles permettront aux lecteurs de juger du bienfondé de cette démarche.

Chapitre 4. Minéralogie et textures microscopiques des minéralisations de la couverture Néoprotérozoïque à Cambrienne

4.1. LE TYPE « STRATABOUND »

4.1.1. Les rognons siliceux

Ces rognons siliceux ont été observés sur l'ensemble de la pile sédimentaire de la formation d'Adoudou et ils ne sont donc pas propres au niveau porteur de la minéralisation. Il se compose de niveaux épais d'une centaine de micromètres à une dizaine de centimètres de quartz microcristallin concordant avec le plan de stratification (**Fig. 85A**). Ces niveaux siliceux sont associés à des cristaux millimétriques de dolomites présentant parfois des bords corrodés au contact du quartz microcristallin (**Fig. 85B**). Il semble y avoir plusieurs générations de quartz microcristallin plus ou moins bien cristallisés au sein d'un même niveau (**Fig. 85C**). Les veines du stockwork associé à la minéralisation cuprifère sont sécantes sur ces niveaux siliceux (**Fig. 85D**) et les sulfures disséminés présents au sein de ces niveaux de quartz microcristallin sont reliés entre eux par un réseau de fractures (**Fig. 85E et E'**).

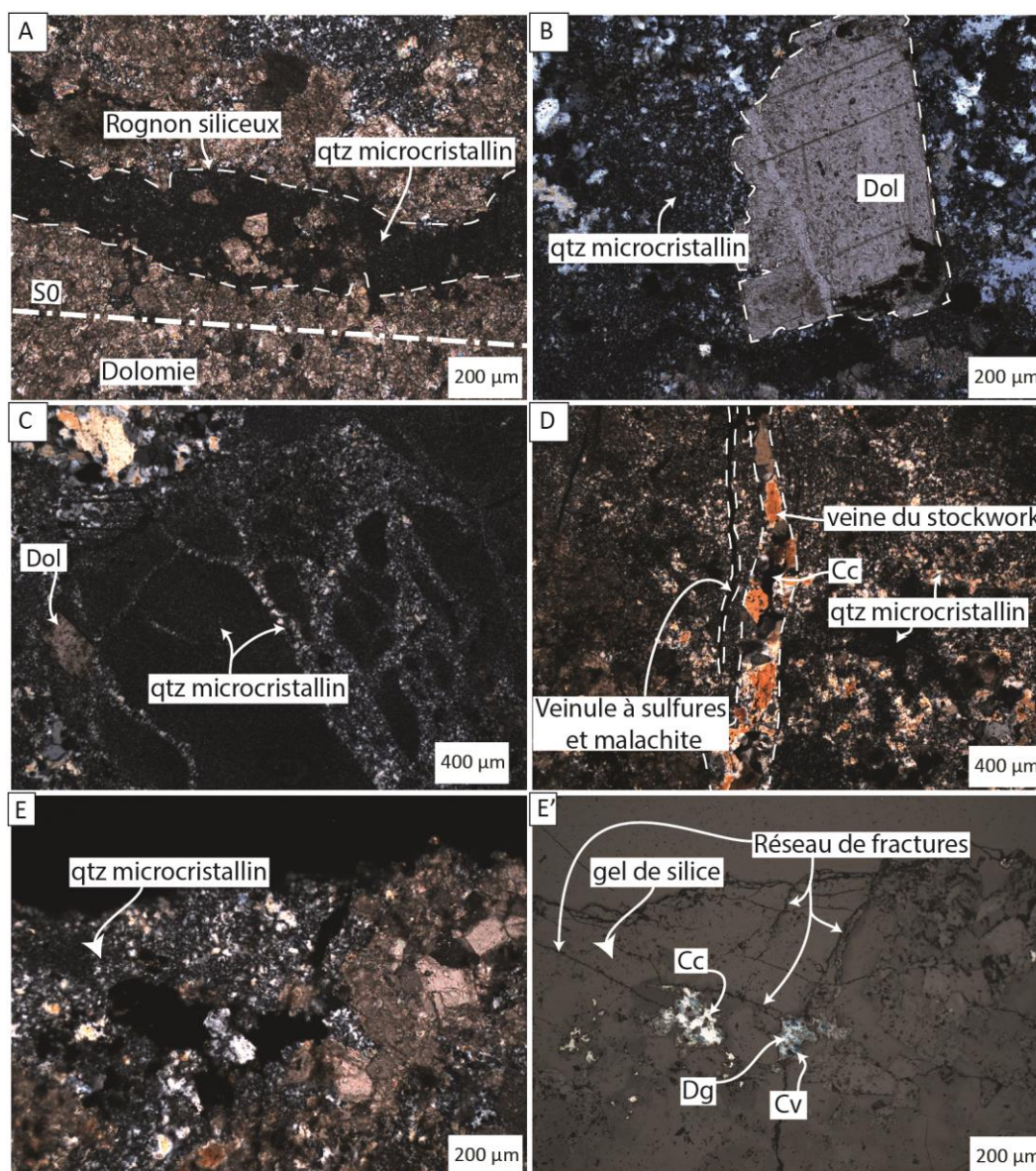


Figure 85 : Planche photographique des observations microscopiques effectuées sur les rognons siliceux de la formation d'Adoudou (Fig. X chapitre terrain) : A, quartz micro-cristallin intercalé dans la S0 (LT, nic. //); B, cristal de dolomite montrant des bords corrodés et cicatrisés (cimenté) par le quartz microcristallin (LT, nic. +) ; C, Deux générations de quartz microcristallin (LT, nic. +) ; D, veines à quartz et à sulfures de cuivre recoupant un rognon siliceux (LT, nic. +) ; E, quartz microcristallin et sulfures de cuivre (LT, nic. +) ; E', sulfures de cuivre connecté à travers un réseau de fractures sécantes sur les rognons siliceux (LR, nic. //). Abréviations : **LT**, lumière transmise ; **LR**, lumière réfléchie ; **nic. //**, Nicols parallèles ; **nic. +**, Nicols croisés ; **S0**, plan de stratification ; **Cc**, chalcocite ; **Cv**, covellite ; **Dg**, digenite ; **Dol**, dolomite.

4.1.2. La gangue

Les minéraux de gangues associés à la minéralisation cuprifère sont le quartz la dolomite et la calcite. Ils peuvent être présents dans les veines du stockwork et au sein de géodes (**Fig. 86**). Quand les trois phases sont présentes, le quartz est systématiquement sur les

épontes, des veines comme des géodes, suivi de la dolomite et localement recoupés par de la calcite. Le quartz et la dolomite sont les minéraux de gangue les plus fréquents et ils sont présents dans les indices de Oued R'Them (**Fig. 86A et B**), de Tizi N'Mekraz (**Fig. 86 C et D**) et Chaa'b Lhamrat (**Fig 45G**). Cette chronologie entre ces trois minéraux de gangue a permis de déterminer clairement la succession paragénétique des minéraux cuprifères.

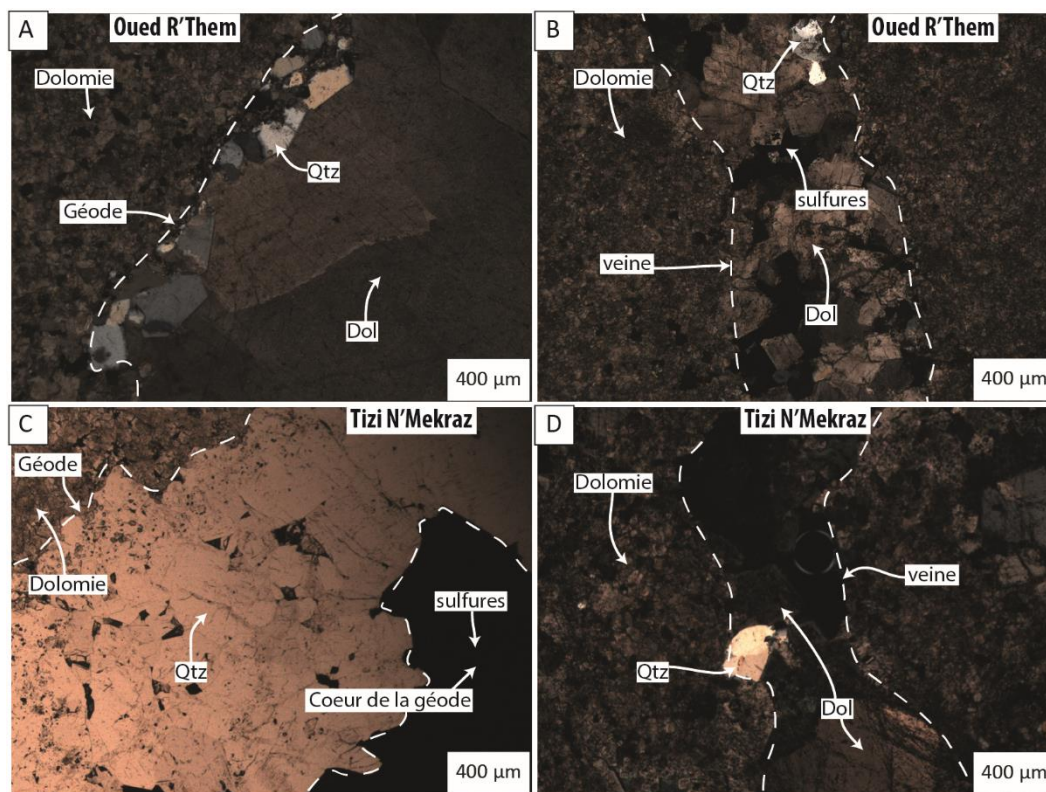


Figure 86 : Planche photographique des minéraux de gangues associés à la minéralisation de type « stratabound » : A, Quartz sur les bords et dolomite au cœur d'une géode de l'indice de Oued R'Them (LT, nic. +) ; B, veine, sécante sur la S0, à quartz sur les épontes et dolomites au cœur de l'indice de Oued R'Them (LT, nic. +) ; C, géode à quartz et sulfures de cuivre au cœur de l'indice de Tizi N'Mekraz (LT, nic. //) ; D, veine, sécante sur la S0, à quartz sur les épontes et dolomites au cœur, de l'indice de Tizi N'Mekraz (LT, nic. +). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85**)et **Qtz**, quartz.

4.1.3. Les sulfures

Dans un premier temps, sans distinguer les sulfures primaires des sulfures secondaires, la minéralisation du type « stratabound » est composée de : chalcocite (Cu_2S), bornite (Cu_5FeS_4), chalcopyrite (CuFeS_2), covellite (CuS) et digénite (Cu_9S_5). Les sulfures sont uniquement cuprifères, aucun sulfure de zinc, plomb ou exclusivement de fer n'a été observés. La bornite et la chalcopyrite apparaissent fréquemment sous forme d'inclusions (inférieur à 50 µm) au sein des cristaux de quartz et de dolomite de la gangue (**Fig. 87A et B**). Ces deux minéraux sont également présents en remplissage de la dolomite (**Fig. 87C et C'**) et

en disséminations dans l'encaissant (**Fig. 87D**) ainsi que la chalcocite (**Fig. 87E**). Cette dernière est également présente en veine (**Fig. 87F**) ou en colmatage de géodes, après le dépôt de quartz puis de dolomite (**Fig. 87 G**).

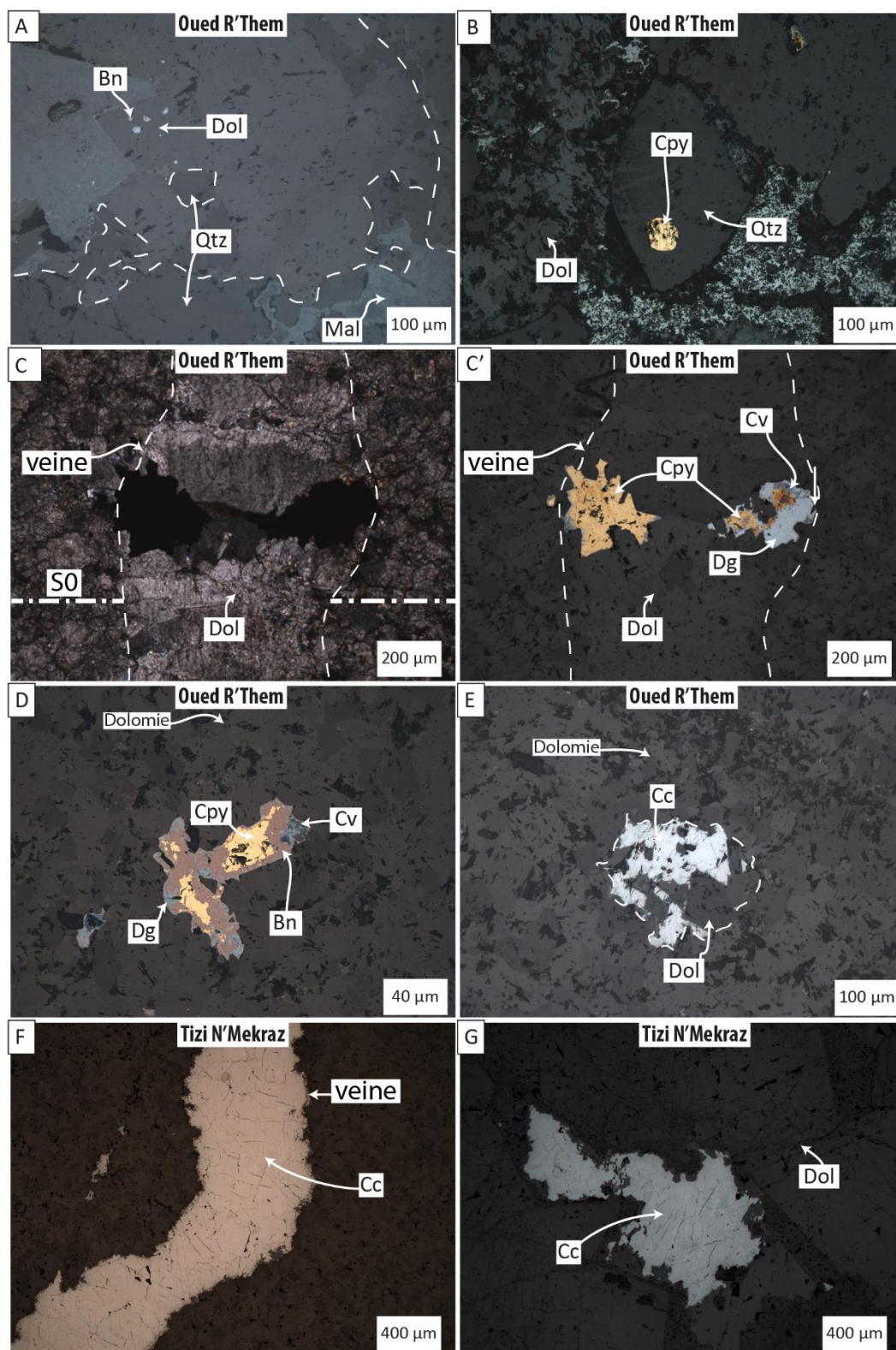


Figure 87 : Planche photographique des sulfures observés au sein de la minéralisation de type « stratabound » : A, bornite en inclusions dans un cristal de dolomite d'une géode (LR, nic. //) ; B, chalcopyrite en inclusion dans un cristal de quartz

*d'une veine (LR, nic. //) ; C, veine de calcite sécante sur la S0 (LT, nic. //) ; C', veine de dolomite et chalcopryrite sécante sur la S0 (LR, nic. //) D, bornite et chalcopryrite disséminées dans la dolomie (LR, nic. //) ; E, chalcocite disséminée dans la dolomie (LR, nic. //) ; F, veine à chalcocite, sécante sur la S0 (LR, nic. //) ; G, chalcocite au cœur d'une géode à quartz et dolomite (LR, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85 et 86**) : **Bn**, bornite et **Cal**, calcite ; **Cpy**, chalcopryrite.*

4.1.4. Les minéraux supergènes

Les minéraux associés à l'altération supergène des sulfures primaires sont composés de sulfures : chalcocite, digenite et covellite et pour la zone d'oxydation de malachite ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), de chrysocolle ($\text{Cu,Al}_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot x(\text{H}_2\text{O})$), et de cuivre natif. Les sulfures secondaires sont présents en couronne de remplacement autour des sulfures primaire (**Fig. 87C'D**). La malachite est présente en veinule (**Fig. 88A**), isolée ou en association avec de minéraux de la phase primaire (**Fig. 88B**). La malachite peut également être présente en remplacement de sulfures primaires (**Fig. 88C**) soulignant localement les clivages hexagonaux de la chalcocite (**Fig. 88D**). Ces clivages suggèrent une origine primaire de cette chalcocite (Ramdohr, 1969). Du cuivre natif est également présent au sein de fissures (**Fig. 88E**).

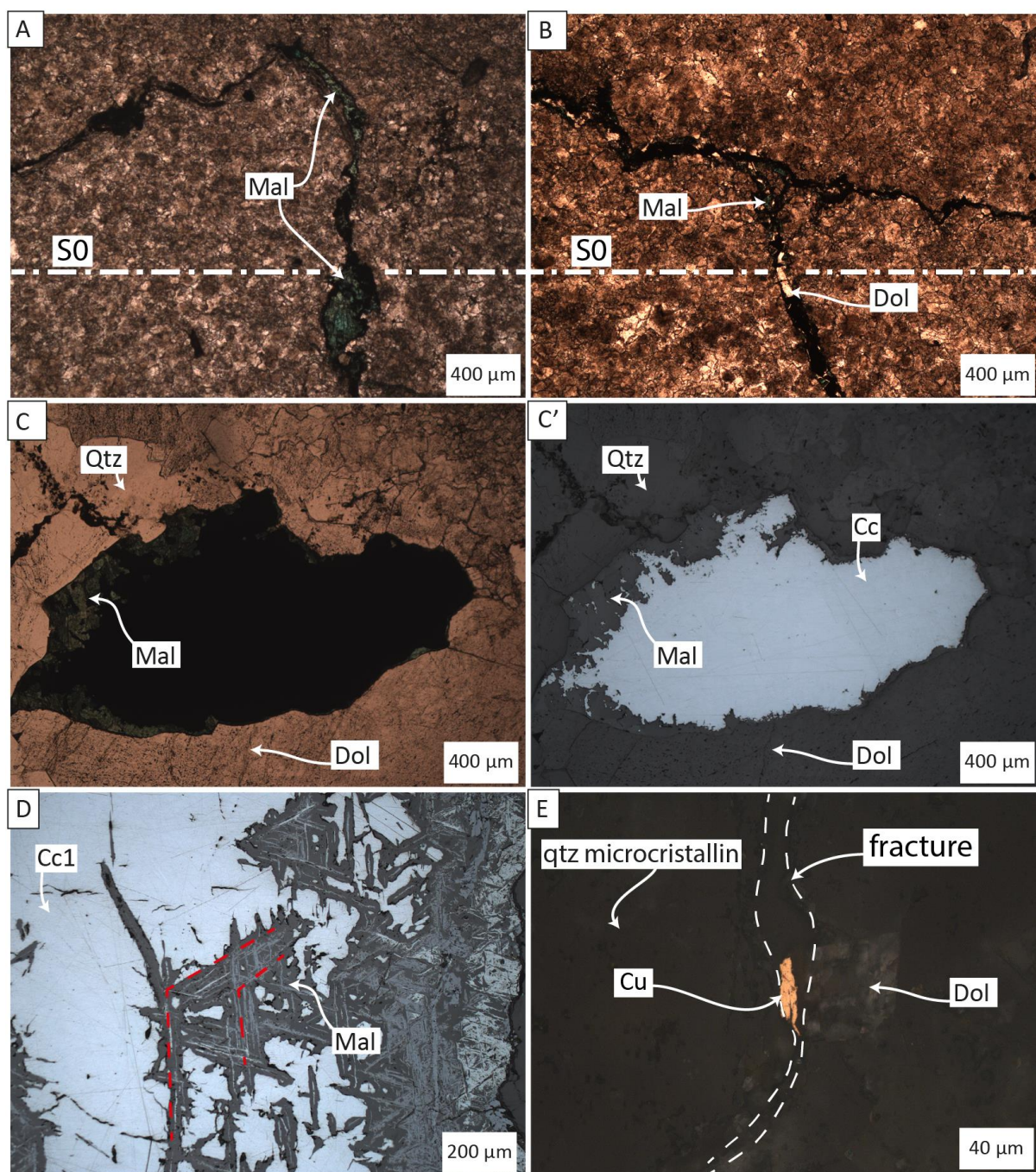


Figure 88 : Planche photographique des minéraux supergènes de l'indice de Oued R'Them : A, veine de malachite sécante sur la S0 (LT, nic. //) ; B, veine à dolomite et malachite sécante sur la S0 (LT, nic. //) ; C, malachite en bordure de sulfure au sein d'une géode à quartz et dolomite (LT, nic. //) ; C', malachite en bordure de chalcocite au sein d'une géode à quartz et dolomite (LR, nic. //) ; D, remplacement d'un cristal de chalcocite par de la malachite suivant des plans de clivage hexagonaux de la chalcocite (LR, nic. //) ; E, fracture à cuivre natif sécante sur un rognon siliceux (LT, nic. //). Abréviations (Cf. légende Fig. 85, 86 et 87) et Cc1, chalcocite primaire ; Cu, cuivre natif ; Mal, malachite.

4.1.5. Textures microscopiques

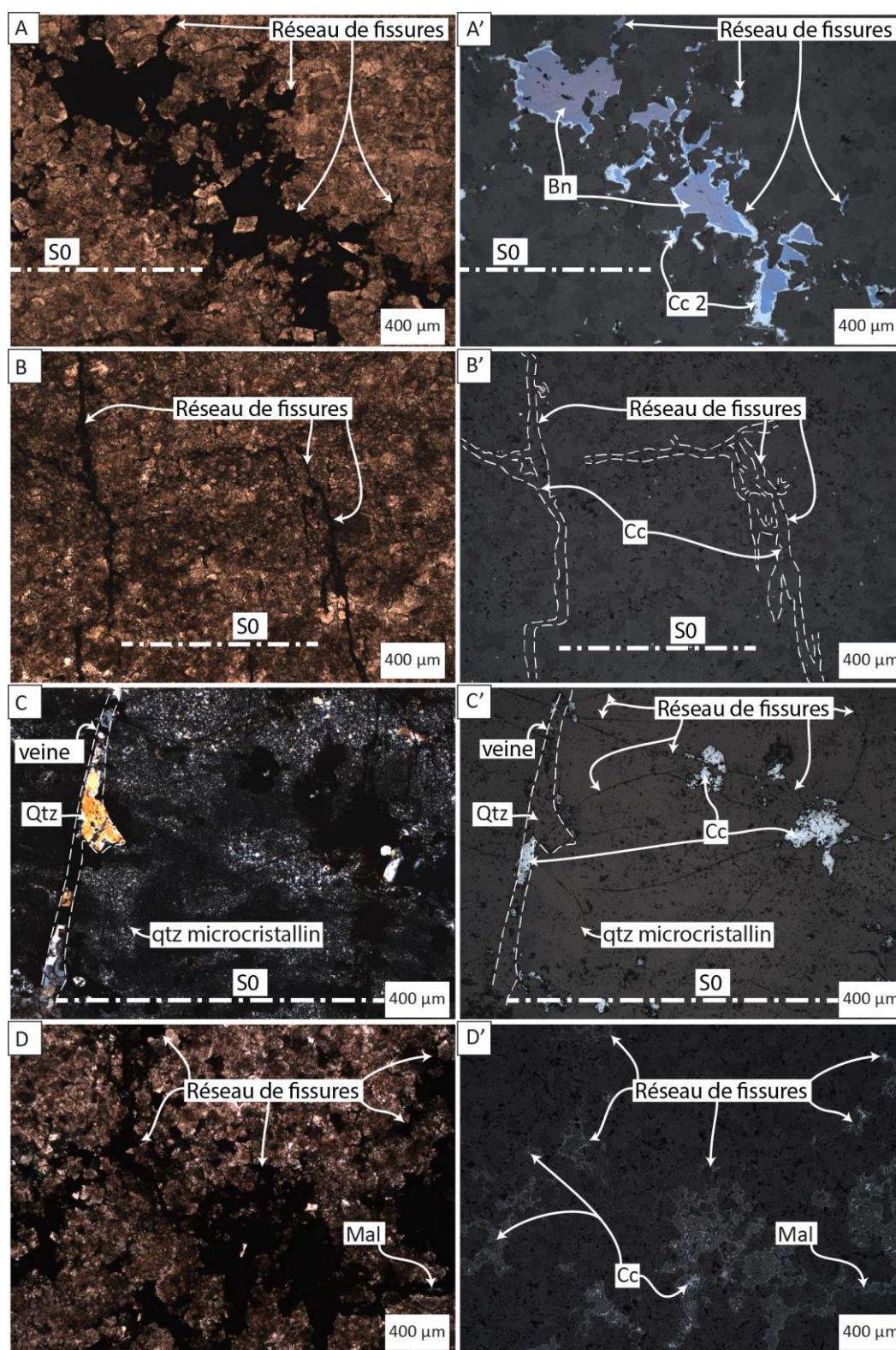


Figure 89 : Planche photographique des observations microscopiques des différentes textures observées sur l'indice de Oued R'Them : A (LT, nic. //) et A' (LR, nic. //), bornite remplissant un réseau de fissures sécant sur la S0 ; B (LT, nic. //) et B' (LR, nic. //), réseau de fissures connectant les disséminations de chalcocite entre elles ; C (LT, nic. //) et C' (LR, nic. //), veine à quartz et chalcocite sécante sur un rognon siliceux et connecté via un réseau de fissures aux chalcocite disséminées

dans le quartz microcristallin ; D (LT, nic. //) et D' (LR, nic. //), réseau de fissures connectant les disséminations de chalcocite au sein de la dolomie. Abréviations (Cf. légende Fig. 85, 86, 87 et 88).

L'essentiel des minéraux présents dans le type « stratabound » est présent sous forme de veinules ou de remplissage de fissures. Les sulfures disséminés apparaissent connectés entre eux à travers un réseau de fissures sécant sur les plans de stratification (**Fig. 89A, A', B, B', D et D'**). Les sulfures disséminés et ceux en remplissage de veines associés au minéraux de gangue sont connectés via ce réseau de fissures (**Fig. 89C et C'**). Les veines peuvent se terminer en un réseau de micro-veines semblant disparaître dans l'encaissant (**Fig. 90A**). Un réseau de karst à carbonates a été observé et il recoupe les veines du stockwork portant le cuivre (**Fig. 90B**). Les textures stylolithiques sont connectées au réseau de fissures à sulfures et contiennent des sulfures de cuivres et de la malachite (**Fig. 90C, C', D et D'**). Des textures micro-bréchiques, à fragments anguleux de dolomie cimentés par du quartz, de la dolomite, des sulfures de cuivres et de la calcite sont fréquemment observées (**Fig. 90E, E', 91C, C', D et D'**). Ces brèches présentent des textures en puzzle avec un faible déplacement des fragments et une fracturation intense multidirectionnelle assimilable à des textures de brèche hydraulique (**Fig. 90 E, E', 91C, C', D et D'**). Les veines du stockwork minéralisé en cuivre peuvent avoir des puissances variant du centimètre à quelques micromètres. Les grosses veines (centimétriques) sont connectées à un réseau de veines millimétriques, elles-mêmes connectées à un réseau de fissures micrométriques (**Fig. 91A, A', B et B'**). Ce réseau de veines centimétriques à micrométriques connecte les mouches de sulfures apparaissant comme disséminés dans l'encaissant (**Fig. 91A et A'**).

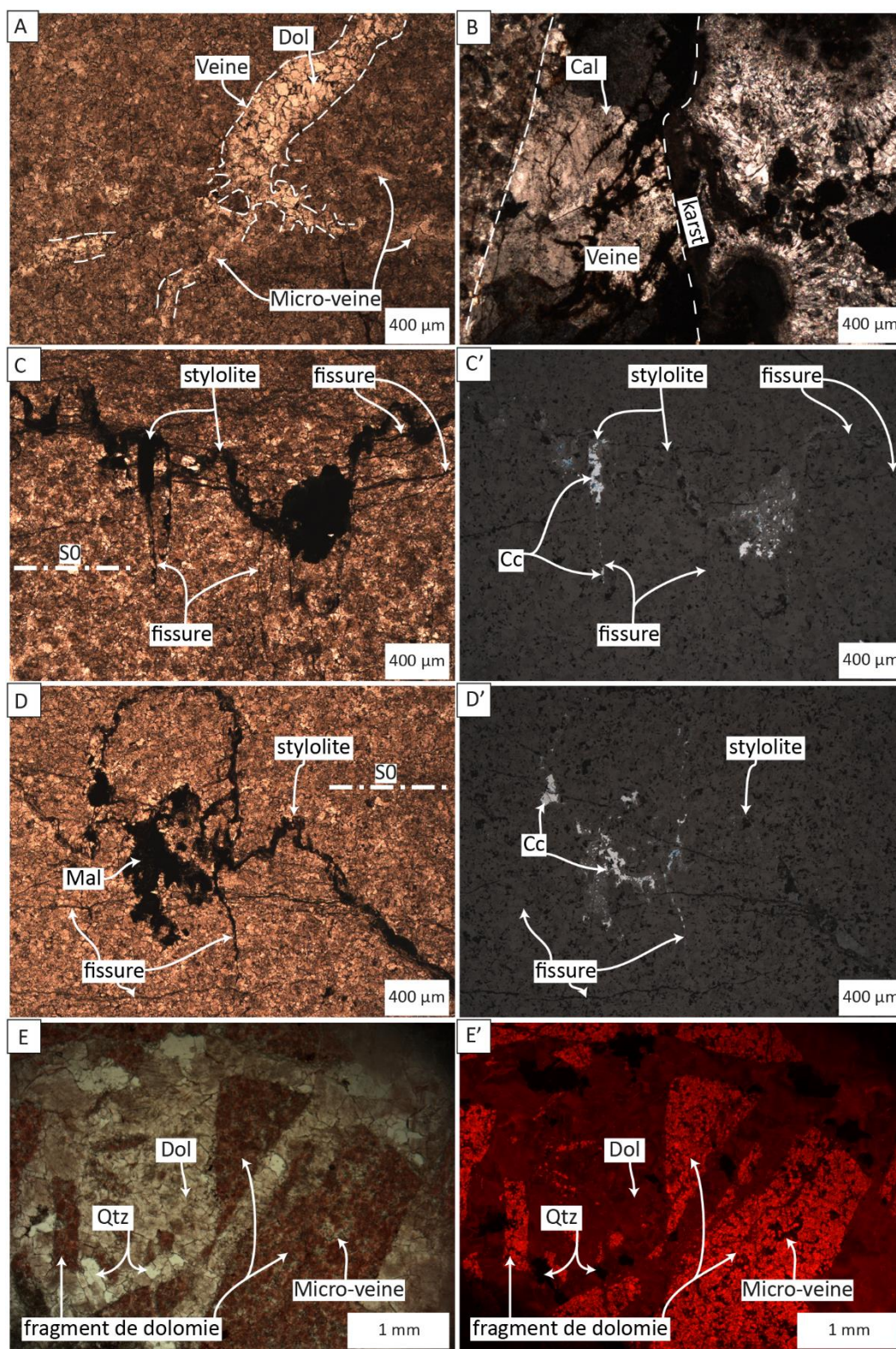


Figure 90 : Planche photographique des observations microscopiques, des différentes textures observées sur l'indice de Oued R'Them : A, terminaison d'une veine à dolomite sécante sur la S0 en fine micro-veine de dolomite au sein de la dolomie (LT, nic. //) ; B, veine à calcite et sulfures recoupée par un micro- karst (LT, nic. //) ; C (LT, nic. //) et C' (LR, nic. //), stylolites et réseau de fissure à chalcocite, D (LT, nic. //) et D' (LR, nic. //), stylolites et réseau de fissure à chalcocite et malachite ; E (LT, nic. //) et E' (image en cathodoluminescence, 13 mV, 98 mA et 2s), texture de micro-brèche hydraulique à fragments anguleux de dolomie, cimentées par du quartz et de la dolomite. Abréviations (Cf. légende Fig. 85, 86, 87 et 88).

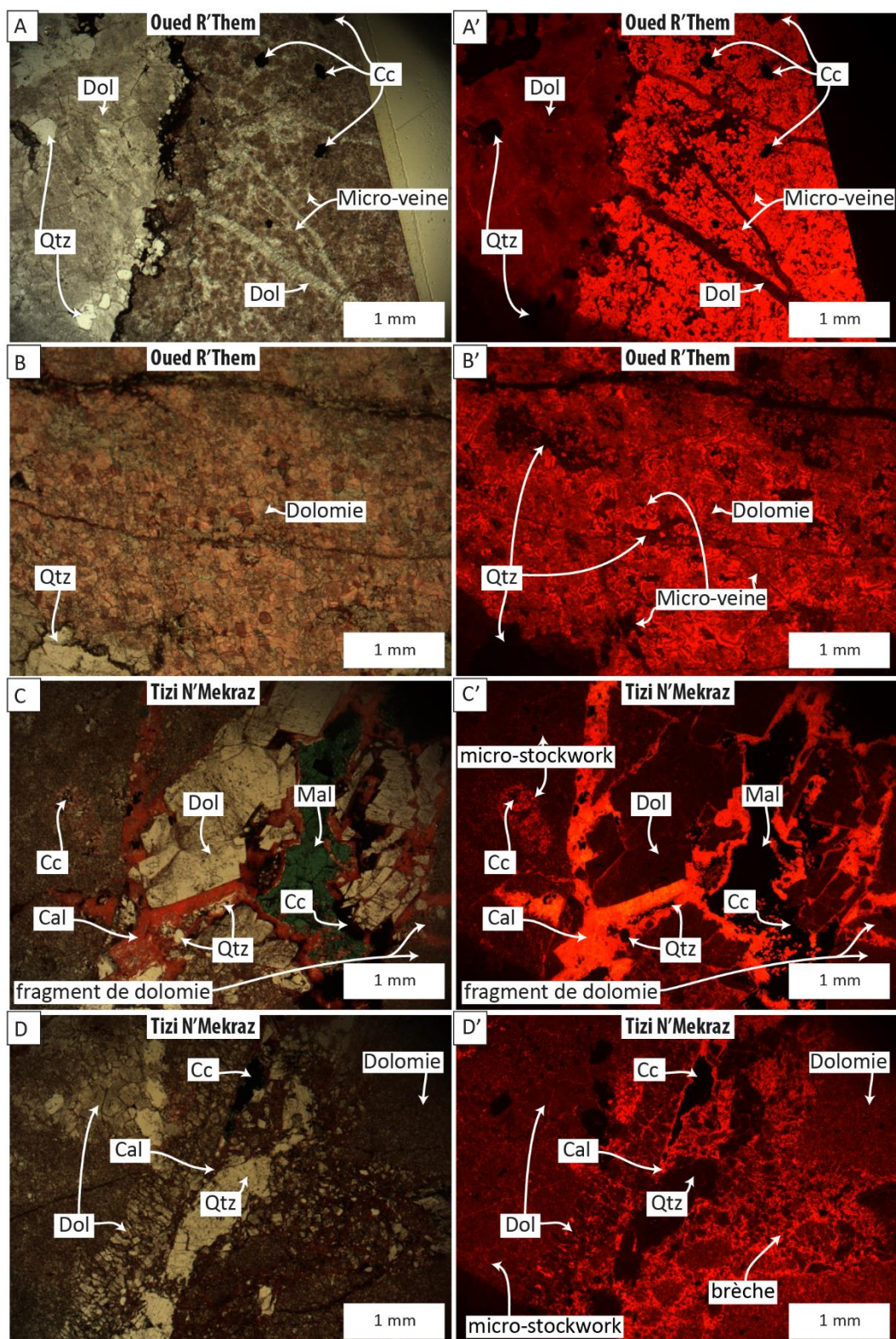


Figure 91 : Planche photographique des observations texturales effectuées au microscope à cathodoluminescence : A (LT, nic. //) et A' (12,7 mV, 112mA et 2s), veine à quartz et dolomite reliée à un réseau de veinules à quartz et/ou dolomite connectant les sulfures disséminées dans la dolomite ; B (LT, nic. //) et B' (15,1 mV, 144 mA et 0,5s), micro-stockwork sécant sur la S0 au sein de la dolomite ; C (LT, nic. //) et C' (15 mV, 116 mA et 0,5s), texture de brèche hydraulique à fragments de dolomite cimentés par du quartz de la dolomite, de la chalcocite, de la calcite et de la malachite ; D (LT, nic. //) et D' (14,9

mV, 122 mA et 1s), texture de brèche hydraulique à fragments de dolomie cimentés par du quartz de la dolomite et de la calcite. Abréviations (Cf. légende Fig. 85, 86, 87 et 88).

4.1.6. Séquence paragénétique

Les observations effectuées précédemment ont permis de proposer une succession paragénétique pour les trois indices de types « stratabound » étudiés (**Fig. 92**). Ces successions sont pour l'essentiel identiques. Les épisodes de fracturations sont justifiés par la présence de veines à remplissage d'un seul minéral (**Fig. 87C, F et 89A et C**) alors que ce même minéral est décrit en association avec des phases minéralogiques antérieures. Par exemple les **figures 91A et A'** montre une veine principale à quartz et dolomite connectée à une veine composée uniquement de dolomite sécante sur les épontes et les autres veines à quartz.

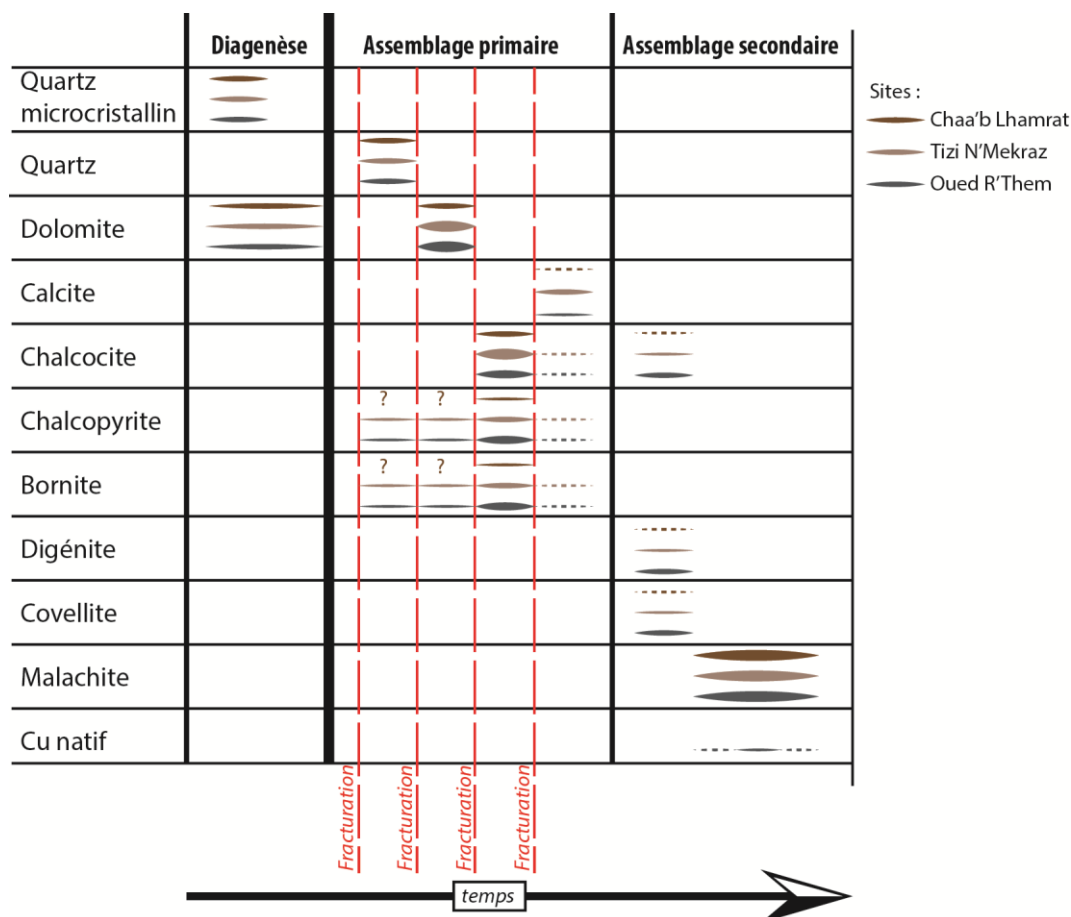


Figure 92 : Succession paragénétique des indices de Oued R'Them, Tizi N'Mekraz et Chaa'b Lhamrat.

4.2. LE TYPE « FOLDED-BAND »

4.2.1. La gangue

Les minéraux de gangue associés à la minéralisation de type « folded-band » sont le quartz, la dolomite et la calcite. Quand ces trois phases sont présentes, elle forme des rubans au sein des veines avec le quartz sur les épontes, puis la dolomite et enfin la calcite au centre (Fig. 93).

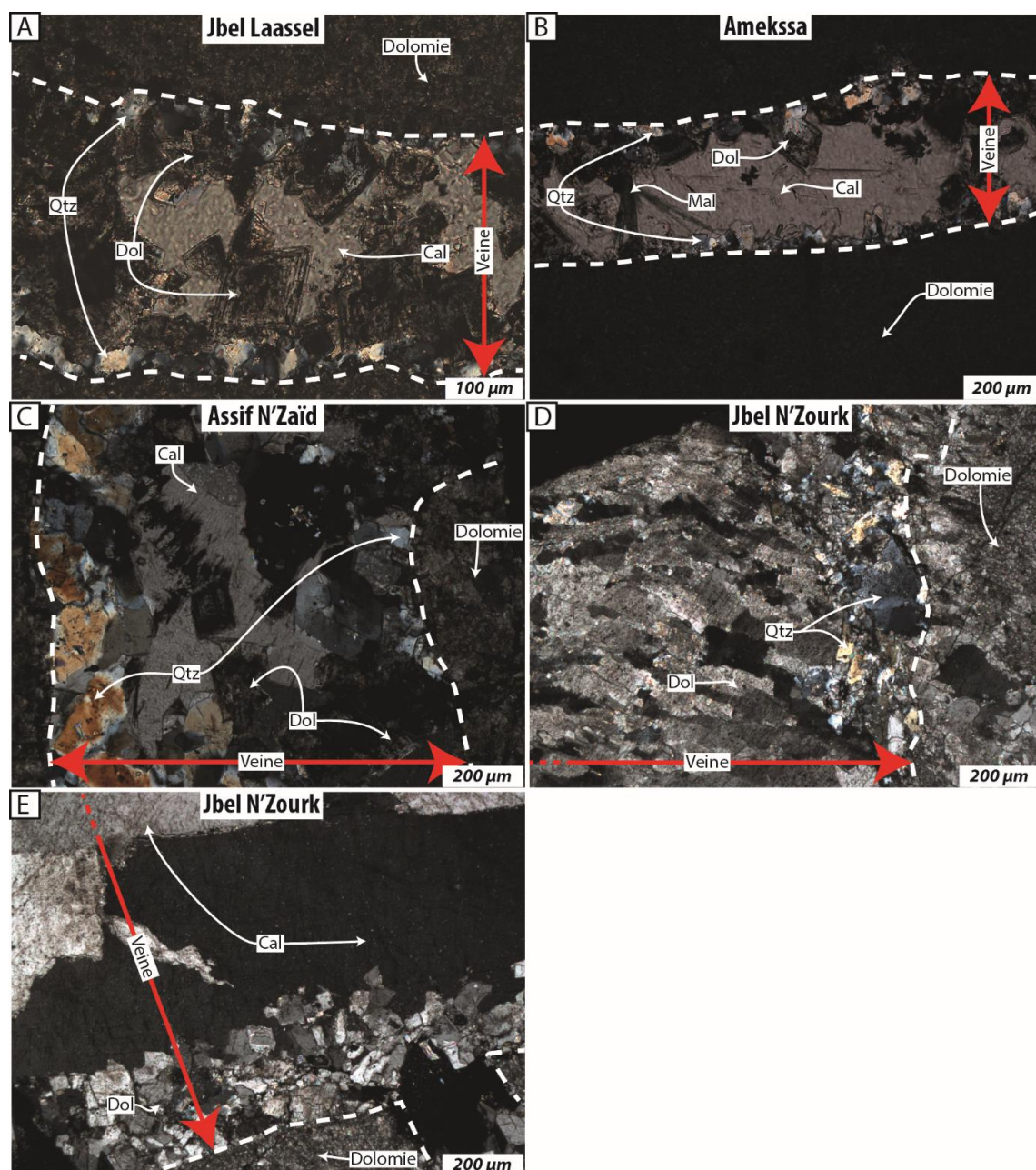


Figure 93 : Plaque photographique des minéraux de gangues associés à la minéralisation de type « folded band » : A, veine du stockwork du gisement de Jbel Laassel à quartz sur les épontes, dolomite et calcite au cœur (LT, nic. +) ; B, veine du stockwork de l'indice d'Amekssa à quartz sur les épontes, dolomite et calcite au cœur (LT, nic. +) ; C, veine du stockwork de l'indice d'Assif N'Zaïd à quartz sur les épontes, dolomite et calcite au cœur (LT, nic. +) ; D, veine du stockwork du gisement

de Jbel N'Zourk à quartz sur les épontes et dolomite au cœur (LT, nic. +) ; E, veine du stockwork du gisement de Jbel N'Zourk à dolomite sur les épontes et calcite au cœur (LT, nic. +). Abréviations (Cf. légende Fig. 85, 86 et 87).

4.2.2. Les sulfures

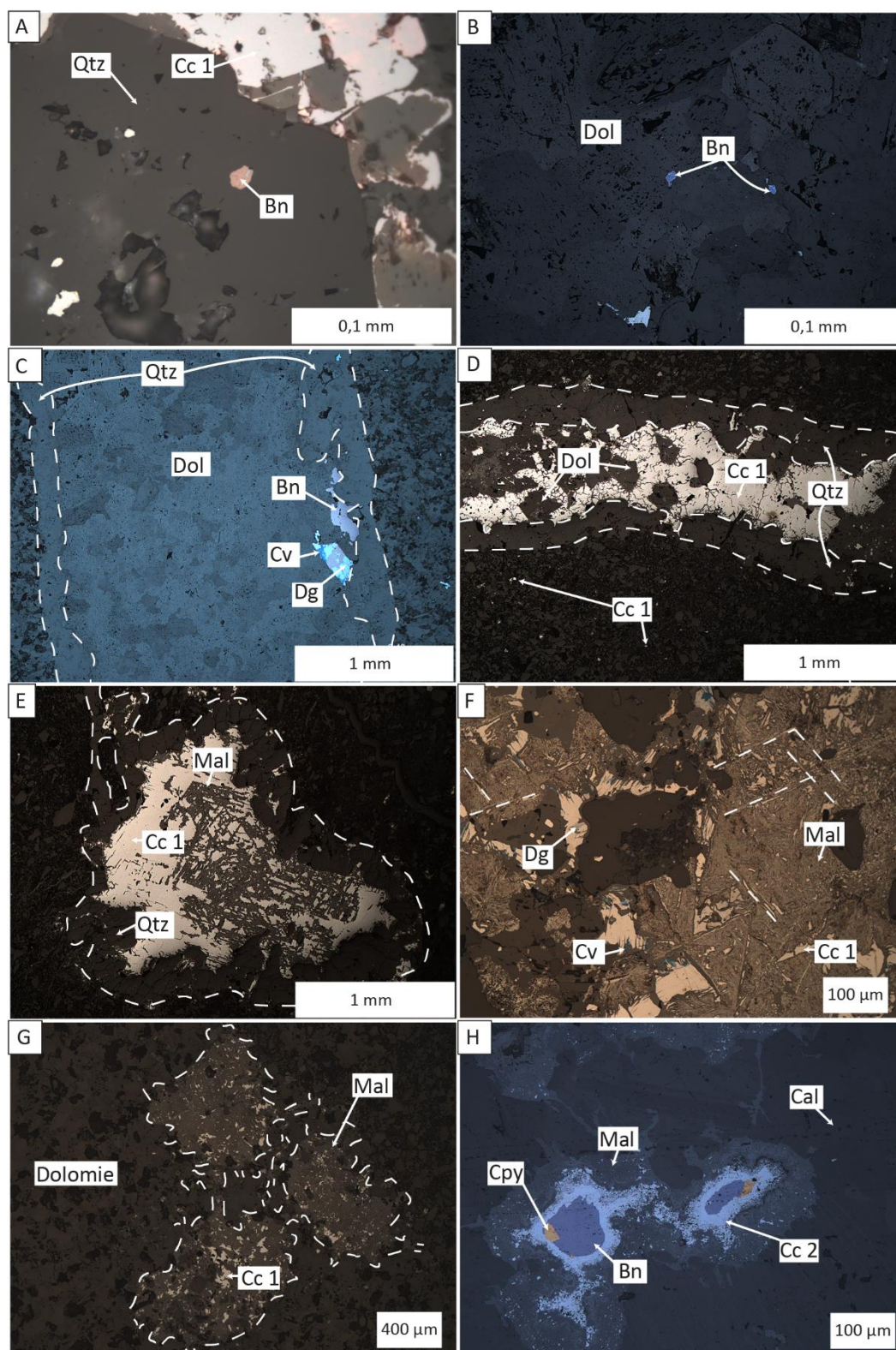


Figure 94 : Planche photographique des sulfures observés au niveau du gisement de Jbel Laassel : A, bornite en inclusion dans un cristal de quartz (LR, nic. //) ; B, bornite en inclusion dans un cristal de dolomite (LR, nic. //) ; C, bornite entre du

*quartz et de la dolomite (LR, nic. //) ; D, chalcocite cimentant des cristaux de quartz et de dolomite (LR, nic. //) ; E, clivage hexagonaux de la chalcocite soulignés par le remplacement de la chalcocite par de la malachite (LR, nic. //) ; F, clivage hexagonaux de la chalcocite soulignés par le remplacement de la chalcocite par de la malachite (LR, nic. //) ; G, dissémination de chalcocite et malachite connectées entre elles par des micro-veinules (LR, nic. //) ; H, chalcopyrite et bornite associée à de la calcite (LR, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**).*

Les sulfures présents dans la paragenèse de la minéralisation du gisement de Jbel Laassel, sans distinguer les sulfures primaires des sulfures secondaires sont : la chalcocite (Cu_2S), la bornite (Cu_5FeS_4), la chalcopyrite (CuFeS_2), la covellite (CuS) et la digénite (Cu_9S_5). La bornite et la chalcopyrite sont présentes en inclusion dans le quartz (**Fig. 94A**) et la dolomite (**Fig. 94B**) de la gangue mais également entre ces deux minéral (**Fig. 94C**). La chalcocite est présente en colmatage de la phase à dolomite (**Fig. 94D**) et elle présente localement des clivages hexagonaux (**Fig. 94E et F**) suggérant une formation primaire à une température supérieure à 103°C (Ramdohr, 1969). La bornite, la chalcopyrite et la chalcocite peuvent également être présentes en dissémination dans l'encaissant (**Fig. 94G**). La bornite et la chalcopyrite sont présentes en association avec la calcite de la gangue (**Fig. 94H**). Ces observations sont également valable pour les autres occurrences de types « folded-band » (**Fig. 95**).

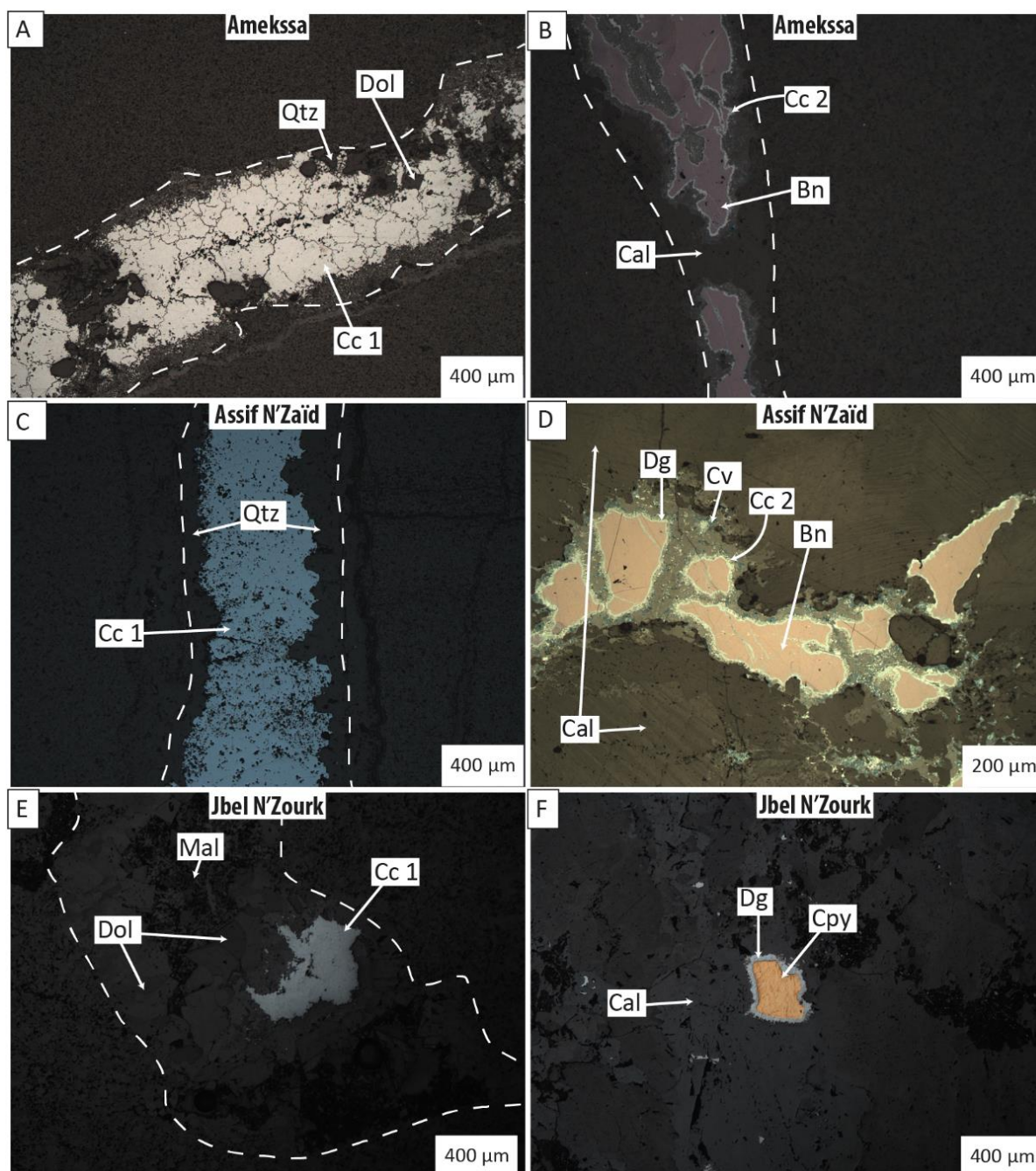


Figure 95 : Planche photographique des sulfures les plus présents dans les autres minéralisations de type « folded-band » : A, veine, de l'indice d'Amekssa, à chalcocite au centre, du quartz puis dolomite à l'éponte (LR, nic. //) ; B, veine, de l'indice d'Amekssa, à calcite et bornite (LR, nic. //) ; C, veine, de l'indice d'Assif N'Zaïd, à chalcocite au cœur et quartz à l'éponte (LR, nic. //) ; D, veine, de l'indice d'Assif N'Zaïd, à bornite et calcite (LR, nic. //) ; E, veine, du gisement de Jbel n'Zouk, à chalcocite et dolomite (LR, nic. //) ; F, veine, du gisement de Jbel n'Zouk, à chalcopyrite et calcite (LR, nic. //). Abréviations (Cf. légende Fig. 85, 86, 87 et 88).

4.2.3. Les minéraux supergènes

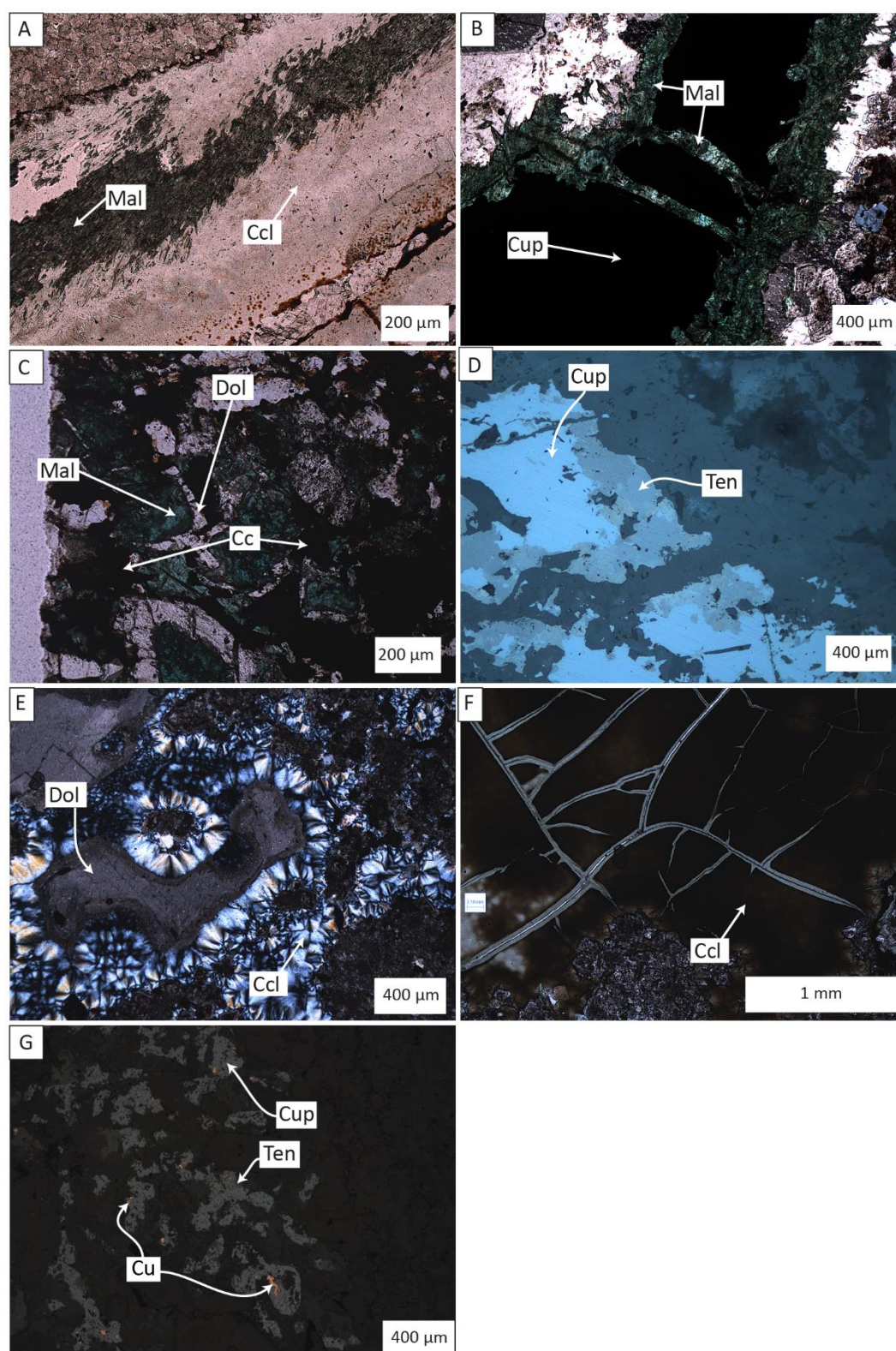


Figure 96 : Planche photographique des minéraux supergènes du gisement de Jbel Laassel : A, veine à malachite et chrysocolle (LT, nic. //) ; B, veine à malachite et cuprite (LT, nic. //) ; C, veine à dolomite remplacée par de la malachite (LT, nic. //) ; D, veine à cuprite et tenorite (LR, nic. //) ; E, Veine à dolomite montrant des textures en golfe de corrosion cicatrisés par de la chrysocolle (LR, nic. +) ; F, chrysocolle montrant des textures de « mudcracks » (LR, nic. //) ; G, Veine à cuprite,

tenorite et cuivre natif (LR, nic. //). Abréviations : Ccl, chrysocloe ; Cup, cuprite ; Ten, tenorite (Cf. légende Fig. 85, 86, 87 et 88).

Les minéraux associés à l'altération supergène des sulfures primaires sont composés de sulfures : chalcocite, digenite et covellite et pour la zone d'oxydation de malachite ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), de chrysocolle ($(\text{Cu},\text{Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot \text{X}(\text{H}_2\text{O})$), de cuprite (Cu_2O), de tenorite (CuO) et de cuivre natif. La malachite est présente en veinule sécante sur l'ensemble des structures (**Fig. 96B, et 97A**) ou en remplacement des sulfures et des dolomites (**Fig. 96C**). La cuprite est fréquemment associée à la tenorite (**Fig. 96D**) au sein de veine à malachite (**Fig. 96B**). Localement du cuivre natif est associé à la cuprite (**Fig. 96G**). La chrysocolle vient en remplacement de la malachite (**Fig. 96A et E**) et elle peut présenter des textures de « mudcracks » (**Fig. 96F**).

4.2.4. Textures microscopique

La minéralisation cuprifère de type « folded-band » se présente principalement sous la forme d'un stockwork comme cela a été décrit macroscopiquement. Les veines de ce stockwork présentent localement des textures de quartz en peigne (**Fig. 97A**). Les veines peuvent avoir une puissance variant de quelques centimètres à quelques micromètres (**Fig. 97B**) et elles sont sécantes sur le plan de stratification (**Fig. 97C**). Les sulfures primaires dans les veines du stockwork et ceux disséminés sont localement connectés (**Fig. 97C'**). Au sein des veines, des textures de micro-brèche cocarde ont été observées (**Fig. 97D**) ainsi que des textures de micro-brèches hydraulique à fragments anguleux d'encaissant présentant des texture en puzzle et cimentés par des minéraux de gangue et des sulfures (**Fig. 97B, F et G**). Les veines du stockwork peuvent présenter des terminaisons en un chevelu de micro veinules d'épaisseur micrométrique pouvant connecter plusieurs terminaisons de veines millimétriques entre elles (**Fig. 99A, C et D**). Ces veines sont également connectées à la minéralisation apparaissant comme disséminées macroscopiquement (**Fig. 99B**). Par ailleurs la minéralisation disséminée qui n'apparaît pas connectée au stockwork, présente au MEB des textures de micro-veinules à remplissage, des épontes vers le cœur, de quartz, dolomite et chalcocite (**Fig. 98**). Localement ces veines sont associées à des mouvements de microfailles en jeux apparent inverse (**Fig. 99E**). Au niveau du gisement de Jbel N'Zourk, des fantômes de pyrites ont été observés, fantôme à remplissage de minéraux de gangue du stockwork (**Fig. 99F**). La microscopie par cathodoluminescence a révélé, localement, la présence de silice amorphe en remplissage de veine du stockwork (**Fig. 100 A et A'**). Ces veines sont également associées à une silicification de l'encaissant (**Fig. 100B, B', C et C'**). Elles sont connectées à

un réseau de veines micrométriques formant un micro-stockwork de composition minéralogique et de texture identiques (**Fig. 100D et D'**).

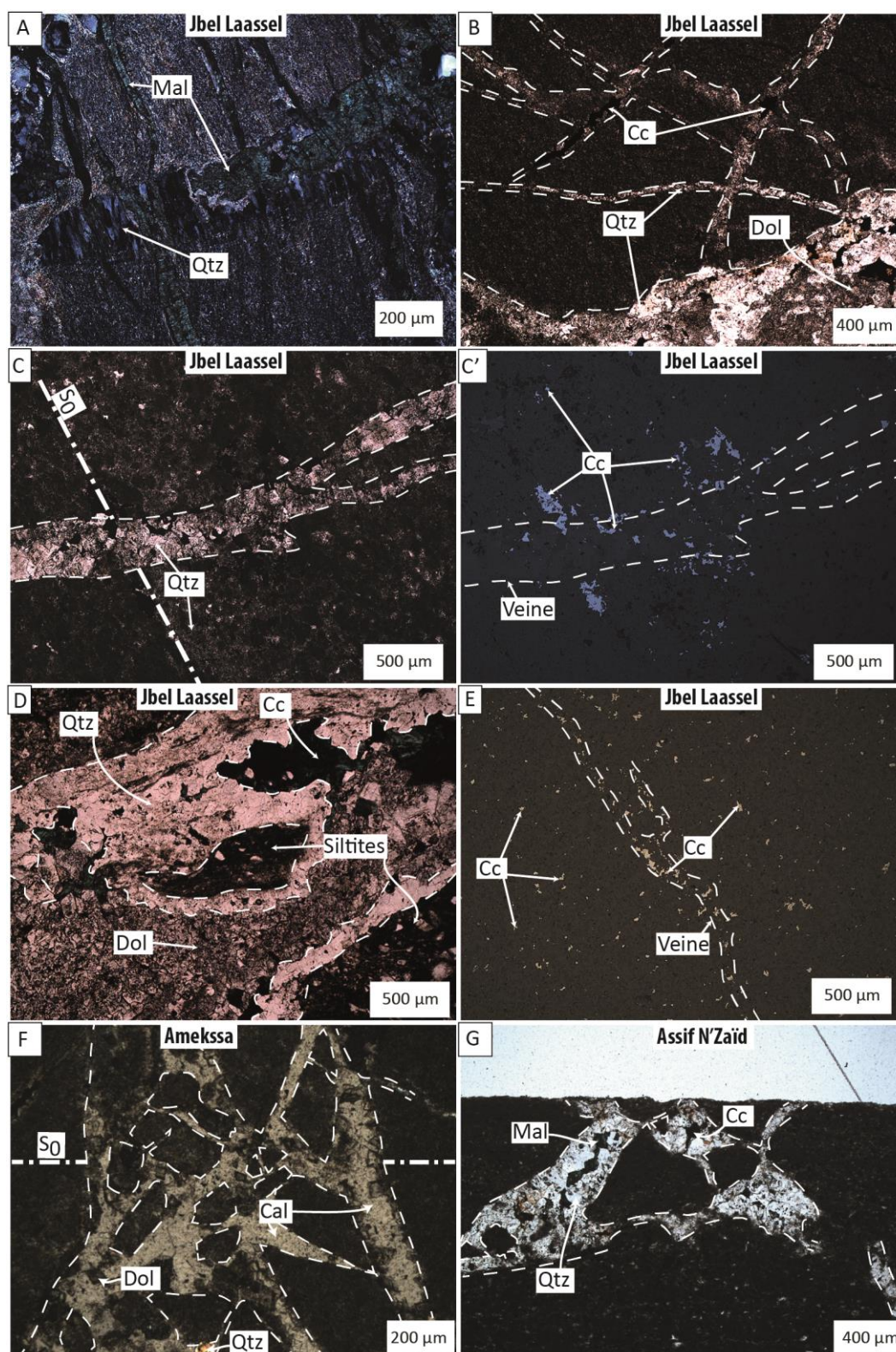


Figure 97 : Planche photographique des observations microscopiques des différentes textures observées sur les minéralisations de type « folded-band » : A, veine à quartz en peigne du gisement de Jbel Laassel (LT, nic. +); B, veine à quartz et dolomite, du gisement de Jbel Laassel, connectée à un micro-stockwork de veinule à quartz, dolomite et

chalcocite (LT, nic. //) ; C (LT, nic. //) et C' (LR, nic. //), veine, du gisement de Jbel Laassel, à quartz et chalcocite, sécante sur l'encaissant qui contient lui-même des chalcocites disséminées, connectées localement à la veine ; D, texture de micro-brèche cocarde au sein de veine du stockwork du gisement de Jbel Laassel, à élément de siltite cimentés par quartz, dolomite puis chalcocite (LT, nic. //) ; E, veinule de chalcocite et chalcocite disséminée dans l'encaissant du gisement de Jbel Laassel (LR, nic. //) – une vue à plus fort grossissement est donnée dans la figure 14; F, indice d'Amekssa, veine montrant des texture de micro-brèche hydraulique à fragment de dolomie cimentés par du quartz, de la dolomite et de la calcite de (LT, nic. //) ; G, indice d'Assif N'Zaïd, veine montrant des textures de micro-brèche hydraulique à fragment de dolomie cimentés par du quartz, de la chalcocite et de la malachite (LT, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**).

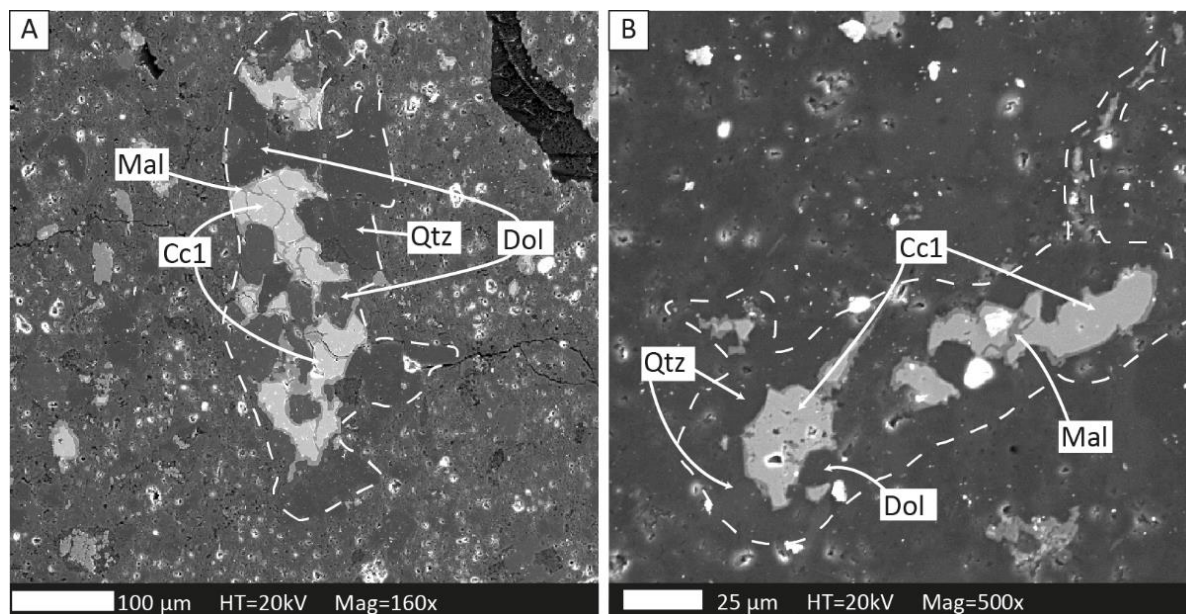


Figure 98 : Photographies prises au MEB des minéralisations disséminées du gisement de Jbel Laassel (Fig. 13E) : A, image en BSE d'une micro-veine (100 µm d'épaisseur) composée de quartz, de dolomite et de chalcocite ; B ; image en BSE d'une micro-veine (25 µm d'épaisseur) composée de quartz, de dolomite et de chalcocite. Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**).

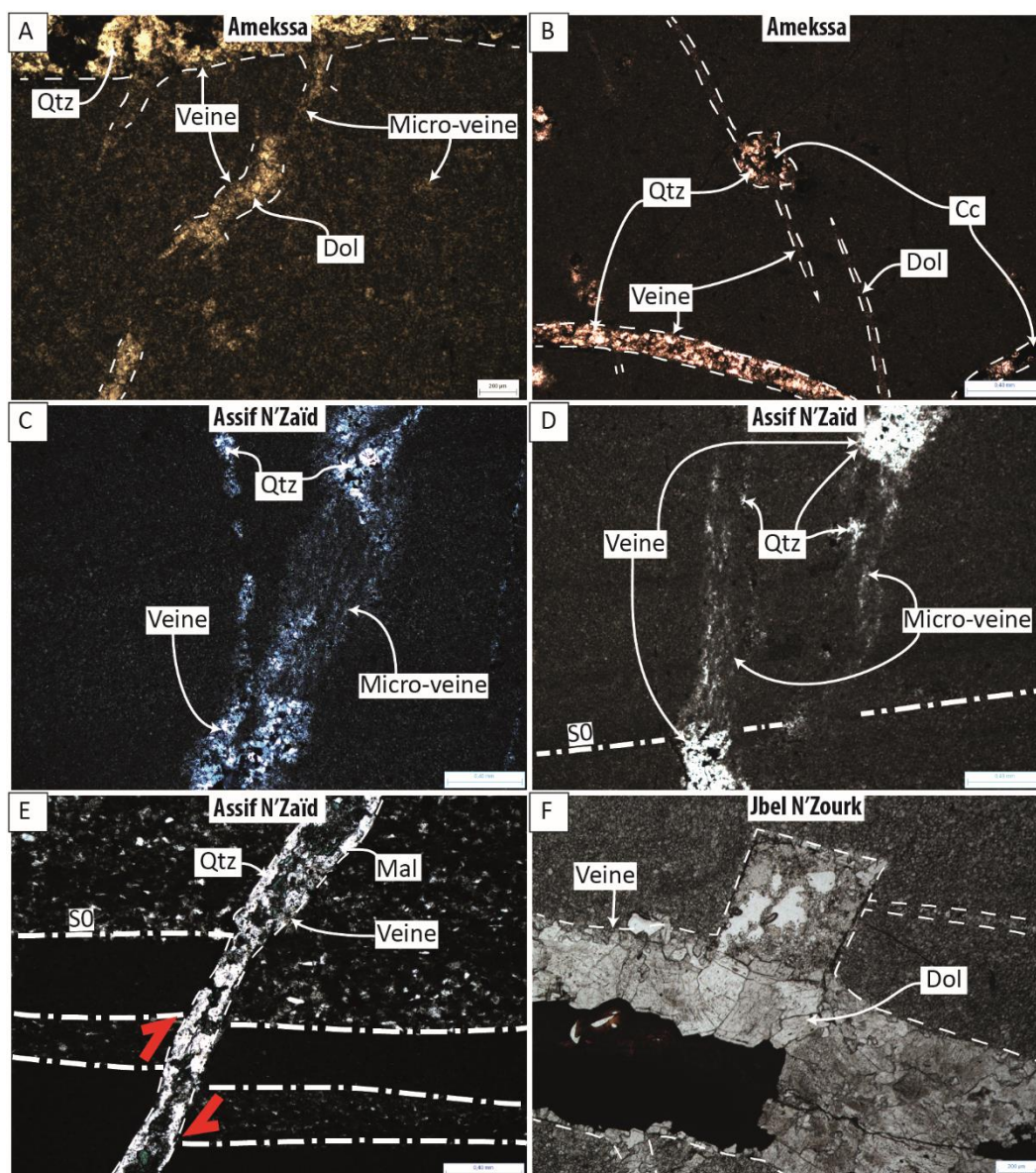


Figure 99 : Planche photographique des différentes textures observées au niveau des minéralisations de type « folded-band » : A, micro-veinule de dolomite connectée à une veine à quartz et dolomite du stockwork minéralisé de l'indice d'Amekssa (LT, nic. //) ; B, micro-géode (au centre de la photo), de l'indice d'Amekssa, à quartz et chalcocite connecté à un réseau de micro-veines (LT, nic. //) ; C, connexion entre deux veines, du stockwork minéralisé d'Assif N'Zaïd, à quartz via un réseau de micro-veines de quartz (LT, nic. +) ; D, terminaisons en micro-veines de deux veines à quartz, du stockwork minéralisé d'Assif N'Zaïd (LT, nic. //) ; E, veine à quartz et malachite, de l'indice d'Assif N'Zaïd, recoupant la S0 et la décalant en jeux inverse (LT, nic. //) ; F, veine à dolomite, du gisement de Jbel N'Zourk, connectée à un fantôme de pyrite remplacé par de la dolomite (LT, nic. //). Abréviations (Cf. légende Fig. 85, 86, 87 et 88).

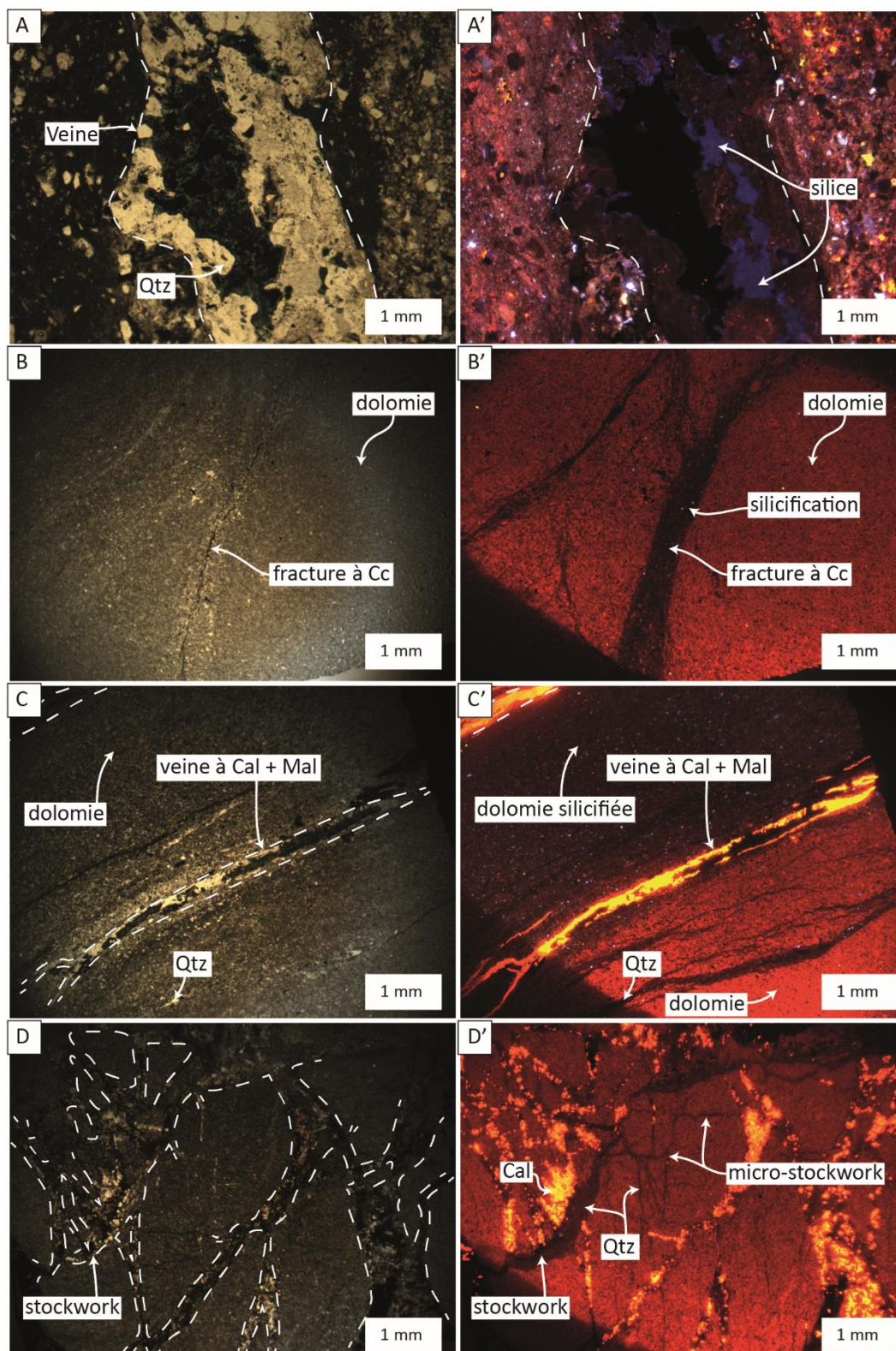


Figure 100 : Planche photographique des observations texturales effectuées au microscope à cathodoluminescence sur des échantillons du gisement de Jbel Laassel : A (LT, nic. //) et A' (15 mV, 132 mA et 15s), veine à quartz et chalcocite ainsi qu'à silice amorphe (couleur bleue) ; B (LT, nic. //) et B' (13,7 mV, 136 mA et 6s), fracture à chalcocite avec l'encaissant silicifié de part et d'autre de la fracture et connexion avec d'autres fractures ; C (LT, nic. //) et C' (14,5 mV, 120 mA et 5s), veine à calcite et malachite, encaissant silicifié et chevelu de quartz associé à la silicification de l'encaissant ; D (LT, nic. //) et D'

(13,4 mV, 128 mA et 4s), stockwork à quartz, dolomite et calcite bréchifiant la roche encaissante et montrant des textures de micro-brèche hydraulique. Abréviations (Cf. légende Fig. 85, 86, 87 et 88).

4.2.5. Séquence paragenétique

Les observations effectuées précédemment ont permis de proposer une succession paragenétique pour les minéralisations de types « folded-band » étudiés (Fig. 101). Dans les trois indices étudiés, les successions paragenétiques sont, pour l'essentiel, identiques. Comme pour la minéralisation de type « stratabound », les épisodes de fracturations sont justifiés par la présence de veines à remplissage d'un seul minéral (Fig. 97C, C', 99A, B, C, D, 100C, C', D et D') alors que ce même minéral est décrit en association avec des phases minéralogiques antérieures. Ces textures suggèrent une réouverture des veines existantes lors des phases de fracturation mais également la génération de nouvelles veines.

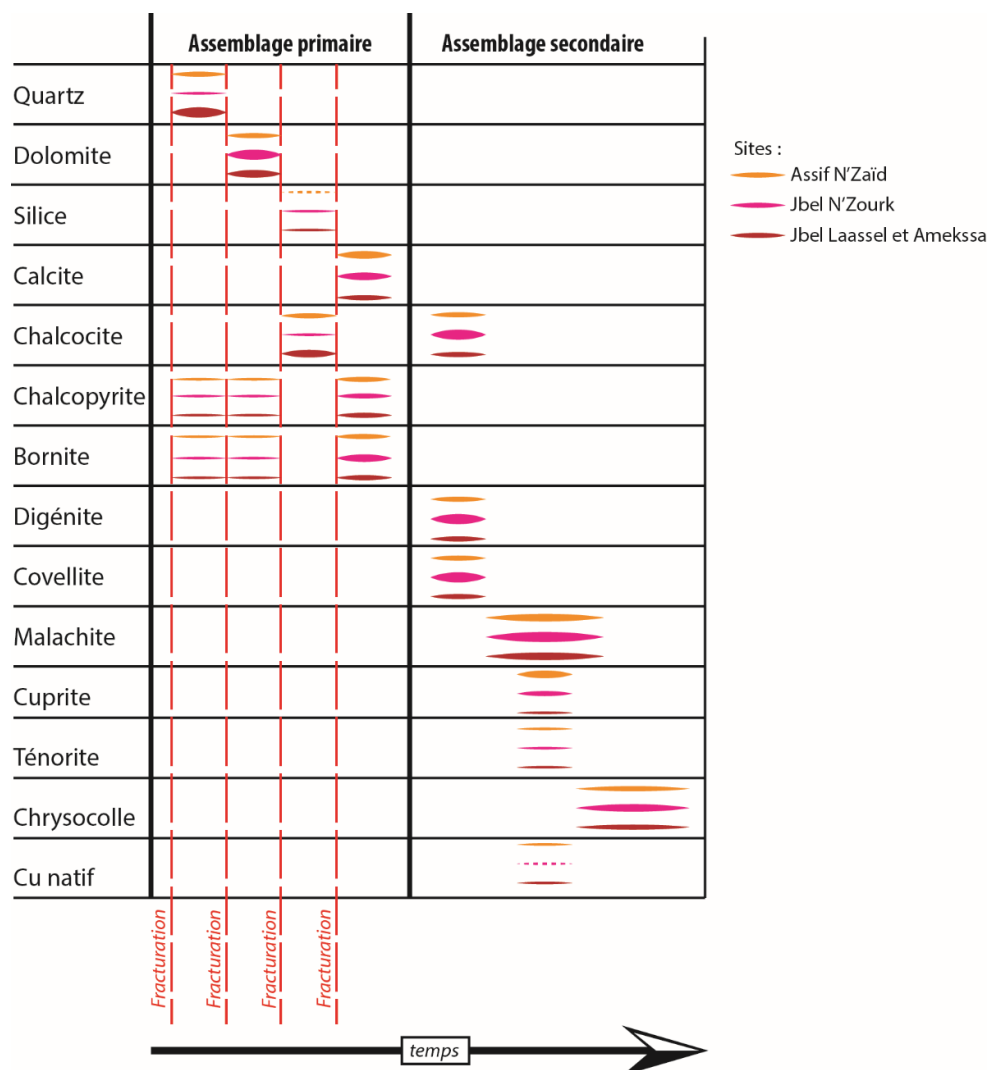


Figure 101: Succession paragenétique du gisement de Jbel Laassel et des indices d'Amekssa, Assif N'Zaïd et Jbel N'Zourk.

L'étude minéralogique des deux types de minéralisations, discriminées sur le terrain, révèle des successions paragenétiques identiques. De l'échelle décimétrique à l'échelle micrométrique, la texture minéralisée, quel que soit le type de minéralisation considéré, est celle d'un stockwork, dit en d'autres termes, la texture de ces minéralisations est auto-similaire.

Chapitre 5. Géochimie roches totales

Mise en contexte : *durant une année d'exploration minière au sein de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, en 2013, mon travail a consisté, en partie, à échantillonner les indices cuprifères en surface et à estimer leurs tonnages potentiels. Les bases de données géochimiques roches totales de ce chapitre proviennent en majeure partie de l'analyse multi-élémentaire, réalisée par le laboratoire Reminex, des échantillons ayant servi à estimer le potentiel cuprifère de ces indices. Les éléments dosés et la méthode analytique utilisée sont donnés dans Bourque et al. (2015). Pour les échantillons du gisement de Jbel Laassel, la base de données provient de l'analyse des sondages carottés et RC réalisés lors de la campagne de faisabilité du gisement en 2012. En plus de l'analyse des échantillons de la campagne d'exploration de 2013, j'ai réalisé, durant ma thèse, plusieurs profils d'échantillonnage verticaux dans le niveau porteur des indices de types stratabound avec une maille verticale d'échantillonnage de 10 à 20 centimètres, afin de détecter d'éventuelles variations de composition chimique, au sein d'un même profil et latérales entre les profils, mais également entre les différents indices de ce type. Le matériel et méthode de l'analyse sont présentés dans la publication de Bourque et al. (2015). Le but de ces études est également de chercher : (i) l'existence d'affinités entre le cuivre et d'autres éléments chimiques ; (ii) si ces affinités sont similaires au sein de plusieurs occurrences d'un même type d'indice ; (iii) de comparer les résultats des deux types d'occurrences « stratabound » et « folded band ». Ces bases de données ont été traitées dans un premier temps par une méthode statistique multivariée, l'analyse en composante principale (ACP) en utilisant le critère Varimax, et dans un second temps, si une affinité entre le cuivre et un autre élément a été suggéré par l'ACP, par une représentation binaire classique. Le nombre de variable peut varier d'une base de données à l'autre, soit parce que certains éléments chimiques n'ont pas été pris du fait de leurs teneurs trop faibles pour être significatives, voire même indétectables au regard de la méthode d'analyse; soit parce que les résultats n'ont pas encore été communiqués. Ce dernier point, explique que dans l'analyse des bases de données combinées, le nombre de variable peut diminuer par rapport à l'analyse d'une base de données relative à une seule zone.*

5. Géochimie roches totales

5.1. LE TYPE « STRATABOUND »

5.1.1. Oued R'Them

La base de données de l'indice de Oued R'Them contient 86 échantillons prélevés tous les 50 mètres le long du niveau porteur avec, à chaque station: un échantillonnage de la partie inférieure du niveau porteur, comprenant le banc de dolomie noire à gros grain inférieur et le banc intermédiaire de dolomie beige micritique/bréchique et un autre de la partie supérieure comprenant le banc de dolomie noire à gros grains supérieur. Sur ces 86 échantillons, 48 proviennent de 4 profils détaillés du niveau porteur avec un échantillonnage, réalisé avec un pas de 20 centimètres, allant de la brèche de base jusqu'au toit du niveau porteur.

Les résultats de l'ACP montrent que les deux facteurs F1 et F2 expliquent 61,15% de la variance totale (**Fig. 102A**). Quatre groupes sont distingués dans le plan F1-F2 : (i) un groupe représenté par P_2O_5 , K_2O , Al_2O_3 , TiO_2 et Sr (groupe 1), (ii) un deuxième groupe représenté par les terres rares (groupe 2), (iii) un groupe représenté par Na_2O , Ge, Zr (groupe 3), (iv) un dernier groupe représenté par MgO , MnO et la perte au feu (groupe 4) (**Fig. 102C**). Le poids du cuivre dans la définition des facteurs F1 et F2 est respectivement de 0,273 et -0,381, cependant dans ce plan, le cuivre semble être associé au groupe 3. La projection des observations dans le plan F1-F2 montre que le groupe 1 est associé à la brèche de base du niveau porteur, alors que les dolomies noires à gros grains inférieures et supérieures ainsi que le niveau de dolomie beige intermédiaire sont dispersés entre un pôle corrélé au groupe 3 et un autre anti corrélé à ce groupe (**Fig. 102D**). Dans la définition des facteurs F2, F3, F4 et F5 la variable cuivre pèse respectivement: -0,381, -0,309, -0,395 et -0,312. Malgré ces faibles coefficients de corrélations, ce sont ces facteurs qui représentent le mieux l'élément cuivre (**Fig. 102B**). Les plans F2-F3, F2-F4, F2-F5, F3-F4, F3-F5 et F4-F5 représentent respectivement 20,07%, 17,61%, 17,54%, 11,68%, 11,61% et 9,15% de la variance totale des données (**Fig. 102E, 103A, C, E et 103A et C**). Dans les plans F2-F3, F3-F4 et F4-F5 la variable cuivre n'est associée à aucune des autres variables représentées (**Fig. 102E, 103E et 104C**). La projection des variables dans les plans F2-F4, F2-F5 et F3-F5 suggère respectivement une affinité entre la variable cuivre et : MnO , le groupe 3 et Ba (**Fig. 103A, C et 104A**). Cependant la représentation de ces potentielles affinités dans un espace binaire

montre que les R^2 des éléments présentant une affinité par ACP sont compris entre 0 et 0,14 (**Fig. 105**) ce qui va dans le sens que le cuivre n'a d'affinité avec aucun des autres éléments analysés (**Tab. 2**). La représentation des observations dans les plans F2-F3, F2-F4, F2-F5, F3-F4, F3-F5 et F4-F5 confirme le lien entre le groupe 1 et le niveau de brèche de base mais ne met pas en évidence un lien entre le cuivre et les lithologies représentées (**Fig. 102F, 103B, D, F et 104B et D**).

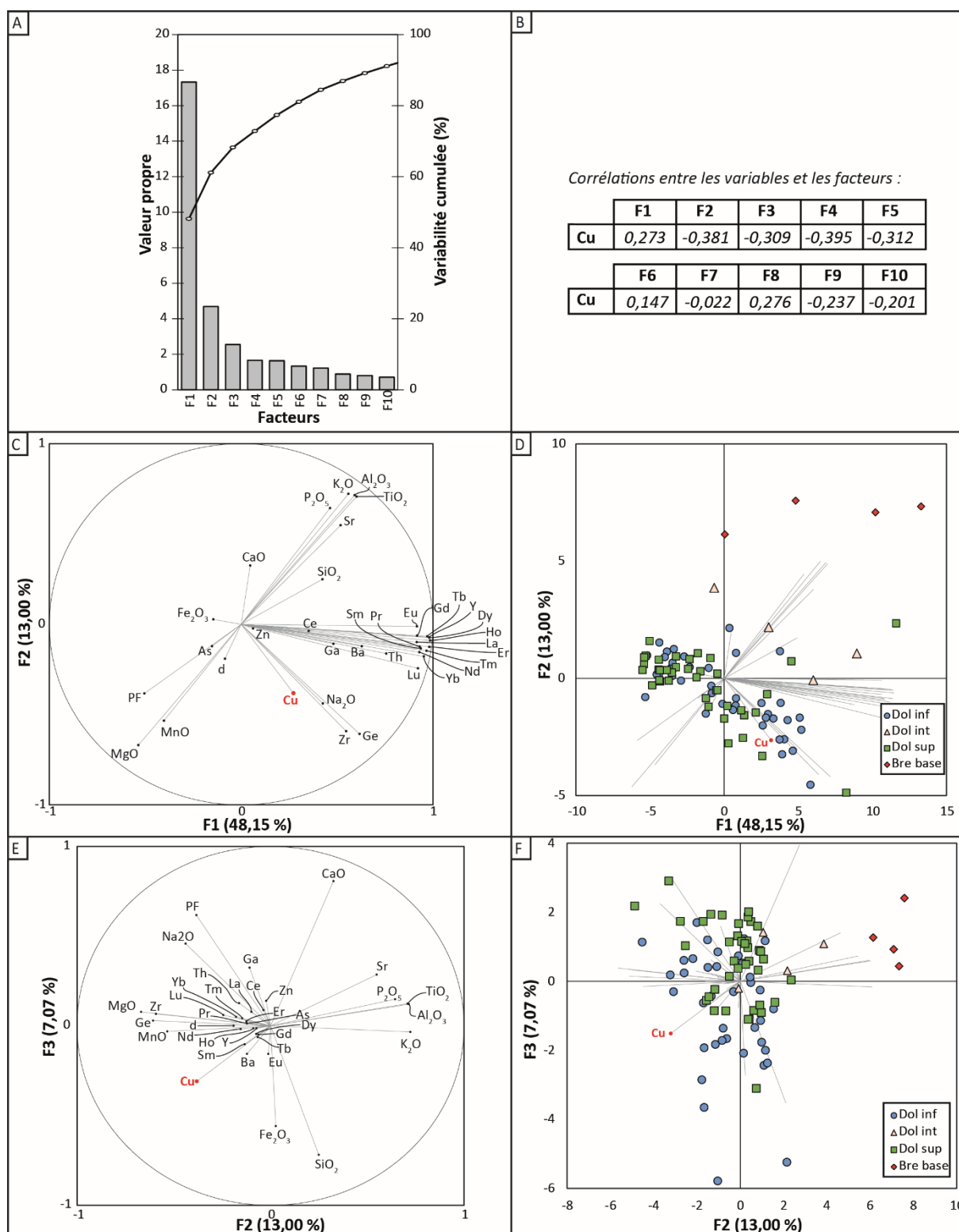


Figure 102 : Résultats de l'ACP pour la base de données de Oued R'Them (86 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F2-F3. F : Projection dans le plan F2-F3 des observations et de leur lithologie.

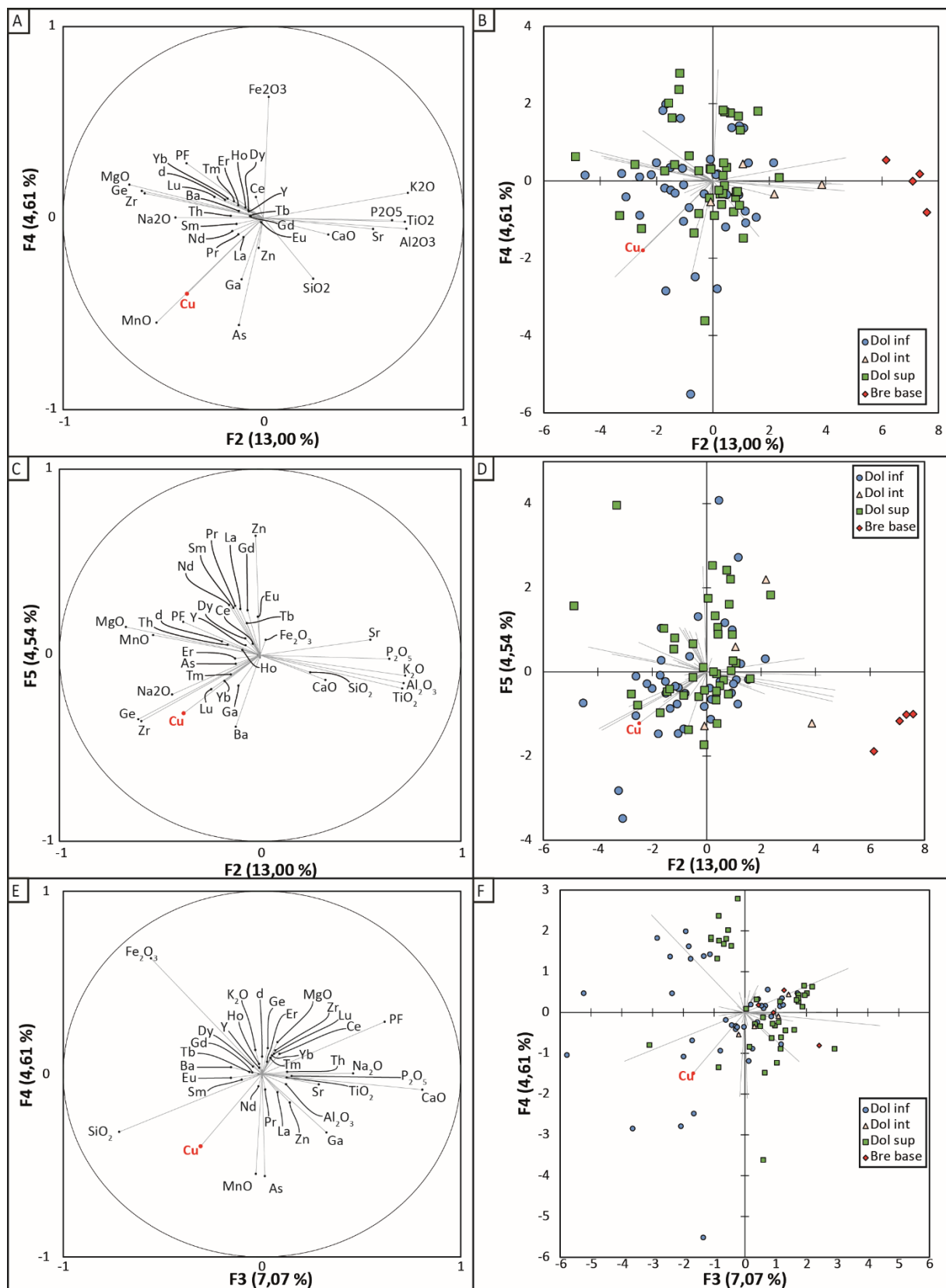


Figure 103 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'indice de Oued R'Them (86 observations). A : Projection des variables dans le plan F2-F4. B : Projection dans le plan F2-F4 des observations et de leur lithologie. C : Projection des variables dans le plan F2-F5. D : Projection dans le plan F2-F5 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F3-F4. F : Projection dans le plan F3-F4 des observations et de leur lithologie.

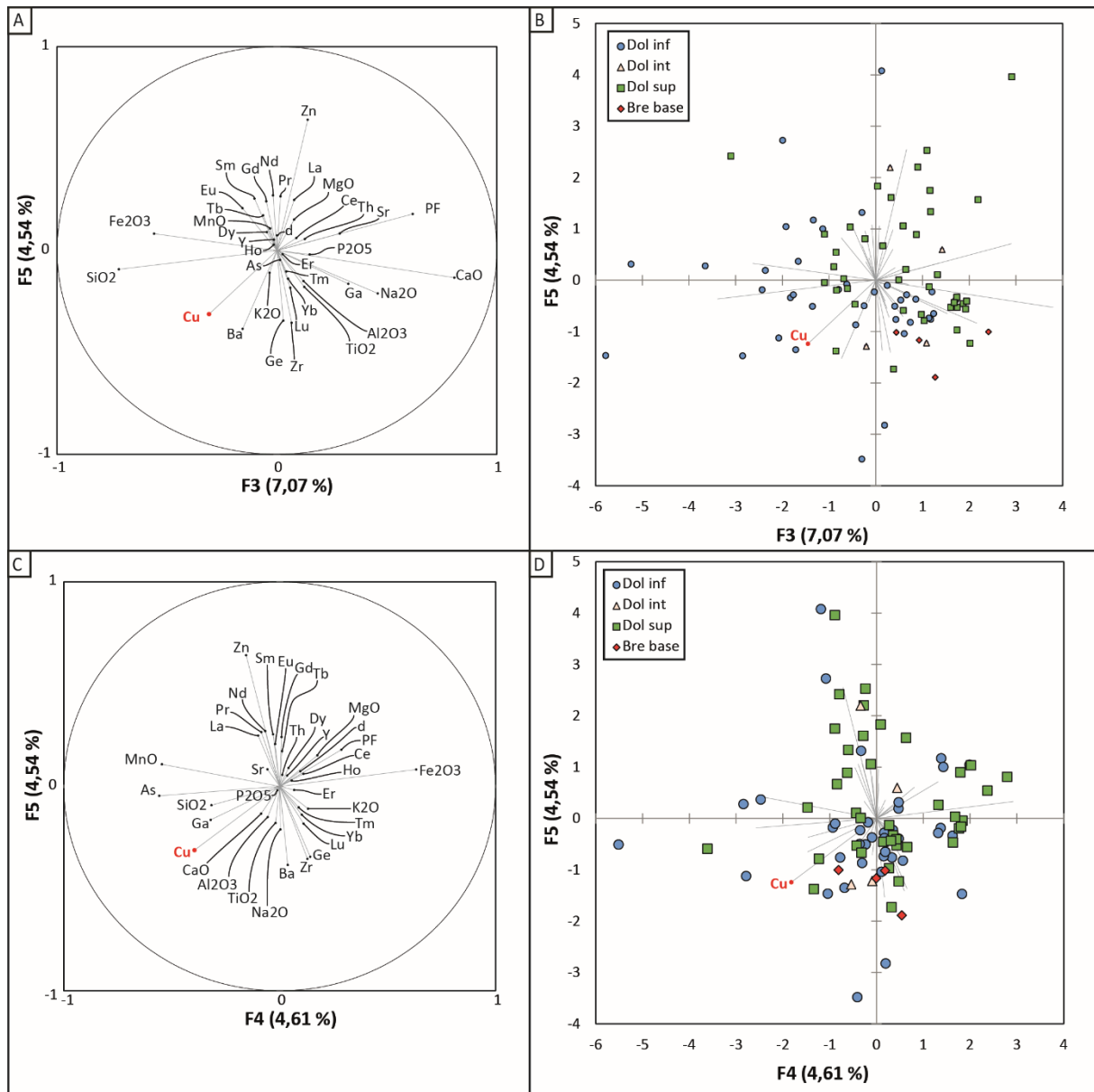


Figure 104 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'indice de Oued R'Them (86 observations). A : Projection des variables dans le plan F3-F5. B : Projection dans le plan F3-F5 des observations et de leur lithologie. C : Projection des variables dans le plan F4-F5. D : Projection dans le plan F4-F5 des observations et de leur lithologie.

Tableau 2: Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variable cuivre de la base de données de l'indice de Oued R'Them.

Variables	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	P2O5	Na2O	As	Ba
Cu	0,262	-0,053	-0,113	-0,222	0,006	-0,093	0,207	-0,061	-0,191	0,088	0,198	0,356
Variables	Cu	Sr	Zn	Ga	Ge	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm
Cu	1	-0,108	-0,140	0,183	0,372	0,370	0,272	0,249	0,175	0,254	0,259	0,257
Variables	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	PF	densité (d)
Cu	0,237	0,261	0,253	0,255	0,269	0,279	0,298	0,306	0,330	0,215	-0,270	0,006

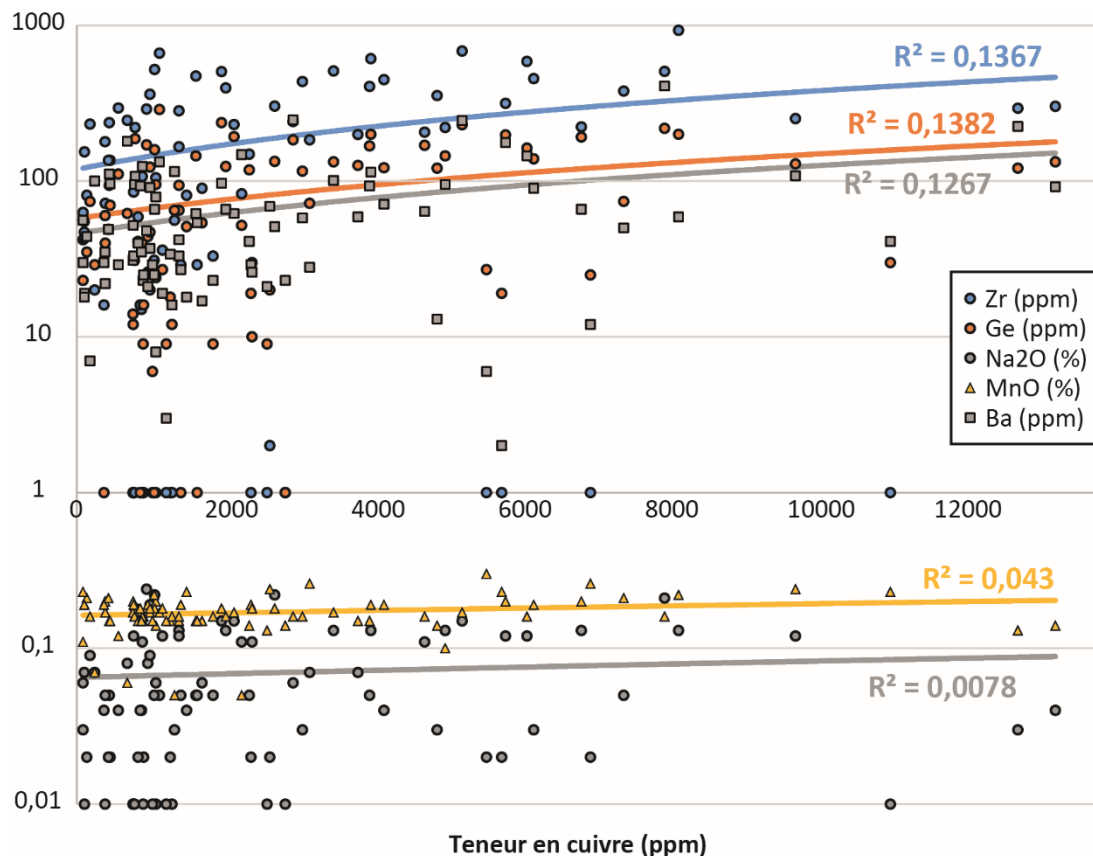


Figure 105 : Graphique binaire représentant les teneurs en Zr, Ge, Na₂O, MnO et Ba en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R² est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.

5.1.2. Tizi N'Mekraz

NB : pour alléger la lecture de ce chapitre, qui peut paraître fastidieuse et répétitive, nous reprendrons le même type de description que pour l'indice de Oued R'Them mais en citant uniquement les observations principales, sans détailler le cheminement qui est, et qui sera identique pour chaque indice. Cependant en introduction de chaque indice, nous donnerons une description sommaire de la base de données car la nature ainsi que le nombre d'échantillons peuvent varier d'une base de données à l'autre.

La base de données de l'indice de Tizi N'Mekraz contient 18 échantillons prélevés le long d'un profil d'échantillonnage vertical du niveau porteur, réalisé avec une maille d'échantillonnage de 20 centimètres. Cet échantillonnage a été effectué de la brèche de base jusqu'au toit du niveau porteur. Cette base de données contient des analyses des teneurs en cuivre total (Cu), en cuivre oxydé (CuOX) et en Argent (Ag).

Les résultats de l'ACP sont les suivants :

- Les deux facteurs F1 et F2 expliquent 64,81% de la variance totale (**Fig. 106A et C**).
- Dans le plan F1-F2 (**Fig 106C**), il est possible de distinguer un groupe porté par MgO, la perte au feu et MnO. Les autres variables sont dispersées (**Fig. 106C**).
- Cette représentation ne montre pas d'affinité entre le cuivre (total et oxydé) et les autres variables (**Fig 106C**).
- Les facteurs F2, F4 et F5 possèdent les plus forts coefficients de corrélation avec la variable cuivre (**Fig. 106B**). Par ailleurs, le facteur F3 est le mieux corrélé avec la variable argent (**Fig. 106B**).
- Les plans F2-F4, F3-F4, F2-F5 et F4-F5 représentent entre 11 et 26% de la variance totale (**Fig. 104E, 105A, C et E**).
- Les représentations des variables, comme des observations, dans ces plans F2-F4, F3-F4, F2-F5 et F4-F5 montrent que les variables cuivre et cuivre oxydé ne sont associés à aucuns éléments représentés par ces facteurs (**Fig. 106E, F, 107A, B, C, D et E**).
- Les plan F3-F4 et F5-F2 peuvent laisser sous-entendre que les variables cuivre et cuivre oxydé pourraient être associées aux variables Sr, Ba, Fe₂O₃ et MnO.
- Les coefficients de corrélations entre le cuivre et ces variables sont de 0,32 pour Fe₂O₃, 0,44 pour MnO, -0,07 pour Ba et 0,08 pour Sr (**Tab. 3**).
- En projection binaire, les R² avec ces variables sont compris entre 0 et 0,2 (**Fig. 108**)
- Le cuivre, total comme oxydé, n'est associé à aucune autre variable.

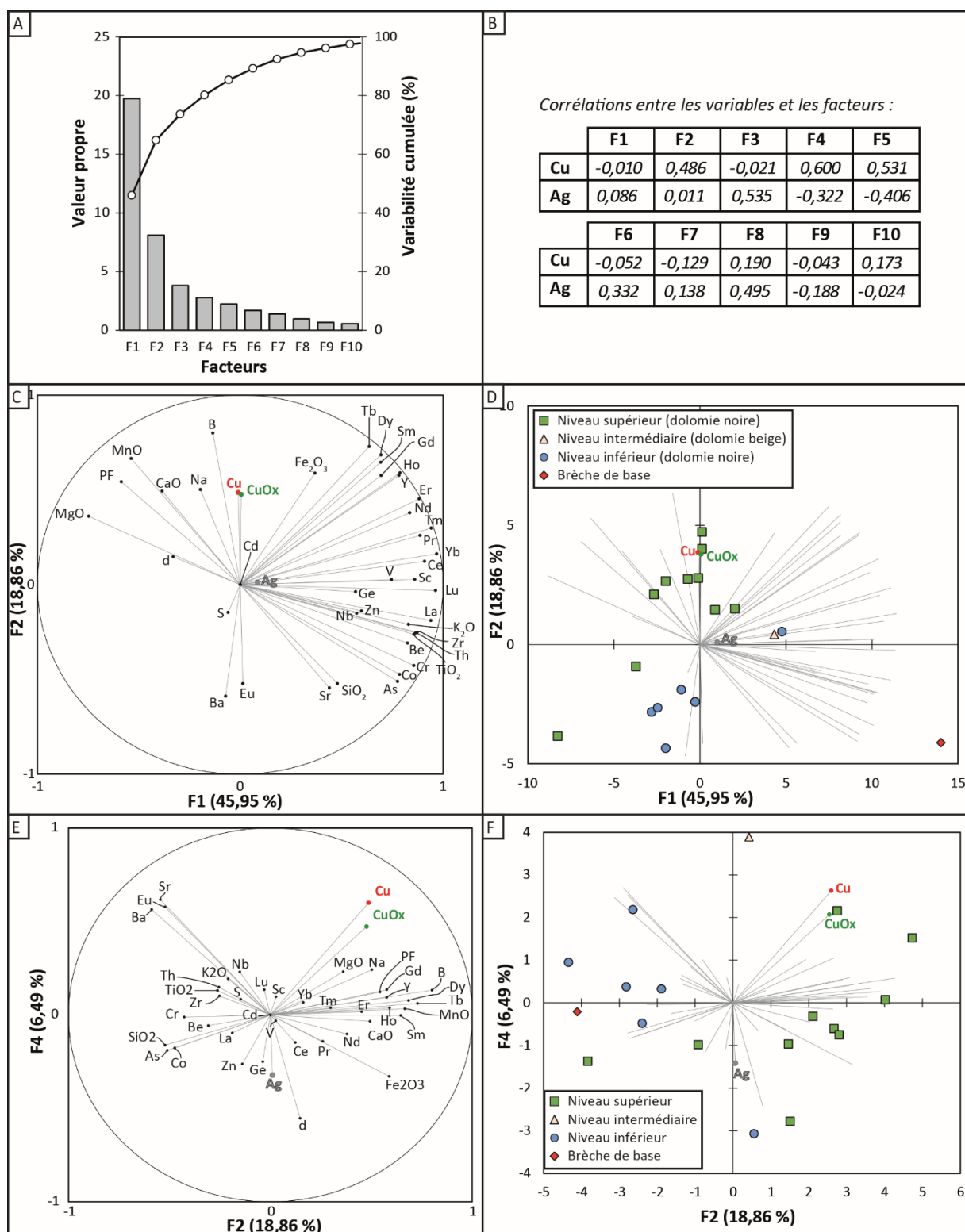


Figure 106 : Résultats de l'ACP pour la base de données de Tizi N'Mekraz (18 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F2-F4. F : Projection dans le plan F2-F4 des observations et de leur lithologie.

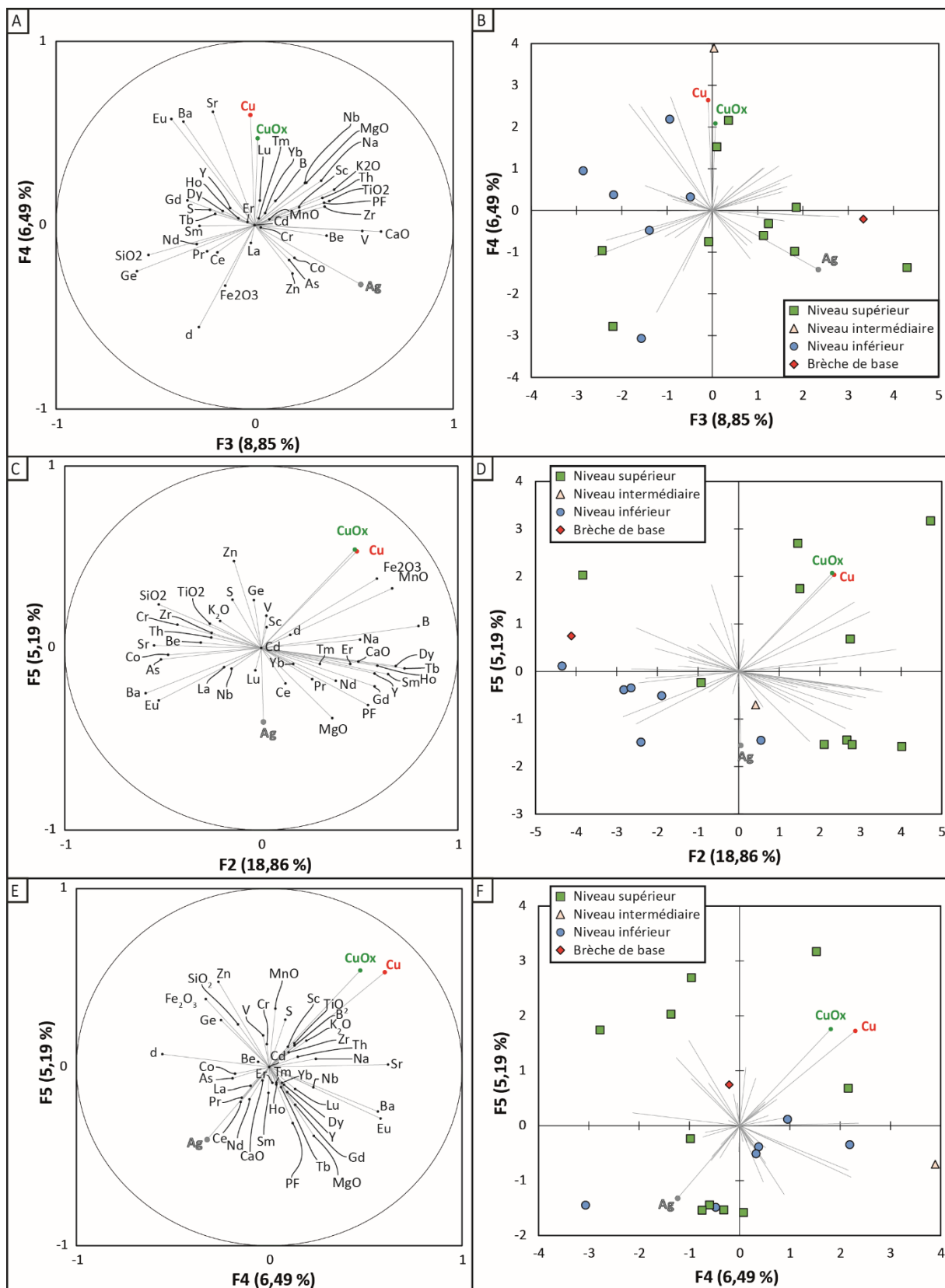


Figure 107 : Résultats de l'ACP pour la base de données de Tizi N'Mekraz (18 observations). A : Projection des variables dans le plan F3-F4. B : Projection dans le plan F3-F4 des observations et de leur lithologie. C : Projection des variables dans le plan F2-F5. D : Projection dans le plan F2-F5 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F4-F5. F : Projection dans le plan F4-F5 des observations et de leur lithologie.

Tableau 3 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre de la base de données de l'indice de Tizi N'Mekraz.

Variables	PF	S	SiO2	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	As	B	Ba
Cu	0,167	0,069	-0,200	0,321	0,128	0,128	0,028	0,441	-0,032	-0,373	0,428	-0,069
Variables	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Nb	Sr	Zn	Ge	Na	Sc	V
Cu	-0,154		-0,333	-0,184	1	0,062	0,084	0,028	-0,083	0,449	0,144	0,028
Variables	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
Cu	-0,074	0,252	-0,205	-0,108	-0,035	0,029	0,221	-0,051	0,238	0,317	0,318	0,248
Variables	Er	Tm	Yb	Lu	Th	densité (d)	CuOx	Ag				
Cu	0,178	0,120	0,069	-0,002	-0,059	-0,129	0,907	-0,334				

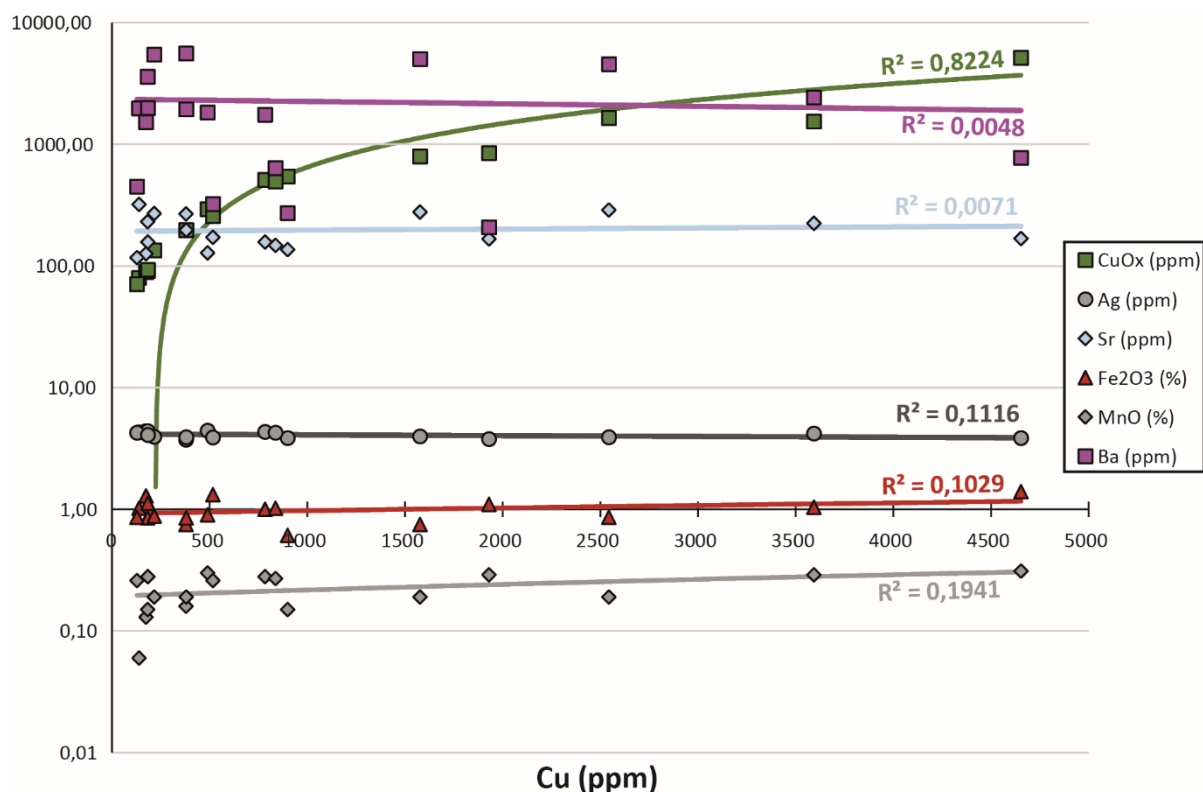


Figure 108: Graphique binaire représentant les teneurs en cuivre oxydé (CuOx), Ag, Sr, Fe2O3, MnO et Ba en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R2 est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.

5.1.3. Chaa'b Lhamrat

La base de données de l'indice de Chaa'b Lhamrat est composée de 26 échantillons correspondant à l'échantillonnage de l'ensemble du niveau porteur de cet indice, avec prélèvement pour chaque station : du banc de dolomies noires inférieur, du banc de dolomie beige intermédiaire et du banc de dolomies noires supérieur. Cette base de données contient des analyses du cuivre total (Cu).

Les résultats de l'ACP sont les suivants :

- Les facteurs F1 et F2 expliquent 64,41% de la variance totale (**Fig. 109A et C**).
- Dans le plan F1-F2, trois groupes sont discriminés : (1) Ge, SiO2 et Cr, (2) les Terres Rares, K2O, Al2O3 et TiO2, (3) MgO, la perte au feu et CaO (**Fig. 109 C**).

- Le cuivre n'est associé à aucun de ces trois groupes (**Fig. 109C**).
- Les facteurs F2, F3 et F7 possèdent les plus forts coefficients de corrélations avec le cuivre (**Fig. 109B**).
- Dans les plans F2-F7 et F3-F7 la variable cuivre n'est associée à aucune des autres variables discriminées (**Fig. 109E et F**).
- Dans le plan F2-F3 la variable cuivre semble être corrélée avec la variable zinc (**Fig. 109D**).
- Le coefficient de corrélations entre le zinc et le cuivre est de 0,532 ce qui pourrait sous-entendre une corrélation possible entre ces deux éléments
- La projection binaire du zinc et du cuivre montre que le coefficient de détermination entre ces deux éléments est de 0,28 (**Fig. 110**).
- Il ne semble donc pas y avoir de corrélation entre le zinc et le cuivre.
- Les variables chrome et perte au feu présentent des coefficients de corrélation de - 0,52 et 0,54 avec le cuivre (**Tab. 4**). Cependant leurs R^2 avec le cuivre en projection binaire sont respectivement de 0,27 et 0,29 (**Fig. 110**).
- Le cuivre n'est associé à aucuns autres éléments de la base de données.

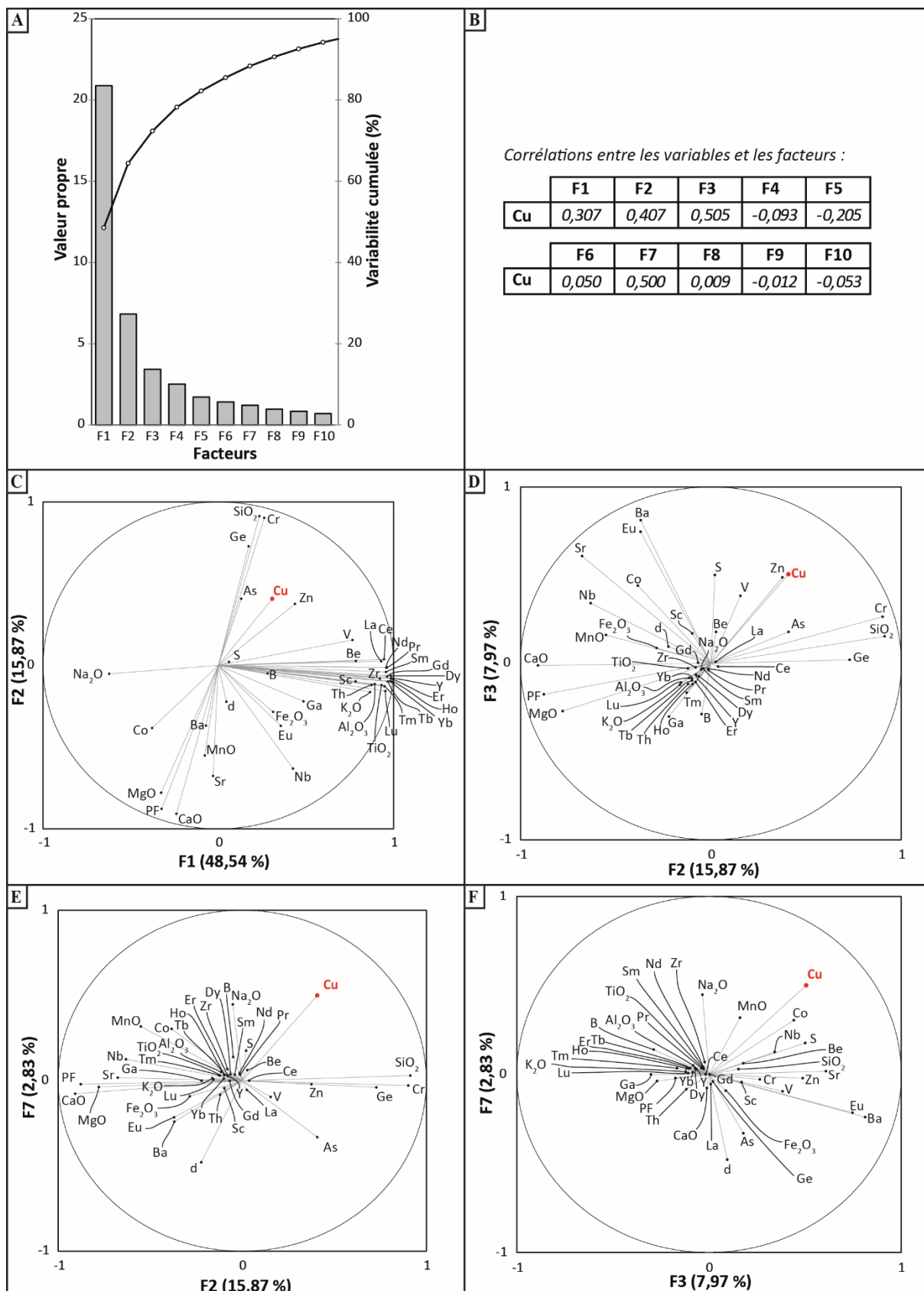


Figure 109 : Résultats de l'ACP pour la base de données de Chaa'b Lhamrat (26 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection

des variables dans le plan F1-F2. D : Projection des variables dans le plan F2-F3. E : Projection des variables dans le plan F2-F7. F : Projection des variables dans le plan F3-F7.

Tableau 4 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre de la base de données de l'indice de Chaa'b Lhamrat.

Variables	PF	S	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	Na2O	As
Cu	-0,521	0,419	0,499	0,220	-0,092	-0,497	-0,495	0,134	-0,144	0,257	-0,165	0,170
Variables	B	Ba	Be	Co	Cr	Cu	Nb	Sr	Zn	Ga	Ge	Sc
Cu	0,019	0,113	0,276	0,105	0,540	1	0,088	-0,033	0,532	-0,045	0,182	0,275
Variables	V	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
Cu	0,488	0,306	0,260	0,206	0,251	0,249	0,260	0,271	0,214	0,259	0,220	0,251
Variables	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	d					
Cu	0,223	0,238	0,185	0,240	0,196	0,152	-0,260					

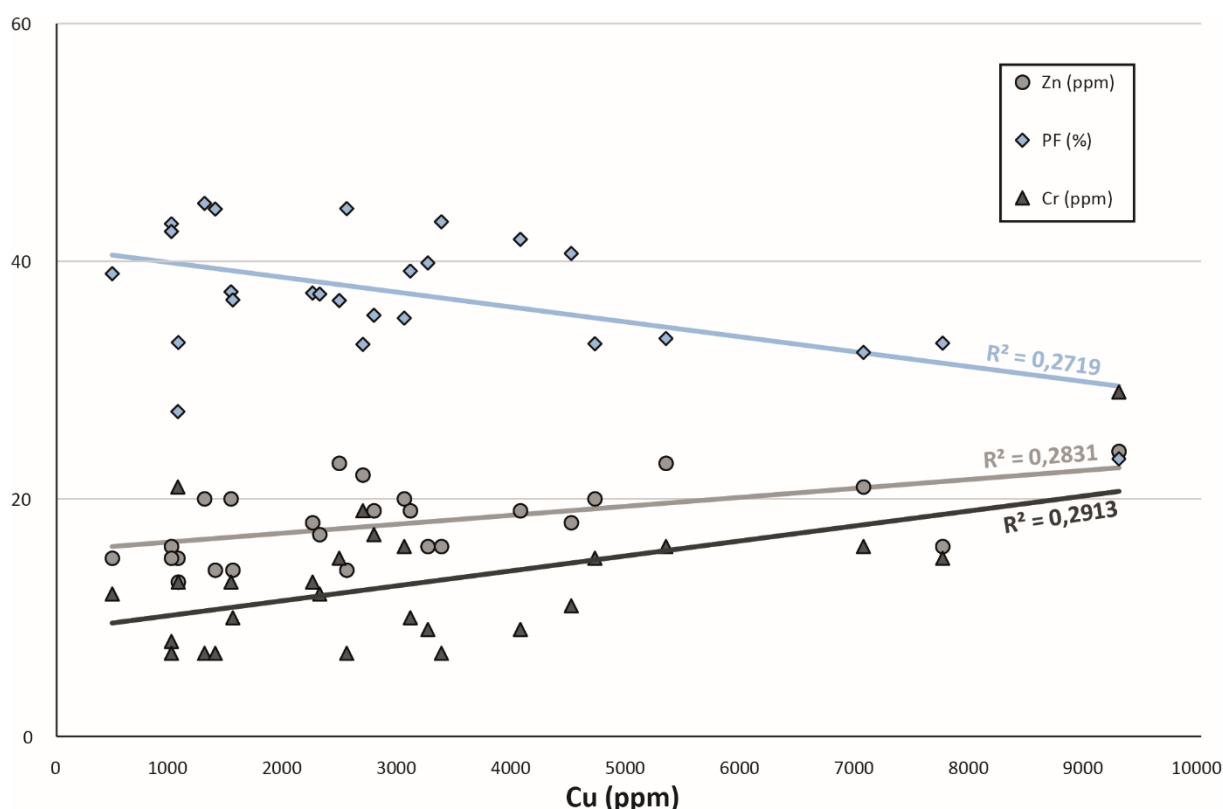


Figure 110 : Graphique binaire représentant les teneurs en Zn, Perte au feu (PF) et Cr en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R2 est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.

5.1.4. Synthèse des occurrences de type stratabound

Les ACP réalisées précédemment sur les différents indices stratabound n'ont pas révélé d'affinité entre les variables des différentes bases de données et la teneur en cuivre. Une ACP a été réalisée sur une base de données regroupant l'ensemble des échantillons prélevés sur le niveau porteur stratabound afin de comparer ces indices les uns par rapport aux

autres. Cette base de données compilées se compose donc des bases de données de Oued R'Them, Tizi N'Mekraz et Chaa'b Lhamrat, décrites précédemment, mais également des données d'échantillonnage de deux autres occurrences de types stratabound : (i) la base de données de l'indice d'Ech Chguig (**Annexe**) contenant les analyses de 17 échantillons prélevés le long d'un profil litho-géochimique verticale (ii) la base de données de Oued N'Khal contenant les analyses de 7 échantillons de l'intégralité du niveau porteur, prélevés au niveau de la zone de passage dans la couverture de l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas. Au total, cette base de données comporte 104 observations. Les résultats de l'ACP sont les suivants :

- Les deux facteurs F1 et F2 expliquent 59,89% de la variance totale (**Fig. 111A et C**).
- Dans ce plan F1-F2, un groupe bien distinct est discriminé, composé des Terre Rares (**Fig. 111C**). Les autres éléments sont dispersés de manière positive avec les facteurs F1 et F2 à l'exception de MgO, qui est anti-corrélé avec ces deux facteurs.
- Dans l'espace chimique des observations F1-F2, aucune discrimination n'est observable entre les différents indices qui sont tous regroupés, à l'exception de trois observations correspondant à trois échantillons de l'indice de Oued N'Khal.
- Les facteurs F2 et F5 possèdent les plus forts coefficients de corrélation avec le cuivre (**Fig. 111B**).
- Dans le plan F2-F5, le cuivre n'est associé à aucune autre variable de la base de données (**Fig. 111E**) et a aucune lithologie particulière dans le plan des observations (**Fig. 111F**).

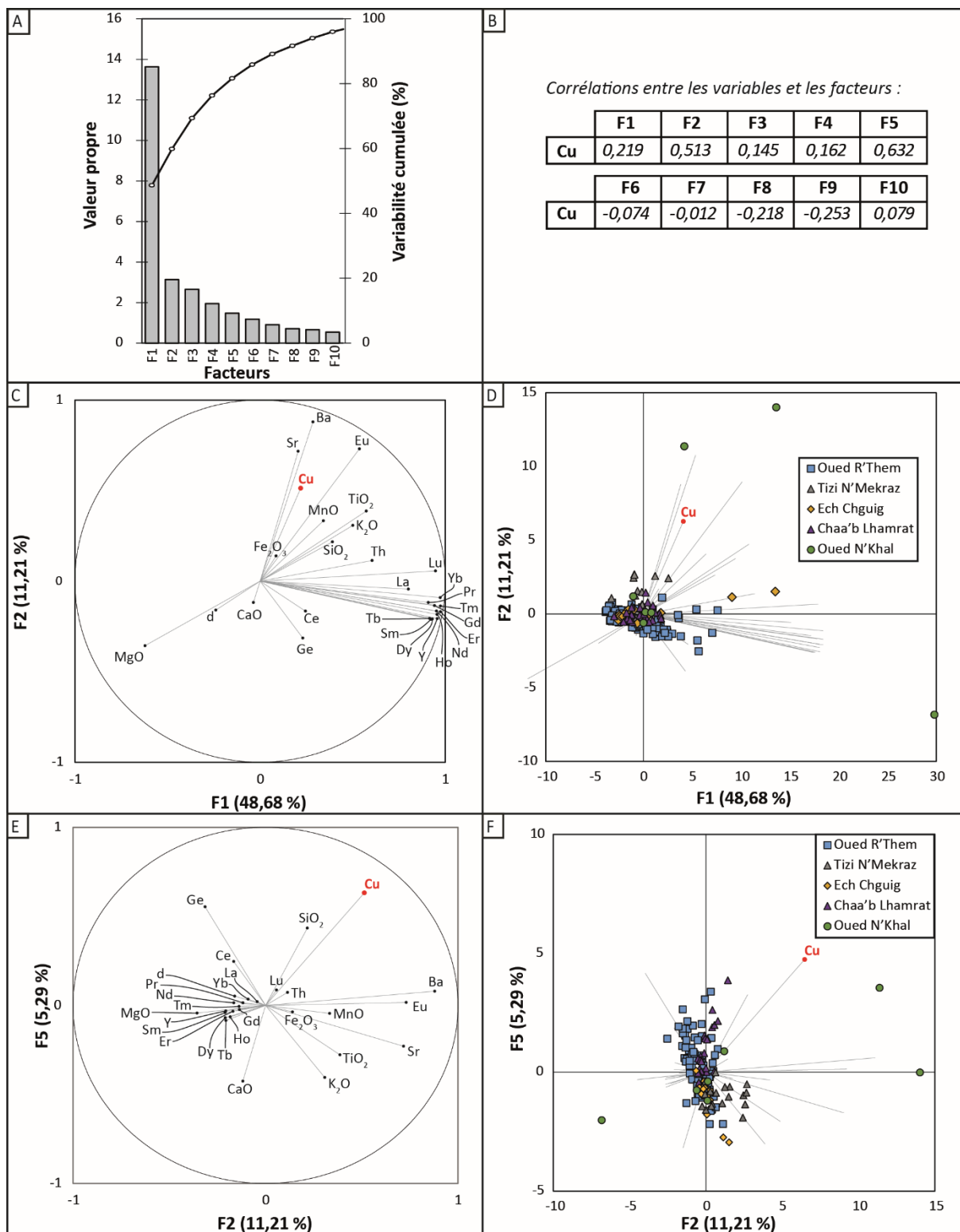


Figure 111 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'ensemble des indices de type « stratabound » (104 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection des variables dans le plan F2-F3. E : Projection des variables dans le plan F2-F5. F : Projection des variables dans le plan F2-F5.

5.1.5. Profils litho-géochimiques

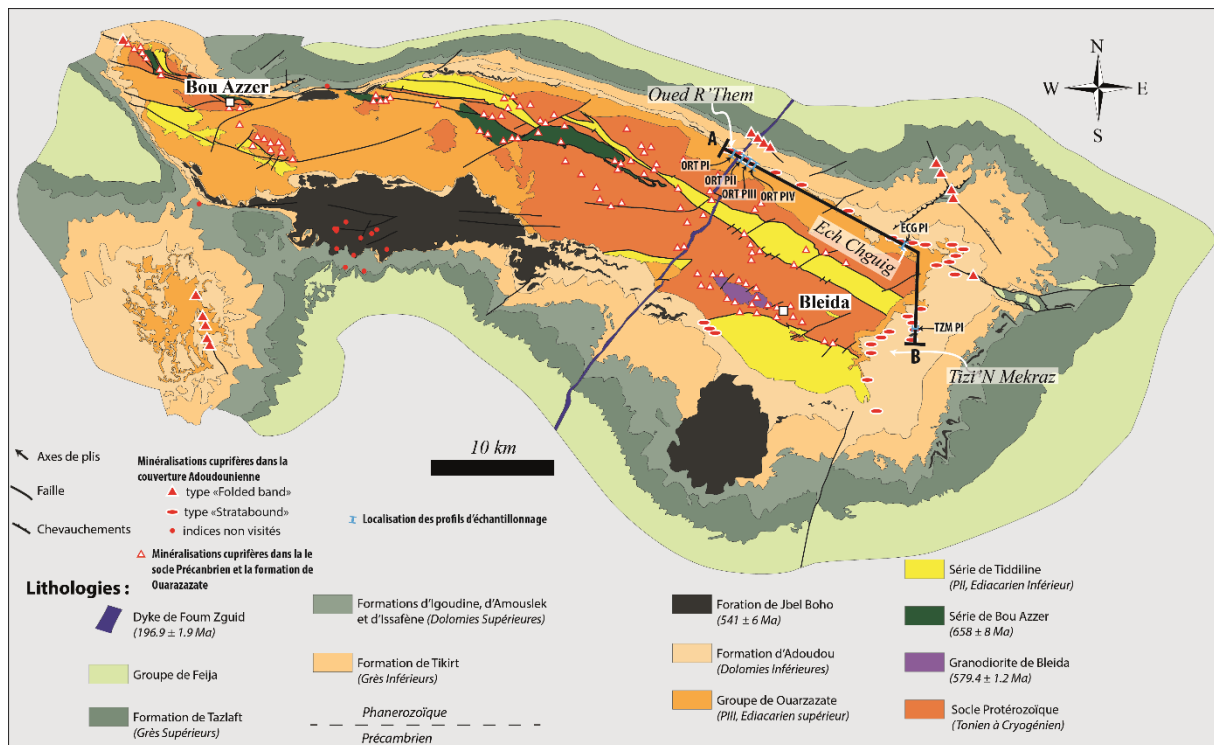


Figure 112 : Carte géologique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara avec la localisation de la coupe A-B sur laquelle ont été réalisés 6 profils litho-stratigraphiques.

Quatre profils litho-géochimiques ont été réalisés sur l'indice de Oued R'Them, un sur celui d'Ech Chguig et un autre sur celui de Tizi N'Mekraz (**Fig. 112**). Pour l'indice de Oued R'Them les quatre profils correspondent, du nord-ouest au sud-est, à une zone pauvre, à l'affleurement, en cuivre; deux zones riches et une zone pauvre qui marque la fin de la minéralisation du niveau porteur. L'indice d'Ech Chguig a été choisi car l'extension latérale, à l'affleurement, de la minéralisation au sein du niveau porteur était limitée à quelques mètres et la minéralisation était très peu abondante macroscopiquement. L'indice de Tizi N'Mekraz permettra de comparer les signatures géochimiques sur un profil Ouest-Est sur l'ensemble de la zone d'affleurement de ce niveau porteur minéralisé dans la partie Est de la boutonnière.

Les teneurs en cuivre varient verticalement sur les profils de manière très rapide, en effet sur le profil II de Oued R'Them, la teneur passe de 1000 ppm dans le niveau de brèche de base, à 12000 ppm dans les 20 premiers centimètres du niveau de dolomie inférieure puis fluctue entre 4000 et 6000 ppm dans les 80 cm restant du niveau inférieur, la teneur en cuivre augmente ensuite jusqu'à 15000 ppm dans les 20 cm de dolomie beige intermédiaire pour ensuite fluctuer entre 100 et 5000 ppm dans le niveau de dolomie supérieure (**Fig. 113**). Au

niveau des profils repérés sur le terrain comme abondant en cuivre, les niveaux de dolomies intermédiaires montrent un enrichissement significatif en cuivre par rapport aux échantillons des niveaux inférieurs et supérieurs qui les encadrent (**Fig. 113**). Pour les profils PII et PIII, de l'indice de Oued R'Them, reconnus abondants en cuivre sur le terrain, la base du niveau inférieur ou quasiment son intégralité montrent un enrichissement de 8000 à 15000 ppm en cuivre et le niveau de dolomie supérieur est quant à lui faiblement concentré en cuivre, de l'ordre de 100 à 3000 ppm de cuivre (**Fig. 113**).

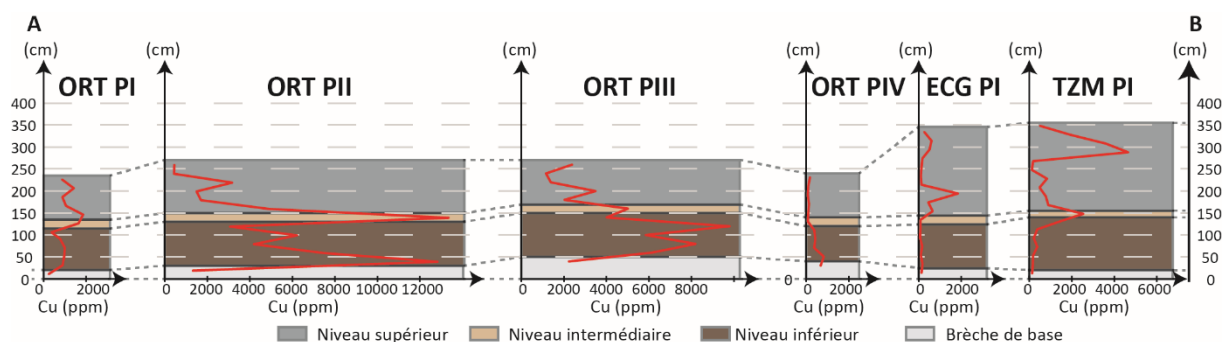


Figure 113 : Projection le long de la coupe A-B, de la figure 11, des teneurs en cuivre des profils litho-stratigraphiques des indices de Oued R'Them (ORT), Ech Chguig (ECG) et Tizi N'Mekraz (TZM). L'échelle verticale est dilatée.

Les concentrations en éléments majeurs et en éléments traces pouvant, selon les données de l'ACP, être potentiellement associé au cuivre ont été ajoutés aux différents profils. Sur la totalité des profils :

- les teneurs en MgO, CaO et perte au feu (PF) sont stables sur l'ensemble du niveau porteur, quelque soit l'indice considéré (**Fig. 114, 115, 116, 117, 118 et 119**),
- la teneur en TiO₂ augmente dans le niveau de brèche de base et au sein du niveau intermédiaire (**Fig. 114, 115, 116, 118, 118 et 119**).

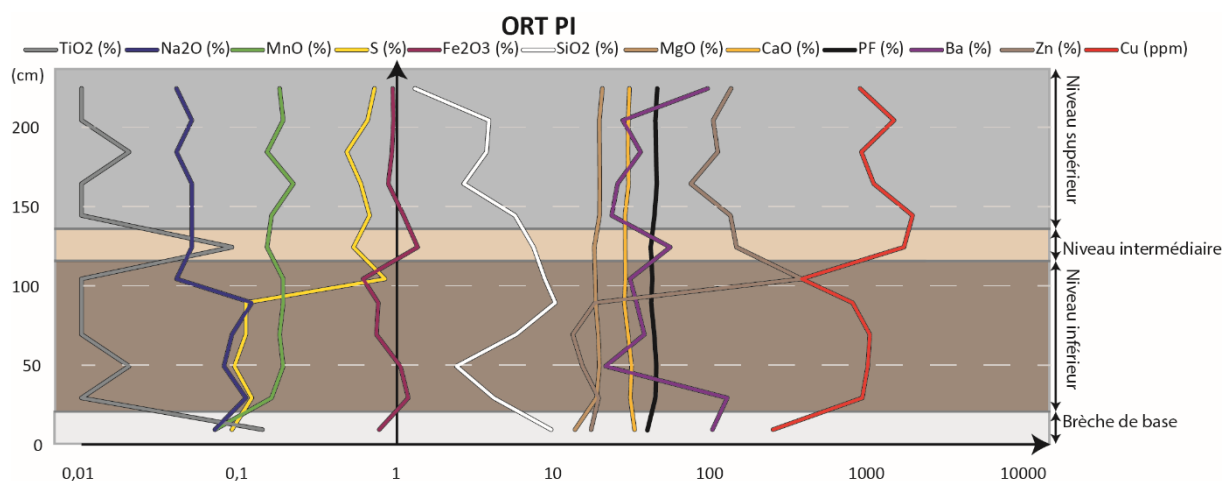


Figure 114 : Profil litho-stratigraphique PI de l'indice de Oued R'Them (ORT). L'abscisse est en échelle logarithmique.

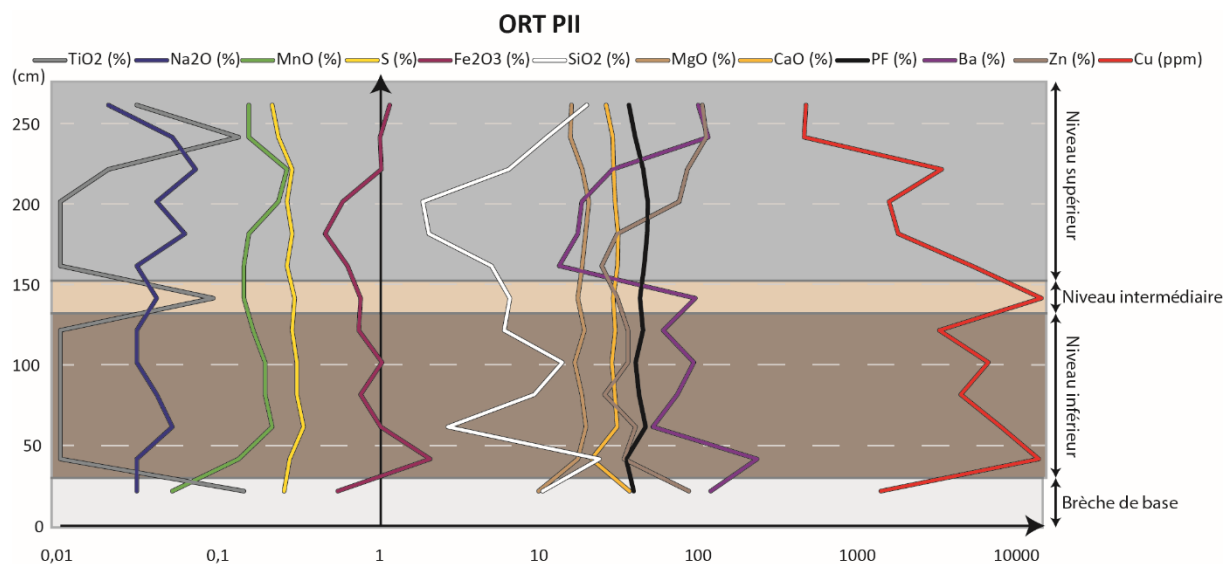


Figure 115 : Profil litho-stratigraphique PII de l'indice de Oued R'Them (ORT). L'abscisse est en échelle logarithmique.

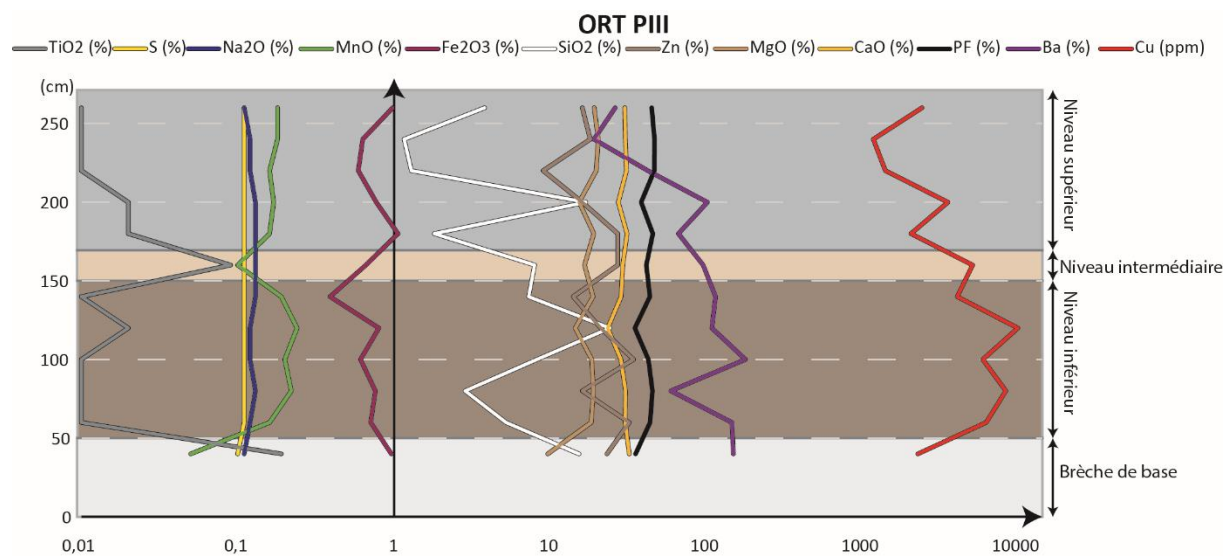


Figure 116 : Profil litho-stratigraphique PIII de l'indice de Oued R'Them (ORT). L'abscisse est en échelle logarithmique.

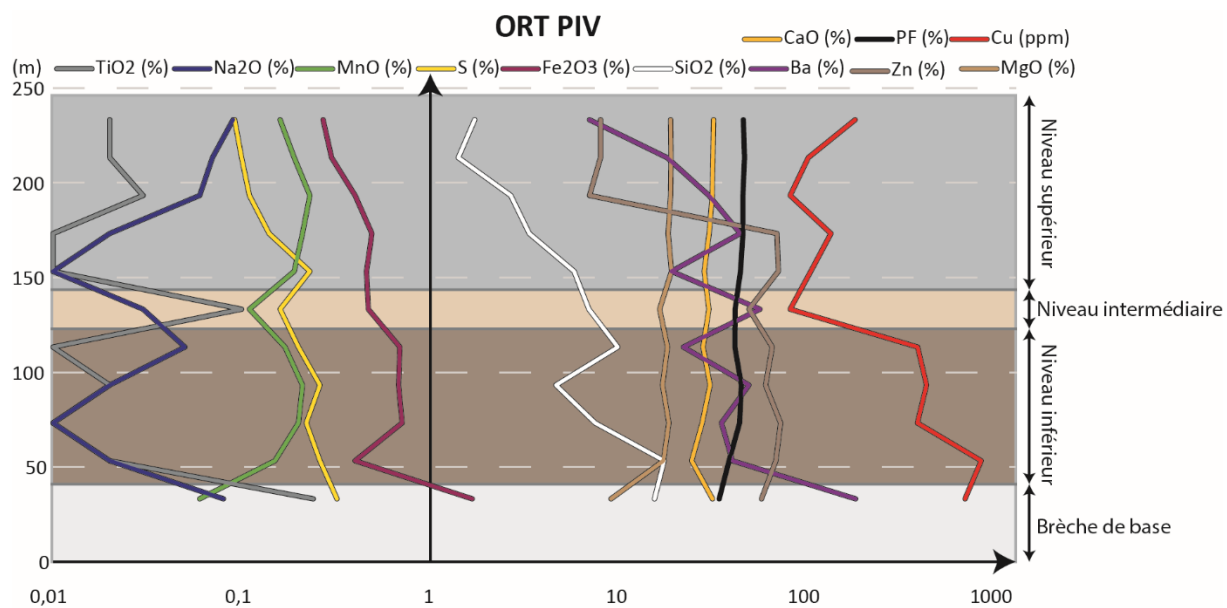


Figure 117 : Profil litho-stratigraphique PIV de l'indice de Oued R'Them (ORT). L'abscisse est en échelle logarithmique.

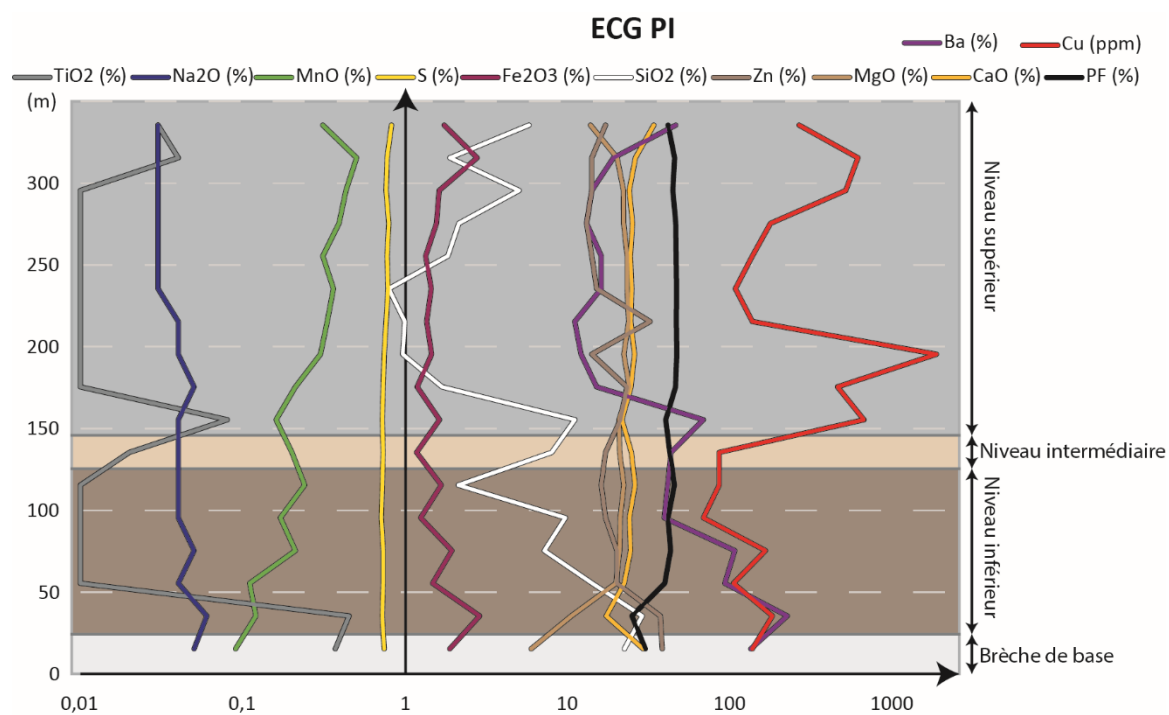


Figure 118 : Profil litho-stratigraphique PI de l'indice de Ech Chguig (ECG). L'abscisse est en échelle logarithmique.

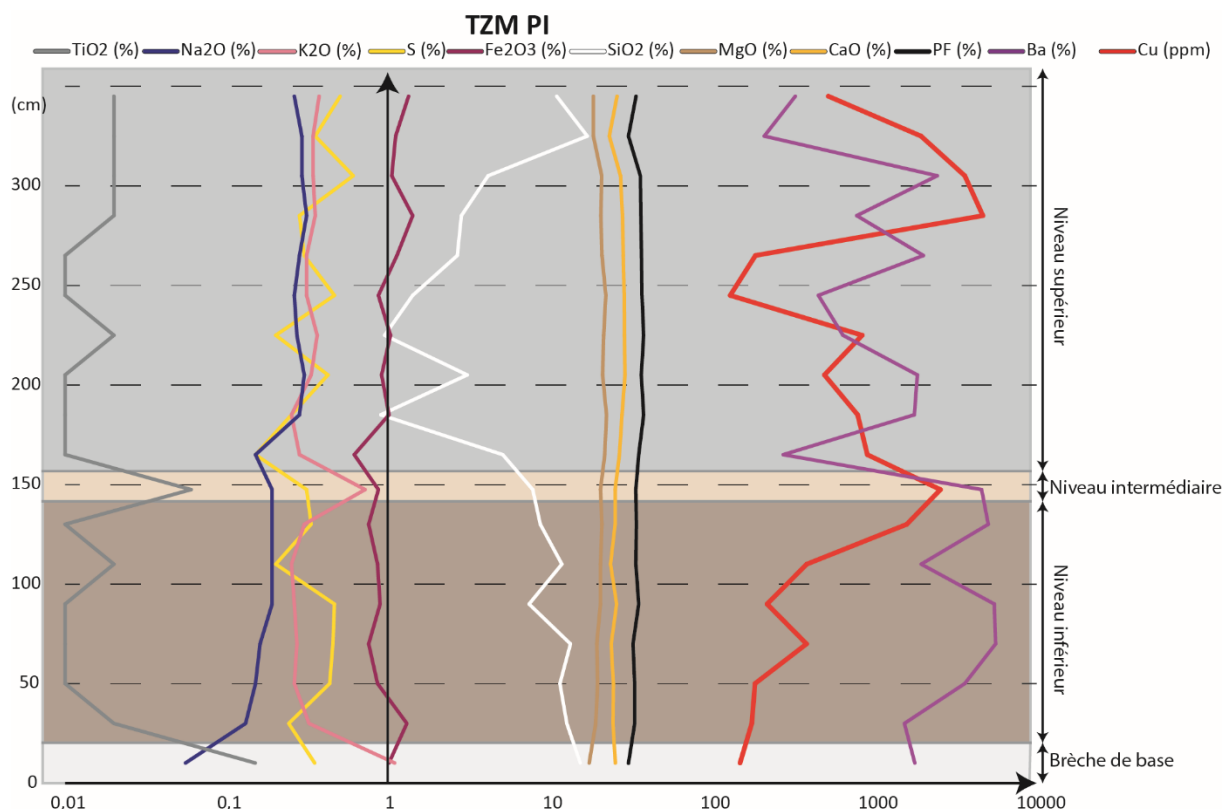


Figure 119 : Profil litho-stratigraphique PI de l'indice de Tizi N'Mekraz (TZM). L'abscisse est en échelle logarithmique.

5.2. LE TYPE « FOLDED BAND »

5.2.1. Le gisement de Jbel Laassel

La compagnie Managem a échantillonné 23 sondages à circulation inverse dans le cadre de la campagne faisabilité du gisement de Jbel Laassel. Suite à cela deux bases de données ont été produites : la première contient 228 échantillons et n'inclut pas les analyses de teneur en cuivre, tandis que la seconde contient 72 échantillons et elle inclut les analyses de teneur en cuivre mais pour un nombre d'échantillons moindre. Pour cette base de données, le cuivre a été mis en solution par attaque à l'eau régale (HNO_3 et HCl) puis dosé par absorption atomique. Ces analyses représentent la quantité totale de cuivre présente dans l'échantillon (Cu). Sur un double de l'échantillon le cuivre a également été dosé par adsorption atomique après attaque à l'acide sulfurique (H_2SO_4 à 20%) durant une période courte afin de ne mettre en solution que le cuivre provenant des oxydes et des carbonates de cuivre. La quantité de cuivre donné par ces analyses est qualifiée de cuivre oxydé (en abrégé CuOx).

(i) La base de données sans les teneurs en cuivre. L'ACP montre que les deux facteurs F1 et F2 expliquent 42,06% de la variance totale (**Fig. 120A**). Trois groupes d'éléments sont

discriminés dans le plan F1-F2. Le premier est représenté par CaO, MgO et MnO, le second par SiO₂, Al₂O₃, K₂O et B, le troisième par Co, P₂O₅, Fe₂O₃, TiO₂ et Pb (**Fig. 120B**). Sur le terrain la série apparaît comme composée d'une alternance de dolomies et de siltites dans laquelle sont intercalés des sils de lave. La représentation des observations dans l'espace F1-F2 les (**Fig. 118C**), montre que les trois groupes de variables correspondent à ces trois lithologies : les groupes 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux formations dolomitiques, de siltites et de lave (**Fig. 120C**).

(ii) La base de données incluant les analyses de cuivre. Les quatre premiers facteurs expliquent 80% de la variance totale. Le plan F1-F2 représente les mêmes groupes lithologiques que pour la base de données sans les analyses en cuivre (**Fig. 120E**). Cette représentation, dans le plan F1-F2, suggère que le cuivre (Cu et CuOx) n'est associé à aucune des trois lithologies. En effet le cuivre est indépendant des dolomies, des siltites et anti-corrélé avec les laves (**Fig. 120E**). Par ailleurs, la représentation des données dans le plan F1-F2 peut sous-entendre une association entre le barium et le cuivre, cependant le coefficient de corrélation entre ces deux éléments est de -0,054 (**Tab. 5**) et le coefficient de détermination (R^2) entre ces deux éléments est de 0,003 (**Fig. 121**). Cette apparente affinité entre ces trois éléments (Cu, CuOx et Ba) est due au fait que les coefficients de corrélations entre les facteurs F1 et F2 avec ces trois variables est faible (**Fig. 120D**) et donc que ces trois variables sont mal représentées dans ce plan. Les facteurs F3 et F6 représentent le mieux le cuivre total et le cuivre oxydé. En effet, pour le cuivre total et le cuivre oxydé les coefficients de corrélations avec le facteur F3 sont respectivement de 0,53 et 0,42, et de 0,58 et 0,63 pour le facteur F6 (**Fig. 120D**). La représentation des variables dans le plan F3-F6 (17,37% de la variance totale) montrent que le cuivre, ainsi que le cuivre oxydé, ne sont associés à aucunes des autres variables et à aucune des lithologies définies dans le plan F1-F2 (**Fig. 120F**).

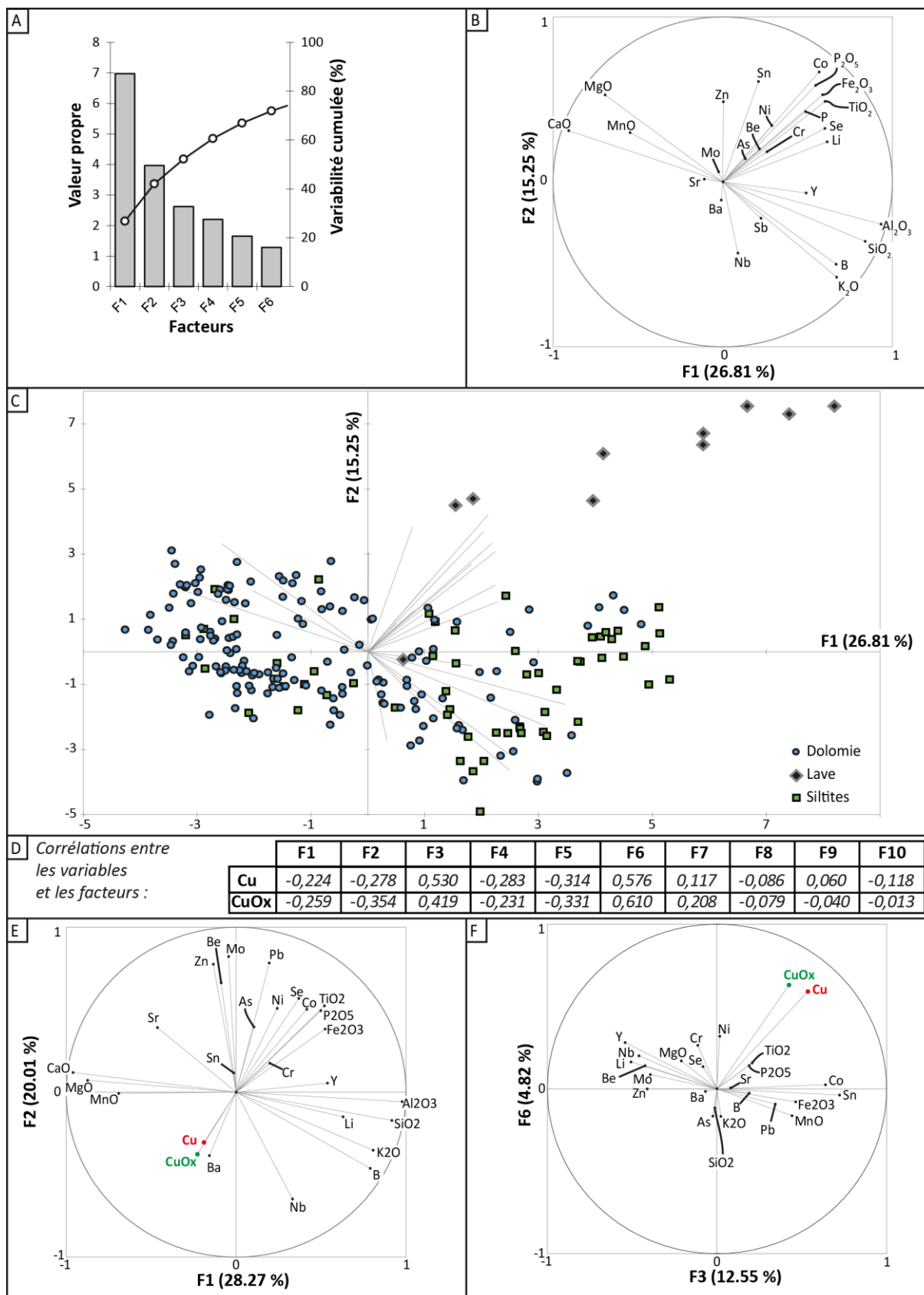


Figure 120 : A,B et C, Résultats de l'ACP pour la base de données de Jbel laassel sans les analyses de cuivre (BDD-JBL) (228 observations) ; D, E et F : Résultats de l'ACP pour la base de données de Jbel laassel avec les analyses de cuivre (BDD-JBL-Cu) (72 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs (BDD-JBL). B :

Projection des variables dans le plan F1-F2 (BDD-JBL) ; C : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie (BDD-JBL).. D : tableau de corrélation entre les variables cuivre (Cu), CuOx et les facteurs (BDD-JBL-Cu) ; E : Projection des variables dans le plan F1-F2 (BDD-JBL-Cu) ; F : Projection dans le plan F3-F6 des observations et de leur lithologie (BDD-JBL-Cu).

Tableau 5 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre (BDD-JBL-Cu).

Variables	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	P2O5	As	B	Ba
Cu	-0,096	-0,085	-0,133	0,088	0,032	-0,015	0,167	-0,172	-0,190	-0,060	0,042	-0,054
Variables	Be	Co	Cr	Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Se	Sn	Sr	Y
Cu	-0,296	0,021	-0,156	-0,322	-0,285	-0,121	-0,083	-0,061	-0,202	0,245	-0,152	-0,363
Variables	Zn	Cu	CuOx									
Cu	-0,269	1	0,888									

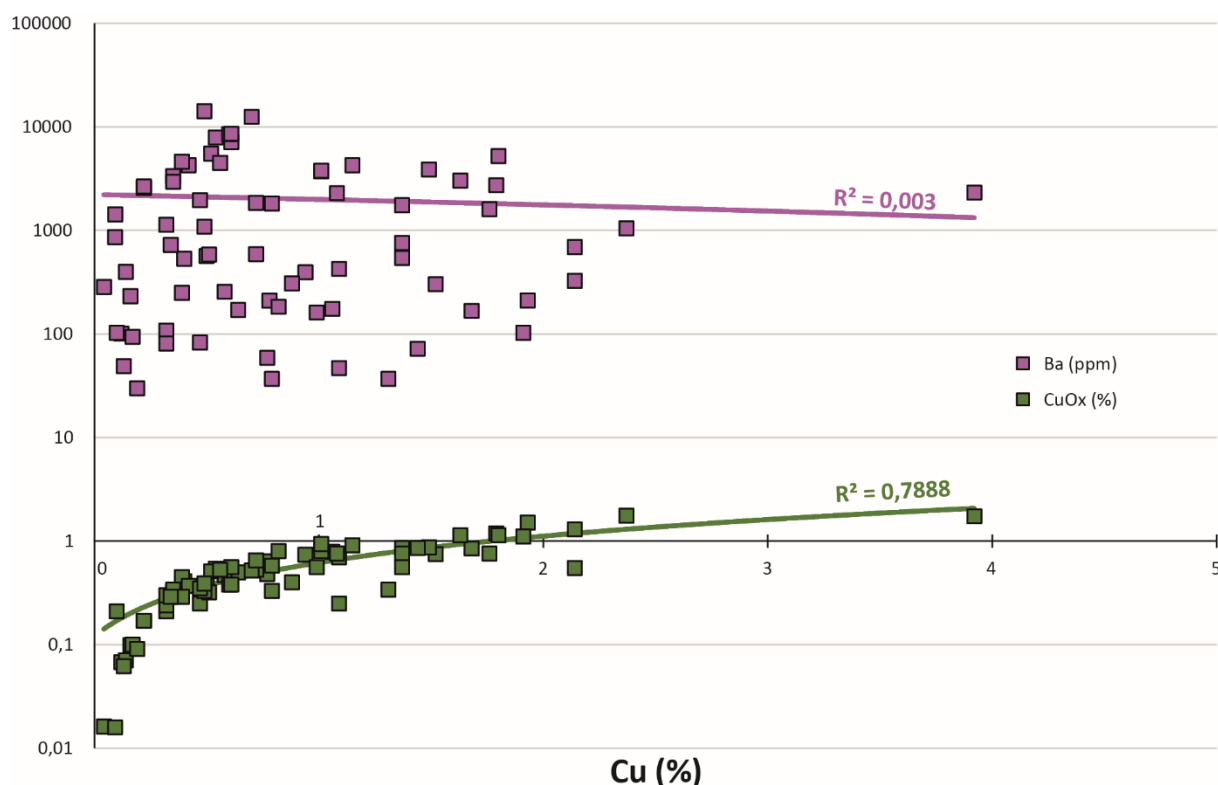


Figure 121 : Graphique binaire représentant les teneurs en barium et cuivre oxydé (CuOx) en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R2 est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.

5.2.2. Amekssa

La base de données de l'indice d'Amekssa est composée de 97 échantillons correspondant à l'échantillonnage par lithologie de la zone minéralisée en cuivre. Cette base de données contient des analyses du cuivre total (Cu). Les résultats de l'ACP sont les suivants :

- Les facteurs F1 et F2 représentent 60,07% de la variance totale de la base de données.

- Dans le plan F1-F2, trois groupes peuvent être distingués (**Fig. 122C**) correspondant dans le plan des observations aux siltites, aux dolomies et potentiellement aux brèches tectoniques pour le groupe porté par les Terre Rares (**Fig. 122D**).

- La variable cuivre, mal représenté dans le plan F1-F2, semblerait avoir une affinité pour le groupe des siltites (**Fig. 122D**). Cependant les R^2 entre les variables de ce groupe et le cuivre sont tous inférieurs à 0,5 (**Fig. 123**)

- Les facteurs F2 et F5 sont les mieux corrélé avec la variable cuivre (**Fig. 122B**).

- Dans le plan F2-F5, les variables cuivre et TiO_2 semblent être corrélées (**Fig. 122E**).

- Les coefficients de corrélation entre ces deux variables est de 0,63 (**Tab. 6**).

- Dans une représentation binaire, le coefficient de détermination, entre ces deux éléments, est de 0,4 ce qui montre que la corrélation entre ces deux éléments est limitée (**Fig. 123**).

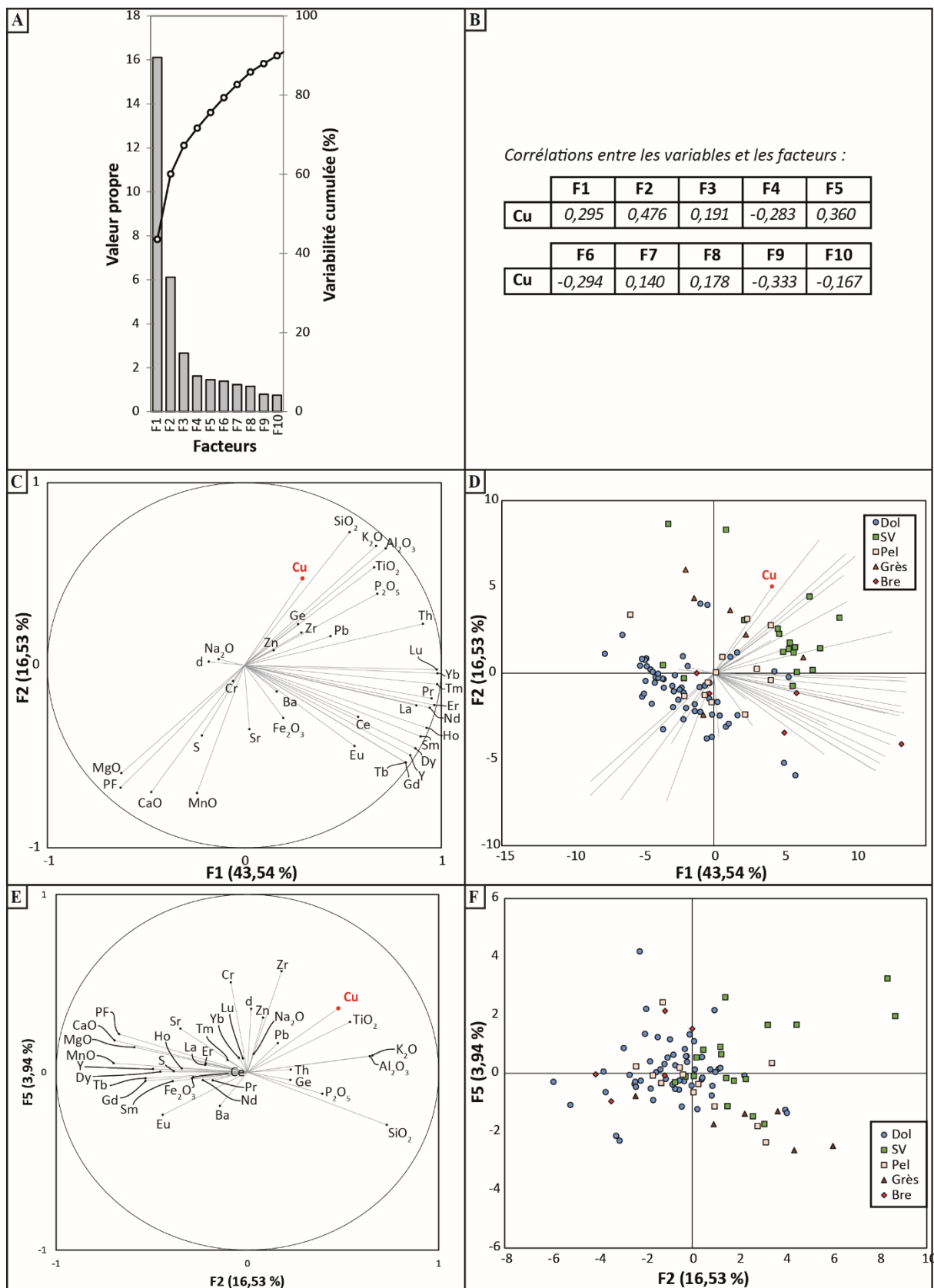


Figure 122 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'indice d'Ameksa (97 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des

variables dans le plan F2-F5. F : Projection dans le plan F2-F5 des observations et de leur lithologie. Abréviations : Dol, dolomie ; SV, siltites vertes ; Pel, pélites ; Bre, brèche tectonique.

Tableau 6 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre de la base de données de l'indice d'Amekssa.

Variables	PF	S	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	P2O5	Na2O
Cu	-0,415	-0,278	0,338	0,635	-0,111	-0,494	-0,317	0,567	-0,298	0,632	0,200	0,015
Variables	Ba	Cr	Cu	Pb	Sr	Zn	Ge	Zr	Y	La	Ce	Pr
Cu	0,109	0,015	1	0,252	0,148	0,035	0,005	0,182	0,005	0,149	0,034	0,175
Variables	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th
Cu	0,138	0,058	0,005	0,003	-0,003	0,038	0,101	0,172	0,228	0,258	0,267	0,411
Variables	densité (d)											
Cu	-0,019											

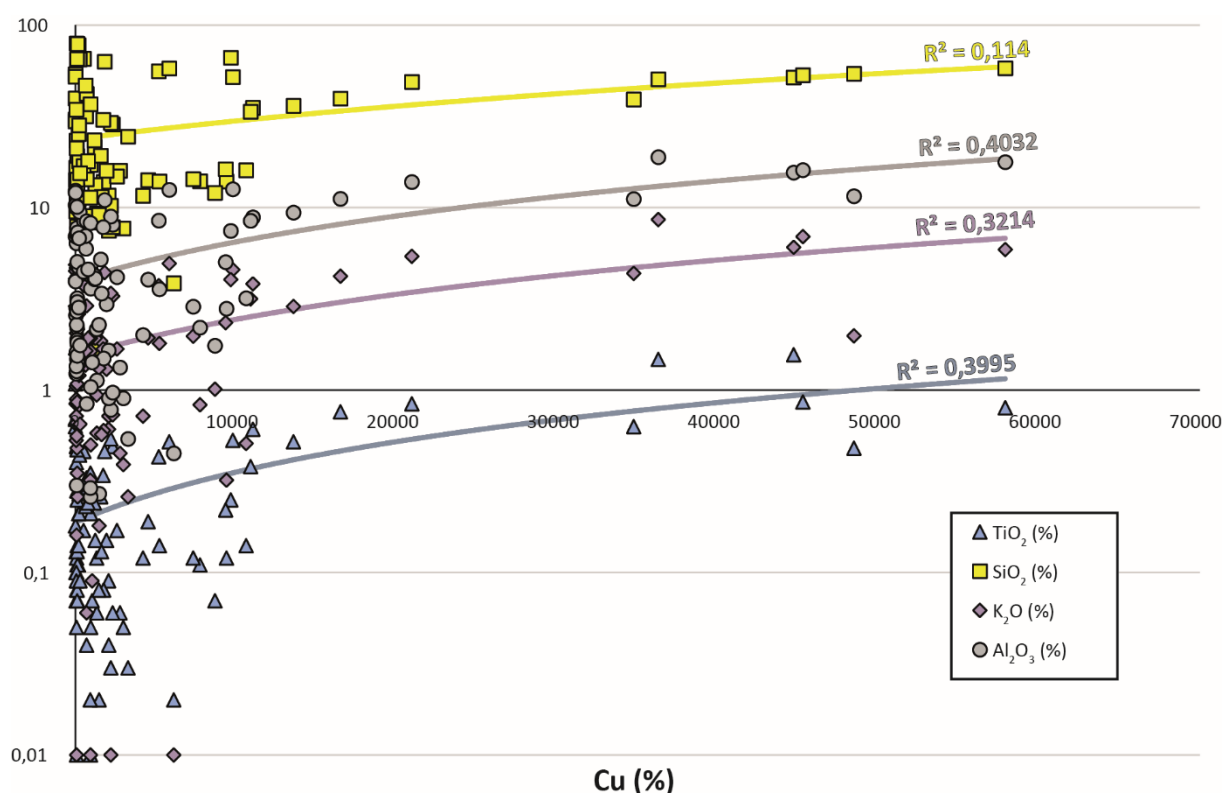


Figure 123 : Graphique binaire représentant les teneurs en TiO₂, SiO₂, K₂O et Al₂O₃ en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R² est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.

5.2.3. L'indice d'Assif N'Zaïd

La base de données de l'indice d'Assif N'Zaïd est composée de 108 échantillons correspondant à des profils d'échantillonnage, par lithologie, perpendiculaire à la direction de la zone minéralisée en cuivre. Les échantillons non minéralisés macroscopiquement ont été distingué de ceux minéralisés. Cette base de données contient des analyses du cuivre total (Cu). Les résultats de l'ACP sont les suivants :

- Les facteurs F1 et F2 représentent 63,01% de la variance totale (**Fig. 124C**).

- Dans le plan F1-F2, deux groupes sont distingués (**Fig. 124C**) correspondant pour l'un aux siltites minéralisées ou non et pour l'autre aux dolomies minéralisées ou non (**Fig. 124D**).

- Les facteurs F6 et F7 sont les mieux corrélés avec la variable cuivre (**Fig. 124B**).

Dans le plan F6-F7, la variable cuivre n'a d'affinité avec aucune des autres variables de la base de données (**Fig. 124E**) et avec aucune des lithologies représentées (**Fig. 124F**), ce qui est appuyé par les faibles coefficients de corrélation entre le cuivre et les autres variables (**Tab. 7**)

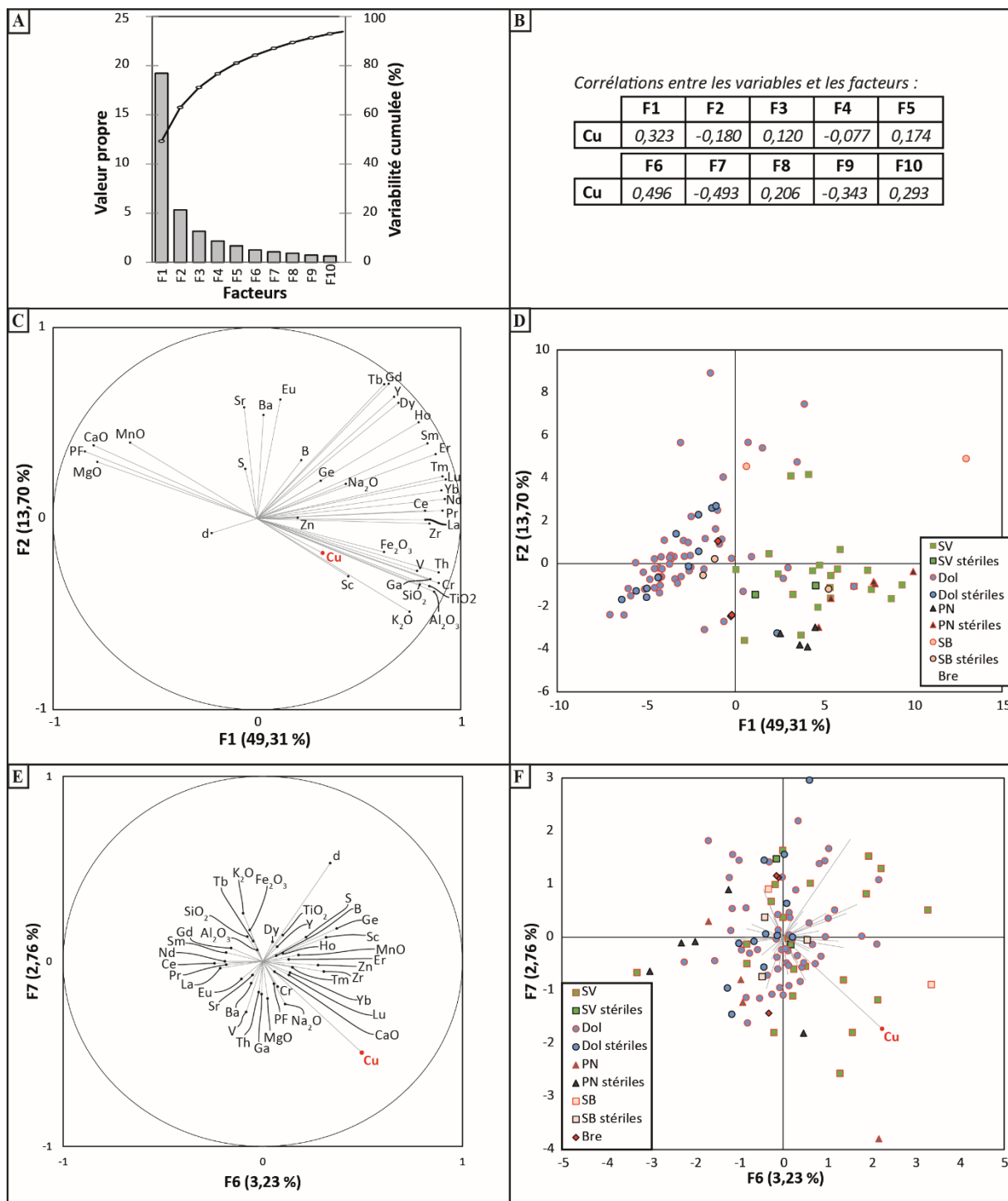


Figure 124 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'indice d'Assif N'Zaïd (108 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F6-F7. F : Projection dans le plan F6-F7 des observations et de leur lithologie. Abréviations : SV, siltites vertes minéralisées ; SV stériles, siltites vertes stériles ; Dol, dolomies minéralisées ; Dol stériles, Dolomies stériles ; PN, pélites noires minéralisées ; PN stériles, pélites noires stériles ; SB, siltites beiges minéralisées ; SB stériles, siltites beiges stériles ; Bre, brèche tectonique.

Tableau 7 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre de la base de données de l'indice d'Assif N'Zaïd.

Variables	PF	S	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	Na2O	B
Cu	-0,268	0,043	0,216	0,345	0,177	-0,282	-0,235	0,259	-0,150	0,374	0,147	0,023
Variables	Ba	Cr	Cu	Sr	Zn	Ga	Ge	Sc	V	Zr	Y	La
Cu	0,007	0,461	1	-0,058	0,010	0,364	0,061	0,358	0,360	0,322	0,125	0,234
Variables	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
Cu	0,164	0,219	0,212	0,138	-0,023	0,071	0,035	0,112	0,155	0,223	0,261	0,295
Variables	Lu	Th	densité (d)									
Cu	0,292	0,401	-0,053									

5.2.3. L'ensemble des occurrences de type « folded-band »

Les ACP réalisées précédemment sur les différents indices de type « folded-band » n'ont pas révélé d'affinité entre les variables des différentes bases de données et celle du cuivre. Une ACP a été réalisé sur une base de données regroupant l'ensemble des échantillons prélevés sur ce type d'indice afin de comparer, comme pour le type « stratabound », ces indices les uns par rapport aux autres. Cette base de données compilée se compose donc des bases de données de Jbel Laassel, d'Amekssa, d'Assif N'Zaïd auxquelles s'ajoutent quatre échantillons du gisement de Jbel N'Zourk. Cette base de données comporte 283 observations. Les résultats de l'ACP sont les suivants :

- Les facteurs F1 et F2 représentent 54,03% de la variance totale (**Fig. 125C**).
- Trois groupes sont discriminés dans le plan F1-F2 (**Fig. 125C**) : (1) CaO, MgO et MnO (2) Fe2O3 et TiO2 et (3) Al2O3, SiO2, K2O
- Dans l'espace des observations F1-F2, l'ensemble des observations des sites étudiés forme une seule famille. Cependant quatre échantillons du gisement de Jbel Laassel sont excentré et corresponde au troisième groupe de variables décrit. Ces échantillons correspondent au niveau de laves analysés dans cette base de données.
- Les coefficients de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs F3 et F6 sont les plus élevés (**Fig. 125B**)
- Dans le plan F3-F6, la variable cuivre n'est associée à aucune autre variable de la base de données (**Fig. 125E**).
- Dans l'espace des observations F3-F6 l'ensemble des observations des sites étudiés forme une seule famille, à l'exception de cinq observations de la base de données d'Assif N'Zaïd qui semble être associé à la variable strontium (**Fig. 125F**).

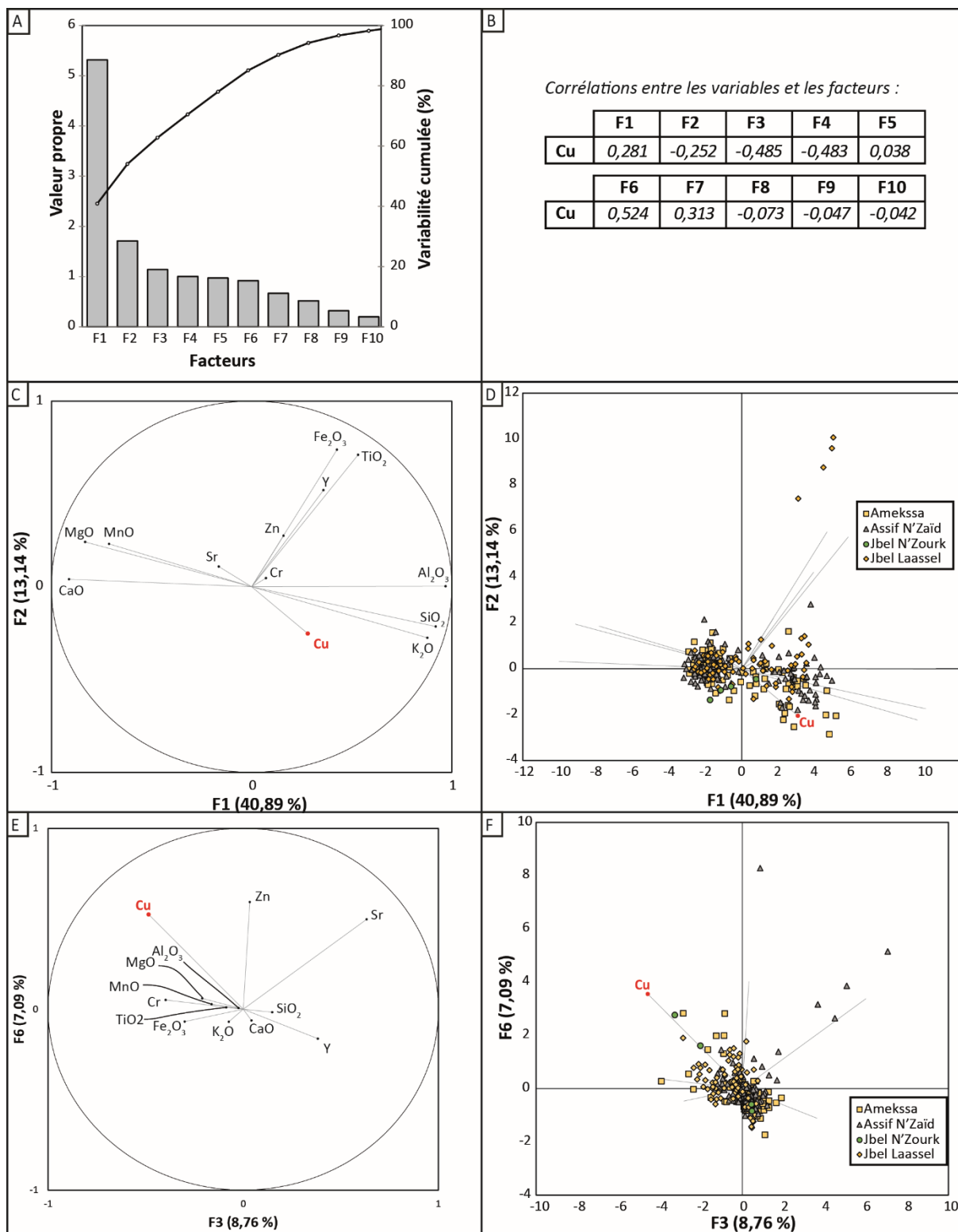


Figure 125: Résultats de l'ACP pour la base de données regroupant l'ensemble des occurrences de type « folded-band » (283 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F3-F6. F : Projection dans le plan F3-F6 des observations et de leur lithologie.

5.3. ANALYSES SUR L'ENSEMBLE DES OCCURRENCES CUPRIFERES DE LA BOUTONNIERE

Les ACP réalisées précédemment sur les deux types « stratabound » et « folded-band » n'ont pas révélé d'affinité entre les variables des différentes bases de données et celle du cuivre. Une ACP a été réalisée sur une base de données regroupant l'ensemble des échantillons prélevés sur les deux types d'indice afin de les comparer. Cette base de données comporte 387 observations. Les résultats de l'ACP sont les suivants :

- Les facteurs F1 et F2 représentent 54,84% de la variance totale (**Fig. 126 A et C**).
- Dans ce plan trois groupes sont discriminés : (1) SiO₂ et K₂O, (2) TiO₂, Y et Fe₂O₃, (3) CaO et MgO (**Fig. 126C**). Les groupes 1 et 3 sont anticorrélés et exprime probablement la variation lithologique au sein des séries étudiées: groupe 1 siltite et groupe 3 faciès carbonatés. Le groupe 2 est indépendant des deux autres.
- Dans le plan des observations F1-F2, les observations de type « stratabound » forment un groupe condensé auquel se mélange les observations du type « folded-band ». Ces dernières forment un groupe étiré allant d'un pôle qui correspondrait au groupe des observations de type « stratabound » jusqu'à un autre pôle qui correspondrait au groupe de variable SiO₂ et K₂O (**Fig. 126.D**). Cette dispersion des observations est due à la présence de siltite au sein des bases de données de types « folded-band », lithologie qui n'est pas présente dans le type de minéralisation « stratabound ».
- Les facteurs F4 et F5 possèdent les plus forts coefficients de corrélation avec la variable cuivre (**Fig. 126B**).
- Dans le plan F4-F5, le cuivre n'est associé à aucune des autres variables de la base données (**Fig. 126E**). On notera une indépendance entre les variables Zn et Cu. Finalement si Cu est bien représenté dans le plan F4-F5, il n'apparaît corrélé à aucune des autres variables.
- Dans l'espace des observations F4-F5, l'ensemble des observations, quelques soient le type de minéralisations, forment un seul et même groupe (**Fig. 126F**).

Par ailleurs, aucune des bases de données géochimiques n'a révélé d'affinité avec le baryum ce qui sous-entend que la minéralisation cuprifère n'est pas associée à de la barytine. Minéral qui n'a pas été observé en association avec les sulfures de cuivre dans le chapitre 4.

Pour conclure ce chapitre sur l'analyse des données géochimiques roche total, l'analyse statistique des bases de données à notre disposition n'a révélé aucune liaison significative entre les teneurs en cuivre et les autres variables considérées mais également aucune affinité entre le cuivre et les lithologies discriminées.

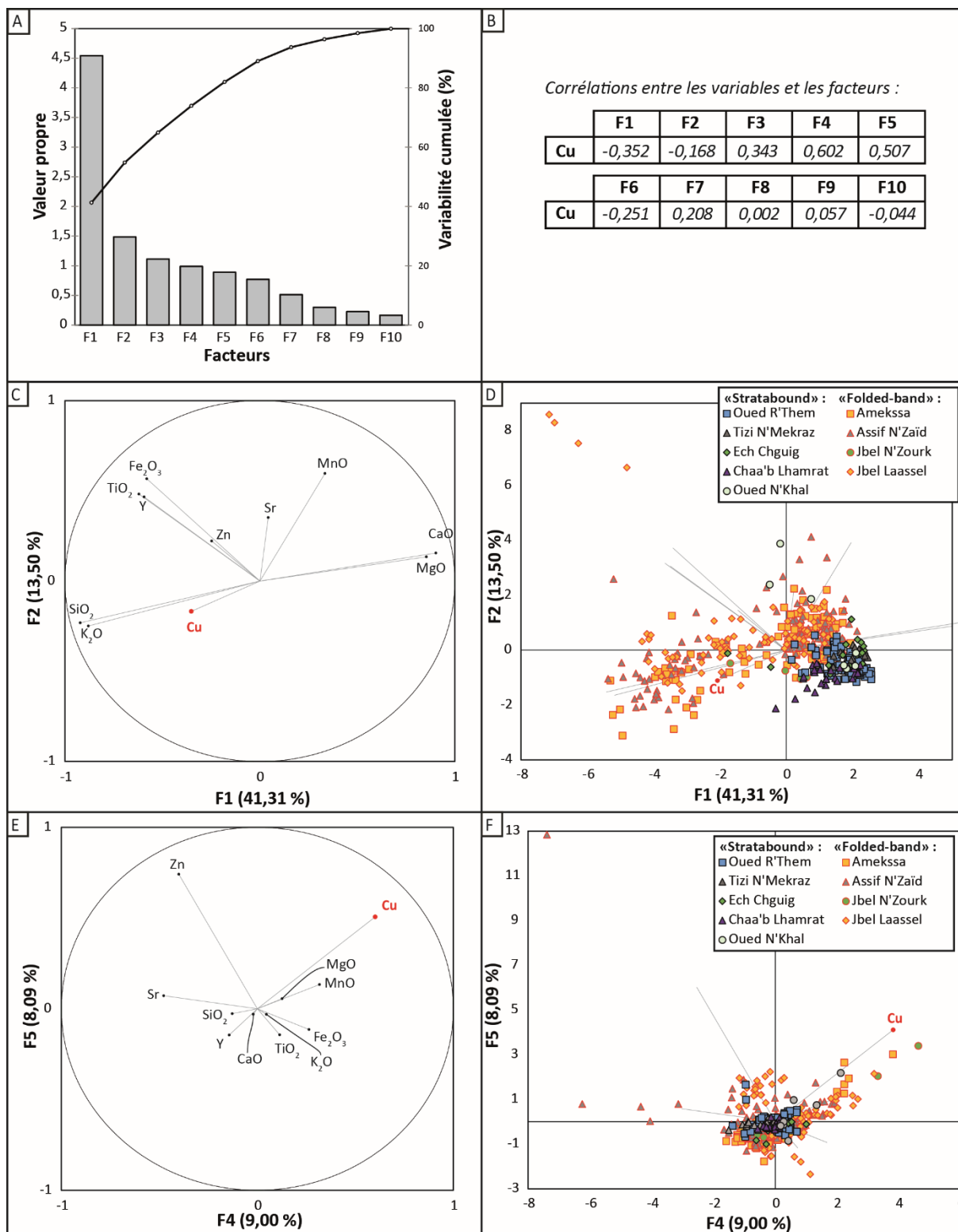


Figure 126 : Résultats de l'ACP pour la base de données regroupant l'ensemble des occurrences des deux types « stratabound » et « folded-band » (283 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F4-F5. F : Projection dans le plan F4-F5 des observations et de leur lithologie.

6. Etudes des inclusions fluides

Mise en contexte : les chapitres précédents ont montré que les sulfures primaires étaient associés à une gangue composée de quartz, dolomite et calcite. L'étude des inclusions fluides contenues dans ces minéraux de gangue va permettre de préciser les conditions pression-température de mise en place de ces minéralisations et également d'avoir une idée de la composition des fluides minéralisateurs. Par ailleurs, aucune donnée n'existe dans la littérature sur les fluides associés aux minéralisations de la couverture à l'échelle de l'Anti-Atlas. Une fois ces données inédites acquises, l'objectif sera de contraindre le système hydrothermal associé à la mise en place de ces minéralisations, de comparer les résultats obtenus dans le type « stratabound » et « folded-band » puis de comparer nos données d'inclusions fluides avec celles existant à l'échelle de l'Anti-Atlas, et notamment au sein du socle protérozoïque.

6. Etudes des inclusions fluides

6.1. ECHANTILLONS

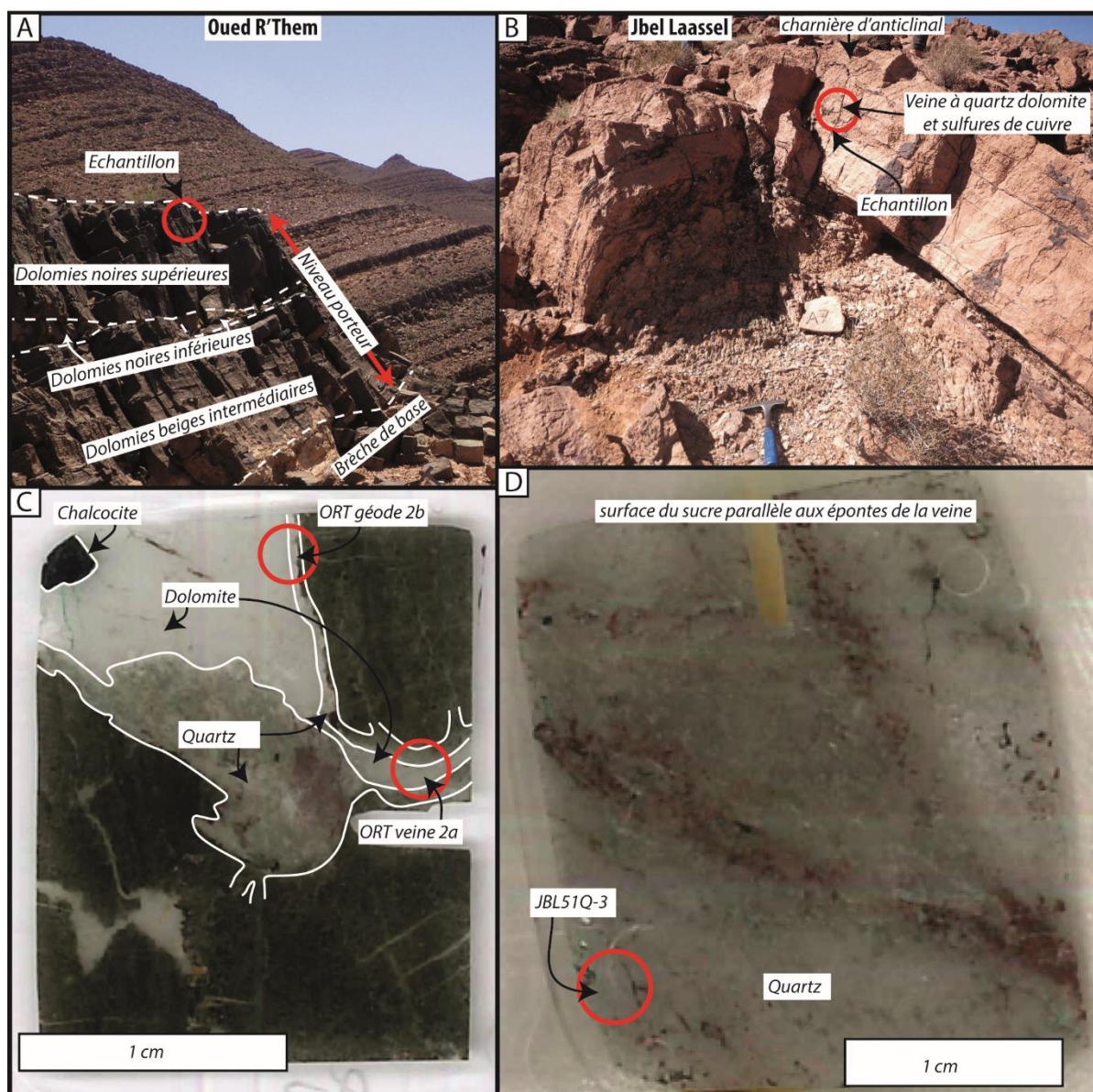


Figure 127. Planche photographique des lieux et des échantillons sur lesquels a été réalisée l'étude micro-thermométrique : A, photographie de l'affleurement où a été prélevé l'échantillon du site de Oued R'Them ; B, photographie de l'affleurement où a été prélevé l'échantillon du site de Jbel Laassel ; C, lame mince de l'échantillon du site de Oued R'Them étudié ; D, lame mince de l'échantillon du site de Jbel Laassel étudiée. Les cercles rouges indiquent les disques où les inclusions fluides ont été mesurées.

Deux échantillons minéralisés ont été sélectionnés pour l'étude des inclusions fluides, l'un est du type « stratabound » et l'autre du type « folded-band ». Le premier échantillon provient du toit du niveau porteur minéralisé de l'indice de Oued R'Them (**Fig. 127A**). Il

s'agit d'une géode à quartz, dolomite et chalcocite connectée à une veine du stockwork cuprifère (**Fig. 127C**). Le second échantillon provient d'une veine du gisement de Jbel Laassel prélevé au niveau de la charnière anticlinale de la « folded-band » (**Fig. 127B**). La lame mince de cet échantillon a été réalisée au niveau d'un ruban de quartz et parallèlement à l'éponte de la veine (**Fig. 127D**).

6.2. APPAREILLAGE

6.2.1. Cathodoluminescence

L'équipement utilisé est celui développé à l'ISTO autour de la chambre cathodyne commercialisée par la société OPEA (France). L'échantillon est placé dans une chambre sous vide primaire (~ 35 mbar), puis sous une pression partielle d'argon de ~ 55 mbar. Il est ensuite irradié par un faisceau d'électrons sous un courant de 90 à 110 μA et soumis à une tension d'environ 15,6 kV. L'angle entre l'axe du canon à électrons et l'horizontale est $\sim 18^\circ$. La chambre est montée sur un statif simplifié conçu pour optimiser la lumière arrivant de l'échantillon vers le capteur de la caméra. Il s'agit d'une caméra Retiga 2000R refroidie (taille du capteur: 1 pouce, résolution de l'image 1600 x 1200 pixel², taille du pixel carré 7.4 μm), Cette caméra, à bas bruit électronique, a un seuil de détection très bas (Thomas et al., 2009).

6.2.2. Platine microthermométrie

L'intégralité des mesures a été réalisée au sein du laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO). Les échantillons ont été préparés en lames épaisses d'environ 100 μm , avec un double poli. Une platine microthermométrie Linkam THMS 600 était montée sur un microscope optique Olympus BH2 équipée d'un objectif x2.5 et d'objectifs x20 et x50 à longue et ultra-longue distance frontale, respectivement. Les mesures microthermométriques ont été réalisées avec l'objectif x50. Un zoom optique Nikon interposé sur l'axe optique avant la caméra permettait de grossir en plus l'image jusqu'à x 2,5. La chambre de la Linkam est composée d'un bloc cylindrique d'argent de 21 mm de diamètre, avec un trou d'environ 2 mm de diamètre en son centre. Le bloc d'argent peut être refroidi jusqu'à -150°C par circulation interne d'azote liquide. Une résistance placée dans le bloc permet aussi de le chauffer jusqu'à 600°C . Une résistance en platine Pt 100 classe A est incorporée dans le bloc pour mesurer la température entre -150° et 600°C avec une précision intrinsèque de $0,15^\circ$ à $1,35^\circ$. La résistance de la platine Linkam THMS 600 est alimentée par

un boîtier électronique fabriqué à l'ISTO avec une intensité du courant variant de 0 à 4 A pour une tension de 18V. La température est lue approximativement toutes les 400 ms par un contrôleur Eurotherm 2404. Les cycles de température (consigne et rampe) sont contrôlés par un programme écrit sous Labview (réalisé par L. Perdereau, ingénieur à l'ISTO). Une caméra noir et blanc Martin AVT 146B équipée d'un capteur CMOS 2/3 permet l'acquisition d'image. La résolution maximum de l'image est de 1392 x 1040 pixels². La température est incrustée directement sur l'image avec un temps de rafraîchissement d'environ 1/3s. Pour une vitesse de chauffage de 0,5° à 1°C/min, les transitions de phase sont mesurées à $\pm 0,1^\circ\text{C}$ sur l'image vidéo. Le système a été calibré à l'aide de trois standards de température : (i) fusion du CO₂ solide dans des inclusions fluides du quartz naturel de Campeirio (-56,6°C), (ii) fusion de l'eau pure (0°C), et (iii) homogénéisation d'inclusions fluides synthétiques d'eau pure de densité critique ($T = 373.95^\circ\text{C}$). Les mesures de changement de phase ont été faites en chauffant l'échantillon à une vitesse de 1°C/mn.

Chaque cycle de mesure est filmé plusieurs fois et enregistré en vidéo afin de visionner ensuite les transitions de phase en accéléré et autant de fois que nécessaire. On s'assure ainsi de la reproductibilité des mesures et de leur précision. Certaines mesures de fusion après refroidissement des inclusions ont nécessité d'utiliser plusieurs fois la méthode du « cycling » afin d'être sûr d'observer et de bien mesurer les transitions de phase (ex. Zwart and Touret, 1994). Le 'cycling' consiste à refroidir l'inclusion alors que le processus de fusion d'hydrate ou de glace est en cours. L'abaissement brutal de la température fait croître le cristal à partir des germes existant dans la cavité. Cette procédure permet de mettre en évidence que le cristal fondant est encore présent dans la cavité. Également, en baissant la température de l'inclusion au-delà de son point de congélation, cette méthode permet de séparer physiquement la glace et les hydrates de sel dans la cavité, et ainsi de mieux voir leur fusion respective lors du réchauffement ultérieur.

6.3. DESCRIPTION DES MINÉRAUX DE GANGUE

Dans la veine de Jbel Laassel et dans les géodes et veines de Oued R'Them, on observe un remplissage primaire centripète de quartz, puis de dolomite et sulfures. Les cristaux de quartz automorphe, de taille millimétrique, impliquent un stade précoce d'ouverture rapide, suivi très généralement par un remplissage de cristaux jointifs de

dolomite losangique. Les sulfures de Cu précipitent au centre de la géode et au centre des veines.

Dans l'indice de Oued R'Them, les cristaux de quartz sont recoupés par de nombreuses fractures pluri-millimétriques soulignées d'inclusions fluides (**Fig. 128**) associées à des inclusions de carbonates (**Fig. 128E**). Ces fractures sont également sécantes sur la dolomite (**Fig. 128C et D**). Les cristaux de quartz automorphe ne luminescent pas, alors que les dolomites luminescent en rouge sombre (**Fig. 129D**). Cependant, quand le quartz est recoupé par des fractures, il luminesce aussi en rouge orangée, de même que la dolomite fracturée luminesce en rouge orangé (**Fig. 129A, A' et D**). Seules les fractures soulignées par les inclusions fluides luminescent. Ces fractures n'ont pas d'orientation préférentielle et présentent parfois des textures en éventail en lien étroit avec les sulfures de cuivre primaires. En effet, ces fractures forment au sein du quartz, des structures radiales entre deux cristaux de chalcocite (**Fig. 129E et F**). Dans le cœur des géodes, un liseré blanc en lumière naturelle, est présent quand la dolomite est en contact avec un sulfure de cuivre (**Fig. 130A**). Ce liseré luminesce en rouge orangé de la même façon que les fractures à inclusions fluides (**Fig. 130B**). Au sein de la dolomite, ces fractures peuvent suivre les plans de clivage (**Fig. 130**). Par ailleurs, le quartz présente localement des extinctions roulantes quand il est très fracturé (**Fig. 129B, B' et D**).

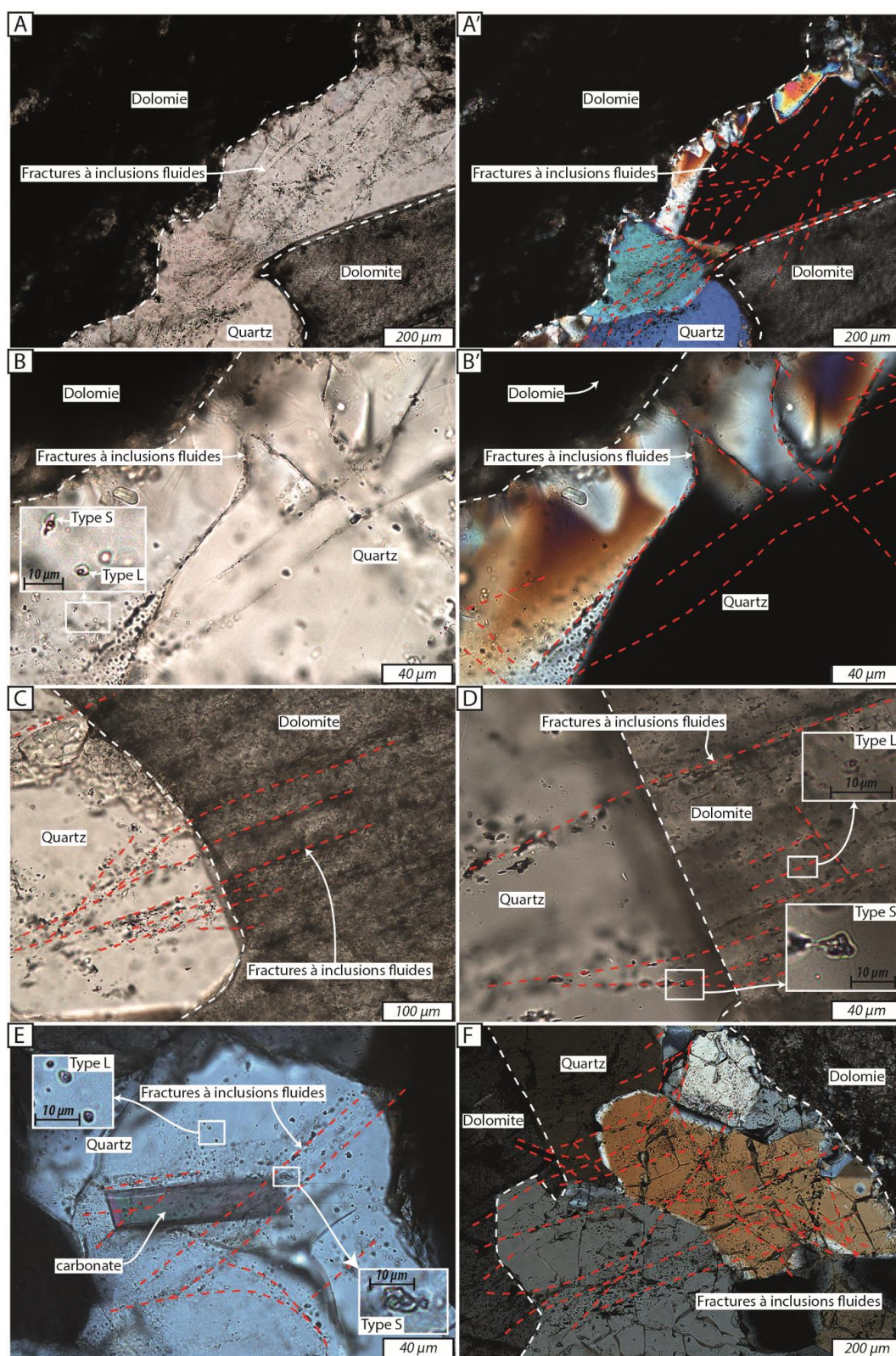


Figure 128 : Planche photographique des textures de trainées d'inclusions fluides de l'indice de Qued R'Them : A (LT, nic. //) et A' (LT, nic. +), trainées d'inclusions fluides de type S et de type L au sein de quartz recoupant plusieurs cristaux de quartz ; B (LT, nic. //) et B' (LT, nic. +), trainées d'inclusions fluides au sein de quartz recoupant plusieurs cristaux de quartz ; C (LT, nic. //) et D (LT, nic. //), trainées d'inclusions fluides de type S et L sécant sur les cristaux de quartz et de dolomite ; E, (LT, nic. +) trainées d'inclusions fluides de type L et S sécantes sur les minéraux en inclusions du quartz ; F, (LT, nic. +) trainées d'inclusions fluides présentant des directions aléatoires au sein du quartz et de la dolomite.

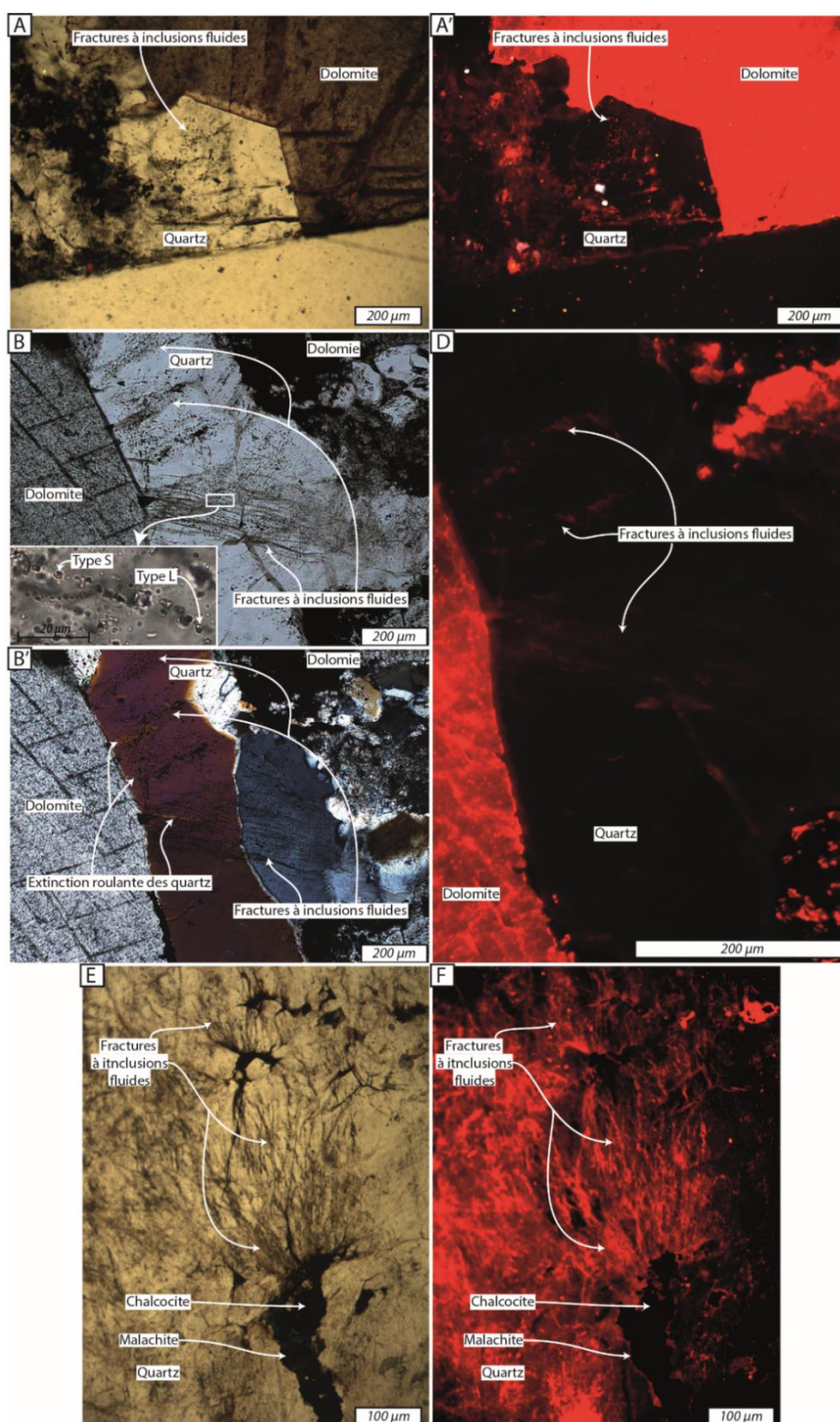


Figure 129 : Planche photographique des observations en cathodoluminescence effectuées sur un échantillon provenant du site de Oued R'Them : A (LT, nic. //) et A' (14,3 mV, 153 mA et 5s), luminescence orange d'une fracture à inclusions fluides ; B (LT, nic. //) et B' (LT, nic. +), quartz présentant localement des extinctions roulantes ; D (15 mV, 130 mA et 5s) quartz

luminescent en orange au niveau des extinctions roulantes ; E (LT, nic. //) et F (15,3 mV, 130 mA et 30s), texture en éventail des trainées d'inclusions fluides à partir des sulfures de cuivre.

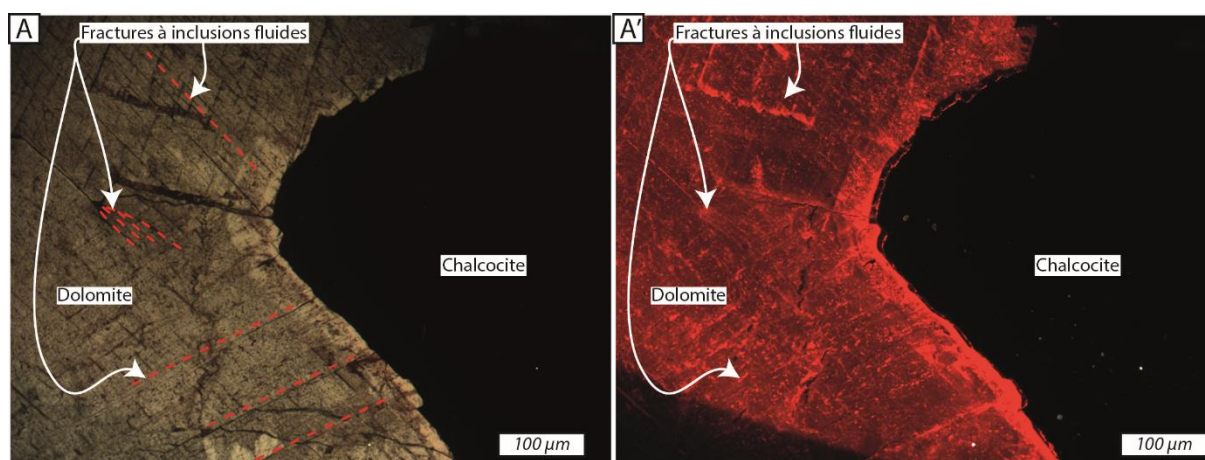


Figure 130 : Plaque photographique prise au microscope à cathodoluminescence : A (LT, nic. //) et A' (14,5 mV, 138 mA et 2s), couronne de réaction blanche en lumière naturelle au contact de la chalcocite et rouge en cathodoluminescence connecté au fractures à inclusions fluides.

Dans le gisement de Jbel Laassel, les minéraux de gangue présentent les mêmes caractéristiques que celles de l'indice de Oued R'Them, y compris la cathodoluminescence rouge orangée des fractures sécantes sur le quartz (**Fig. 131 et 132**). Seule différence, des fractures cathodoluminescentes en bleu recoupent les plans à inclusions fluides. Elles correspondent à de la silice amorphe telle que décrite dans la partie minéralogie (**Fig. 132**). Le quartz comporte également des réseaux denses de micro-fractures parallèles et longues d'environ 100µm, correspondant peut-être à des plans cristallographiques (**Fig. 131C et C'**).

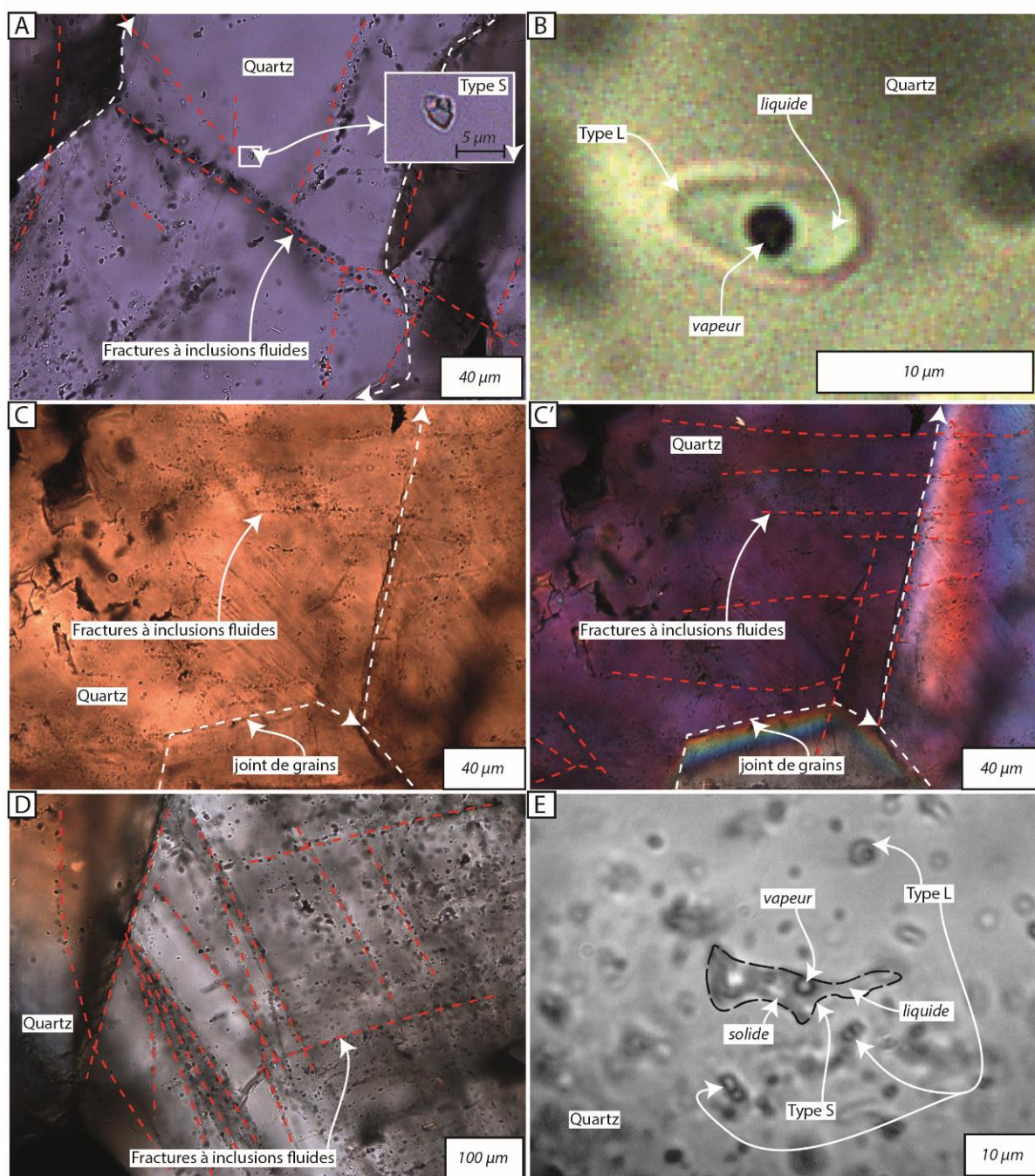


Figure 131 : Planche photographique des textures des inclusions fluides et de la fracturation associée : A, fractures à inclusions fluides recoupant les cristaux de quartz (LT, nic. //) ; B, inclusions fluide de type L dans du quartz (LT, nic. //) ; C (LT, nic. //) et C' (LT, nic. +), fractures à inclusions fluides recoupant les cristaux de quartz ; D, fractures à inclusions fluides empruntant les joints de grains entre les cristaux de quartz et texture en gerbe de ces fractures (LT, nic. +) ; E, fractures à inclusions fluides de type S et L dans un quartz (LT, nic. //).

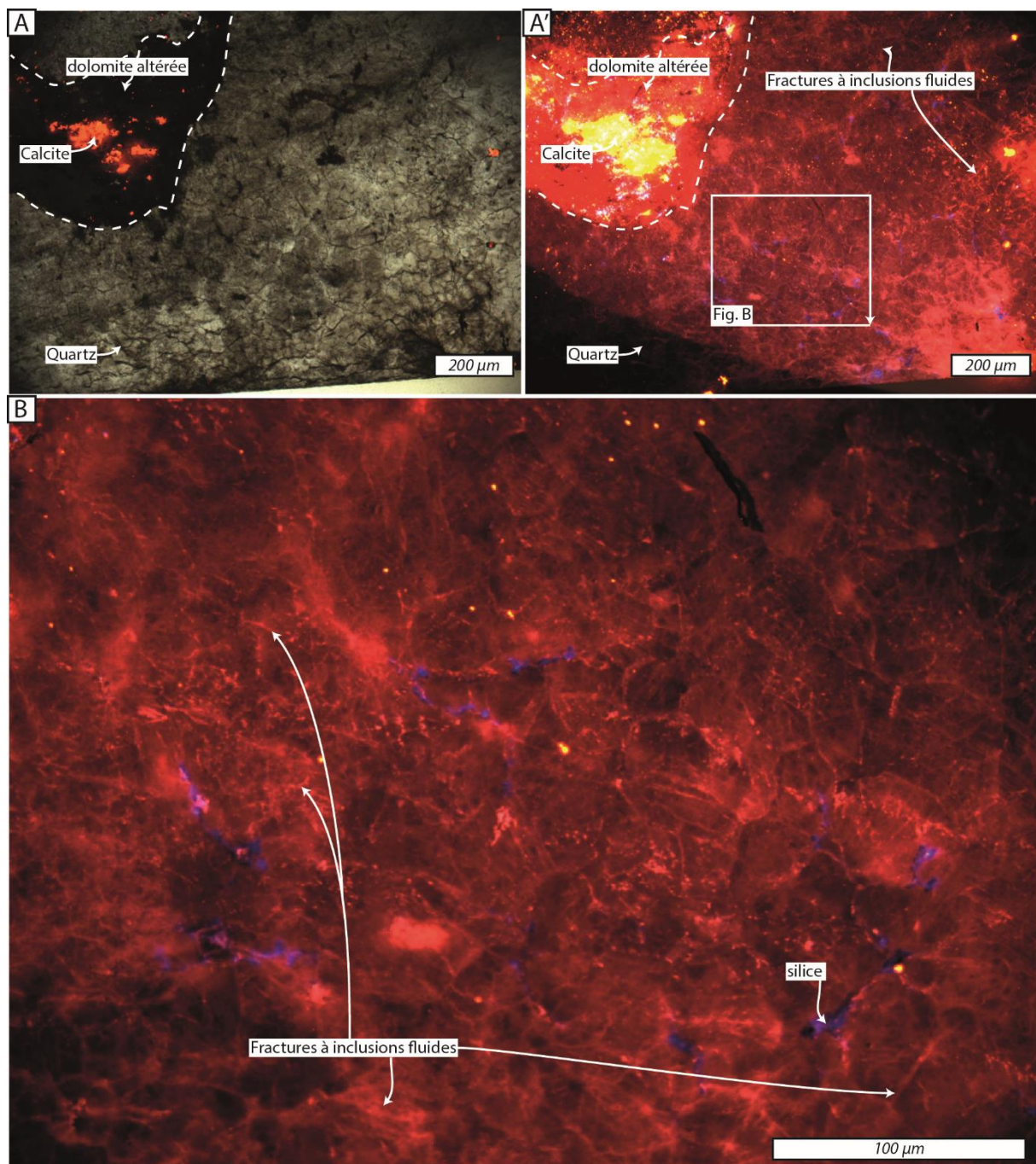


Figure 132 : Planche photographique des observations en cathodoluminescence effectuées sur un échantillon provenant du site de Jbel Laassel : A (LT, nic. //) et A' (15 mV, 115 mA et 4s), cristaux de quartz parcouru de fracture à inclusions fluides dans le plan parallèle à l'éponte de la veine ; B (15 mV, 117 mA et 15s), zoom sur les fracture à inclusions fluide (luminescence rouge) et fracture à silice (luminescence bleue).

6.4. DESCRIPTION DES INCLUSIONS FLUIDES DANS LES GANGUES SILICO-CARBONATEES

Distribution. Aucune inclusion fluide primaire n'a été identifiée dans les deux gîtes étudiés, tant dans le quartz que dans la dolomite. L'ensemble des inclusions fluides mesurées dans les deux sites d'étude est au contraire clairement secondaire, les inclusions étant distribuées selon des micro-fractures intragranulaires ou transgranulaires qui sont cathodoluminescentes en rouge orangé et sans orientation préférentielle (**Fig. 128 à 132**). Ces fractures à inclusions fluides peuvent également s'être mise en place entre les joints de grain de quartz (**Fig. 128A, A', 131C et C'**).

Typologie. Deux types d'inclusions fluides ont été discriminés grâce à l'étude micro-pétrographique. Ces types d'inclusions sont identiques dans les deux sites étudiés, tant par leur nombre que par la nature de leur remplissage.

- les inclusions de type L sont biphasées à 25°C, contenant deux phases, liquide et vapeur. Leur forme peut être ellipsoïdale (**Fig. 131B, E et 133B**) à sphérique (**Fig. 133C**). Leur taille variant de quelques micromètres à une dizaine de micromètres (**Fig. 131B, 133B, C et F**). Elles sont toutefois de plus petite taille dans l'échantillon provenant de Jbel Laassel (**Fig. 131B et E**). La phase liquide occupe entre 20 à 40% du volume de la cavité à Oued R'Them, et environ 30% du volume à Jbel Laassel.

- les inclusions de type S contiennent trois phases à température ambiante: liquide, vapeur et un solide qui ne polarise pas, de forme globulaire à cubique (**Fig. 131E, 133A, D, F, G et H**). Ce solide est du NaCl, comme le confirme le fait qu'il fond lors du chauffage. Les phases, liquide, vapeur et solide, remplissent chacune, respectivement, environ 60%, 20% et 20% du volume de la cavité. Ces inclusions présentent des formes variables, elles sont le plus souvent parallélépipédiques, rectangulaires, et parfois aussi allongées (**Fig. 133A, D, F et H**). Des inclusions de plus grande taille semblent parfois résulter de l'assemblage de plusieurs formes géométriques parallélépipédiques (**Fig. 131E et 133A**). Ceci pourrait traduire des inclusions en voie de rééquilibrage en plusieurs inclusions de plus petites tailles avec des formes géométriques. A Jbel Laassel, la taille des inclusions de type S peut être supérieure à celle des inclusions de type L, atteignant jusqu'à 20 µm (**Fig. 131E**).

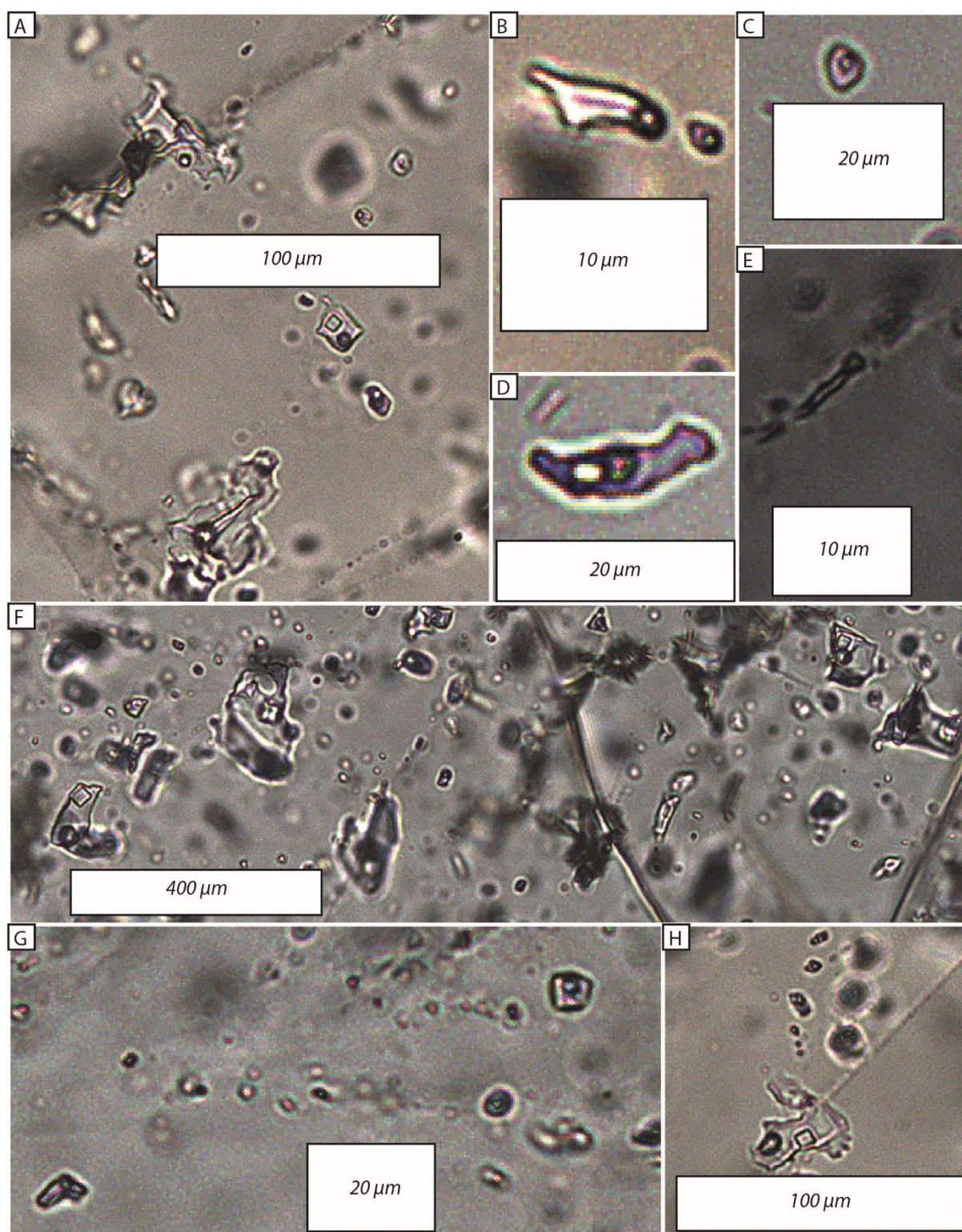


Figure 133 : planche photographique montrant les différentes typologies d'inclusions fluides observés dans l'échantillon du site de Oued R'Them.

Comportement microthermométrique. Lors du réchauffement des inclusions préalablement refroidies jusqu'à la température de -100°C , la température eutectique qui marque

l'apparition de la première goutte de liquide lors du chauffage de l'inclusion congelée, a pu être estimée entre -54,3° et -46,5°C pour les différents types de fluides observés. Cette gamme de température, proche de l'eutectique du système $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ ($T_e = -52^\circ\text{C}$) (Davis et al., 1990) montre que les fluides associés aux minéralisations cuprifères des deux sites d'étude appartiennent au système chimique de référence $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$.

Le comportement des inclusions fluides du système $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ a été explicité dans un diagramme de phases approprié par Zwart and Touret (1994). Deux types de comportement ont été observés selon la saturation ou la sous-saturation des inclusions fluides en NaCl (**Fig. 134**). Après refroidissement, les inclusions fluides sous-saturées en NaCl ont un comportement à l'équilibre lors du réchauffement. Elles évoluent depuis la température eutectique (T_e) le long de la cotectique hydrohalite + glace + vapeur + liquide jusqu'à atteindre la température de disparition de l'hydrohalite ($T_{m, hh}$). Lorsqu'on réchauffe au-delà de ce point, le fluide évolue dans le champ glace + liquide + vapeur le long d'une conode qui joint $T_{m, hh}$ au pôle H_2O jusqu'à atteindre la température de fusion de la glace ($T_{m, ice}$). Ce point est représentatif de la composition globale de l'inclusion dans le système $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ (**Fig. 134**).

Les inclusions fluides du système $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ sur-saturées en NaCl (présence de halite) ont un comportement métastable à basse température (Zwart and Touret, 1994). Elles montrent un eutectique correspondant à T_e (antartците + hydrohalite + glace + vapeur + liquide) tout en ayant de la halite métastable. Comme précédemment le fluide se déplace depuis T_e (disparition de l'antartците) le long de la cotectique hydrohalite + glace + vapeur + liquide (+ halite métastable), la glace fond jusqu'à atteindre $T_{m, ice}$. Au-delà de ce point, le fluide évolue dans le champ divariant hydrohalite + vapeur + liquide (+ halite métastable) jusqu'à atteindre la cotectique hydrohalite + halite + liquide + vapeur. Puis l'hydrohalite fond le long de cette ligne jusqu'à $T_{m, hh}$. Enfin le fluide se déplace dans le champ halite + liquide + vapeur le long de la ligne joignant $T_{m, hh}$ au pôle NaCl jusqu'à la température de fusion de la halite (T_s). Ce point est représentatif de la composition globale de l'inclusion dans le système $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ (**Fig. 134**).

Pour calculer des pourcentages poids (wt%) et des pourcentages molaires (%mol) de NaCl et CaCl_2 , le modèle numérique développé par Steele-MacInnis et al. (2011) pour le système $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ a été utilisé.

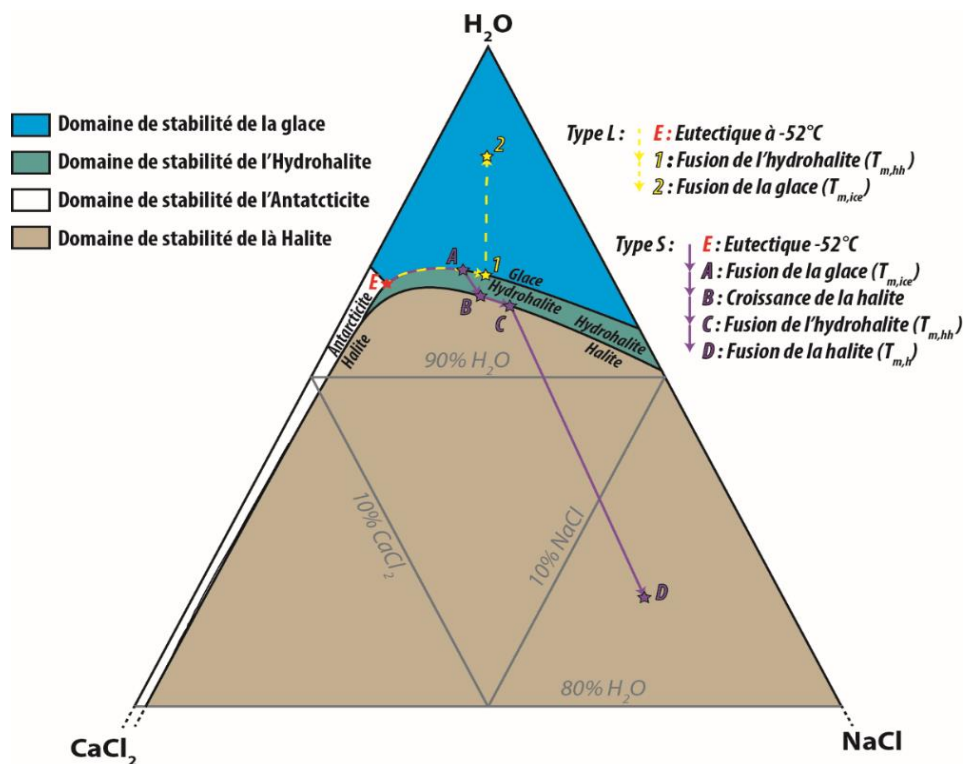


Figure 134 : Partie supérieure du graphique ternaire H_2O - $NaCl$ - $CaCl_2$ montrant en fonction des deux types de fluides observés les différentes transitions de phase solide-liquide observées. Abréviations : **Type L**, inclusions fluide à phases liquide et vapeur ; **Type S**, inclusions fluides à phases liquide, solide et vapeur.

6.5. RESULTATS

La **figure 135** présente les histogrammes des températures d'homogénéisation (T_h) des inclusions fluides de type L et de type S pour chacun des deux échantillons étudiés. La **Figure 135** présente les histogrammes des T_h mesurés dans les deux échantillons pour tous types d'inclusions fluides confondus. La synthèse des mesures effectuées est présentée dans les **tableaux 1, 2 et 3** en l'Annexe.

Echantillon provenant de l'indice de Oued R'Them

- **Type S dans le quartz.** Les $T_{m, hh}$ sont comprises entre $-11,7^\circ$ et $-16,1^\circ C$ avec une moyenne de $-13,6^\circ C$. Les $T_{m, ice}$ sont comprises entre $-32,8^\circ$ et $-26,6^\circ C$ avec une moyenne de $-28,3^\circ C$. Les T_h des inclusions fluides de **type S** ($n=17$) varient de 178° à $247^\circ C$, avec une valeur moyenne de $219^\circ C$ et un écart type de $15^\circ C$ (**Fig. 135A**). Cela correspond à des teneurs en sels comprises entre 13,7 et 23,8 wt% $NaCl$, et comprises entre 10,2 et 18,2 wt% $CaCl_2$ (**Fig. 137**).

- les deux inclusions de **type S_{hal}** se sont homogénéisées par disparition du cube de sel à 97° et 110°C. Les $T_{m, hh}$ ont été mesurées à -13,2° et -12,3°C et les $T_{m, ice}$ à -32,8° et -31,7°C. Ces mesures indiquent des compositions globales de 13,7 wt% NaCl et 18,2 wt% CaCl₂ pour l'une et de 17,2 wt% NaCl et 16,3 wt% CaCl₂ pour l'autre (**Fig. 137**).

- *Type L dans le quartz.* Ces inclusions ont des $T_{m, hh}$ comprises entre -38,1° et -25,9°C pour une moyenne de -29,5°C. Leurs $T_{m, ice}$ sont comprises entre -18,8° et -12,6°C pour une moyenne de -15,4°C. Ces mesures de $T_{m, hh}$ et $T_{m, ice}$ indiquent des teneurs en sels comprises entre 2,3 et 10,3 wt% NaCl, et comprises entre 9,5 et 15 wt% CaCl₂ (**Fig. 137**). Les inclusions de type L dans le quartz se sont homogénéisées en phase liquide entre 172° à 247°C, avec une moyenne de 225°C et un écart type de 23°C (**Fig. 135C**).
- *Type $L_{<5 \mu m}$ dans le quartz (taille IF <5 μm).* Dans le quartz, ces inclusions se sont homogénéisées entre 190° à 296°C avec une valeur moyenne de 239°C et un écart type de 29°C (**Fig. 135E**).
- *Type L dans les dolomites.* Les températures de fusion de l'hydro-halite ($T_{m, hh}$) de ces inclusions sont comprises entre -26,7° et -25,8°C avec une moyenne de -26,2°C. Leurs $T_{m, ice}$ sont comprises entre -17,1° et -14,6°C pour une moyenne de -15,4°C. Ces deux mesures indiquent des teneurs en sels comprises entre 8,2 et 9,6 wt% NaCl, et comprises entre 8,8 et 9,9 wt% CaCl₂ (**Fig. 137**). Les T_h des inclusions de type L dans la dolomite vont de 247° à 269°C avec un écart type de 8°C (n=6) et une valeur moyenne de 254°C, (**Fig. 135G**).
- *Type $L_{<5 \mu m}$, dans les dolomites (n=41).* Les T_h ont une valeur moyenne de 255°C, allant de 241 à 277°C pour un écart type de 10°C (**Fig. 135G**).

Quelques soient le type (n=103), les T_h ont une valeur moyenne de 238°C, allant de 97 à 296°C pour un écart type de 30°C (**Fig. 136**). Les $T_{m, hh}$ sont comprises entre -26,7° et -25,8°C pour une moyenne de -26,2°C. Les $T_{m, ice}$ sont comprises entre -17,1° et -14,6°C pour une moyenne de -15,4°C. Les teneurs en sels varient entre 2,3 et 23,8 wt% NaCl, et entre 8,8 et 18,2 wt% CaCl₂ (**Fig. 137**).

Echantillon du gisement de Jbel Laassel

- *Type L dans le quartz.* Les $T_{m, hh}$ sont comprises entre -32,1° et -24,0°C avec une moyenne de -28,5°C. Les $T_{m, ice}$ sont comprise entre -16,5° et -9,9°C avec une moyenne de -14,3°C. Cela correspond à des teneurs en sels comprises entre 4,2 et 11,7

wt% NaCl, et comprises entre 5,9 et 14,4 wt% CaCl₂ (**Fig. 137**). Les T_h de ces inclusions (n=21) vont de 110° à 170°C, avec une valeur moyenne de 135°C et un écart type de 16°C (**Fig. 135D**).

- *Type L dans le quartz de taille <5 μm.* Elles présentent des T_h allant de 124 à 172°C (n=5) avec une valeur moyenne de 144°C et un écart type de 16°C (**Fig. 135F**).
- Une inclusion de **type S_{hal}** dans le quartz s'est homogénéisée à 158°C par disparition du cube de sel. La T_{m,hh} de cette inclusion est de -14,5°C, sa T_{m,ice} est de -27,7°C. Ces mesures correspondent à des teneurs en sels de 25,9 wt% NaCl, et de 10,6 wt% CaCl₂ (**Fig. 137**).

Quel que soit leur type (n=27), des T_h ont une valeur moyenne de 138°C, allant de 110 à 172°C pour un écart type de 17°C (**Fig. 136**). Les teneurs en sels varient entre 4,2 et 25,9 wt% NaCl, et entre 5,9 et 14,4 wt% CaCl₂ (**Fig. 137**).

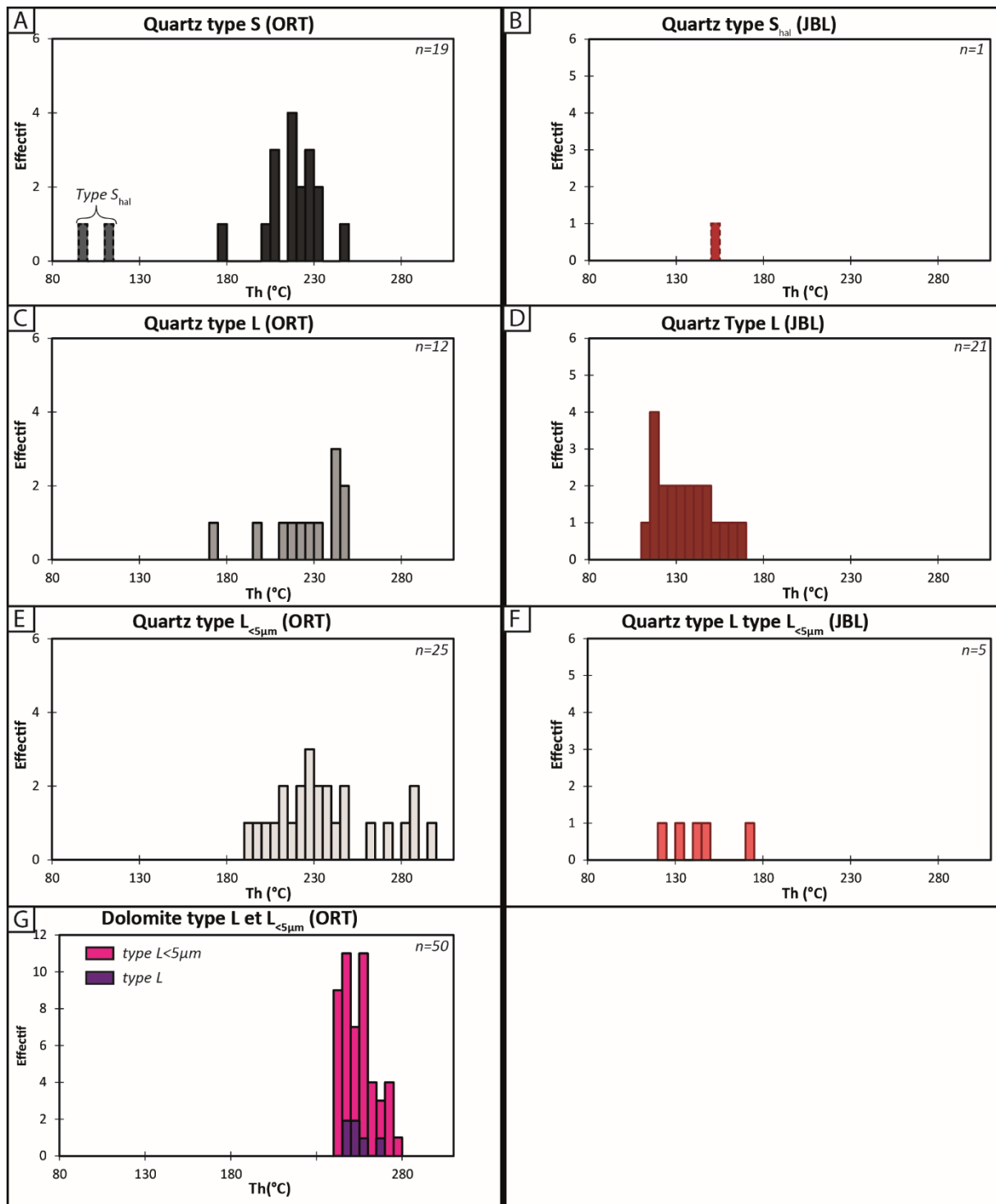


Figure 135 : Planche montrant les histogrammes des classes de température d'homogénéisation en fonction des effectifs et par type d'inclusions fluides. Abréviations : Th, température d'homogénéisation, ORT, indice de Oued R'Them, JBL, gisement de Jbel Laassel.

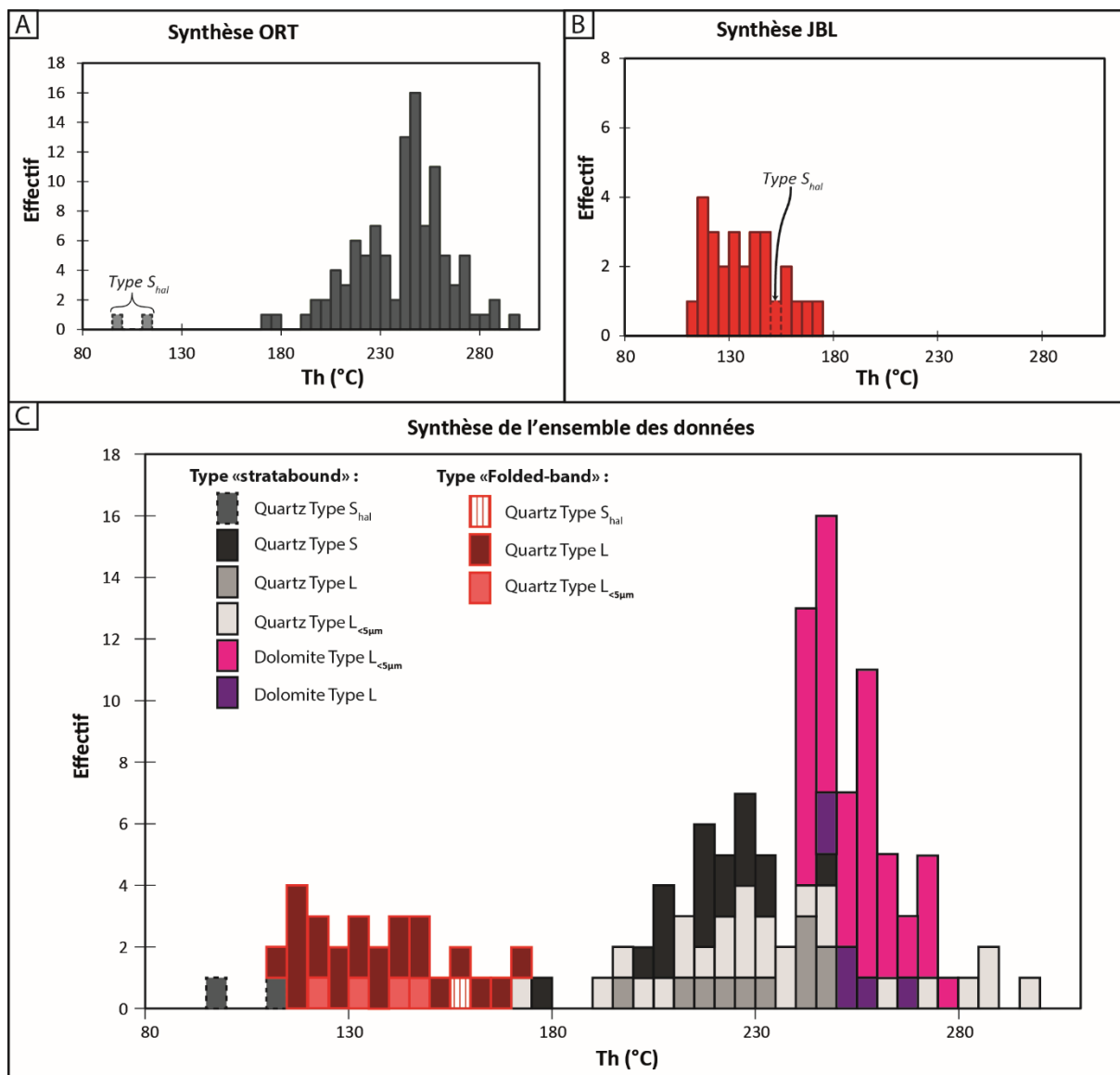


Figure 136 : Planche montrant la synthèse des histogrammes des classes de température d'homogénéisation en fonction des effectifs.

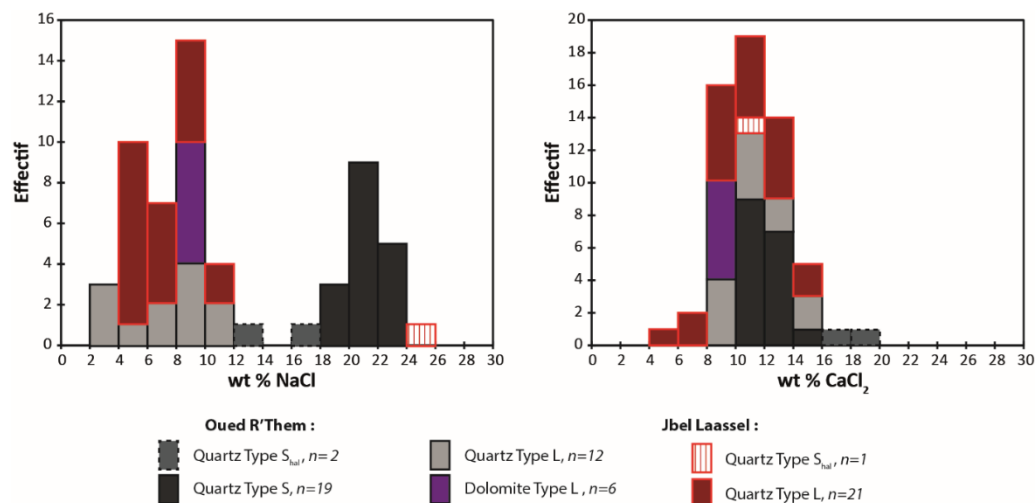


Figure 137 : Planche montrant les histogrammes des classes de pourcentage poids de NaCl et CaCl_2 en fonction des effectifs en fonction du type d'inclusions fluides.

Les points représentatifs de toutes les inclusions fluides analysées sont projetés dans le diagramme ternaire $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ (**Fig. 138**). Nous avons également projeté toutes nos inclusions fluides dans des diagrammes binaires : Th – wt% NaCl, Th – wt% CaCl_2 , Th - Ca/Na (mol) et Th – wt% eq NaCl (**Fig. 139**).

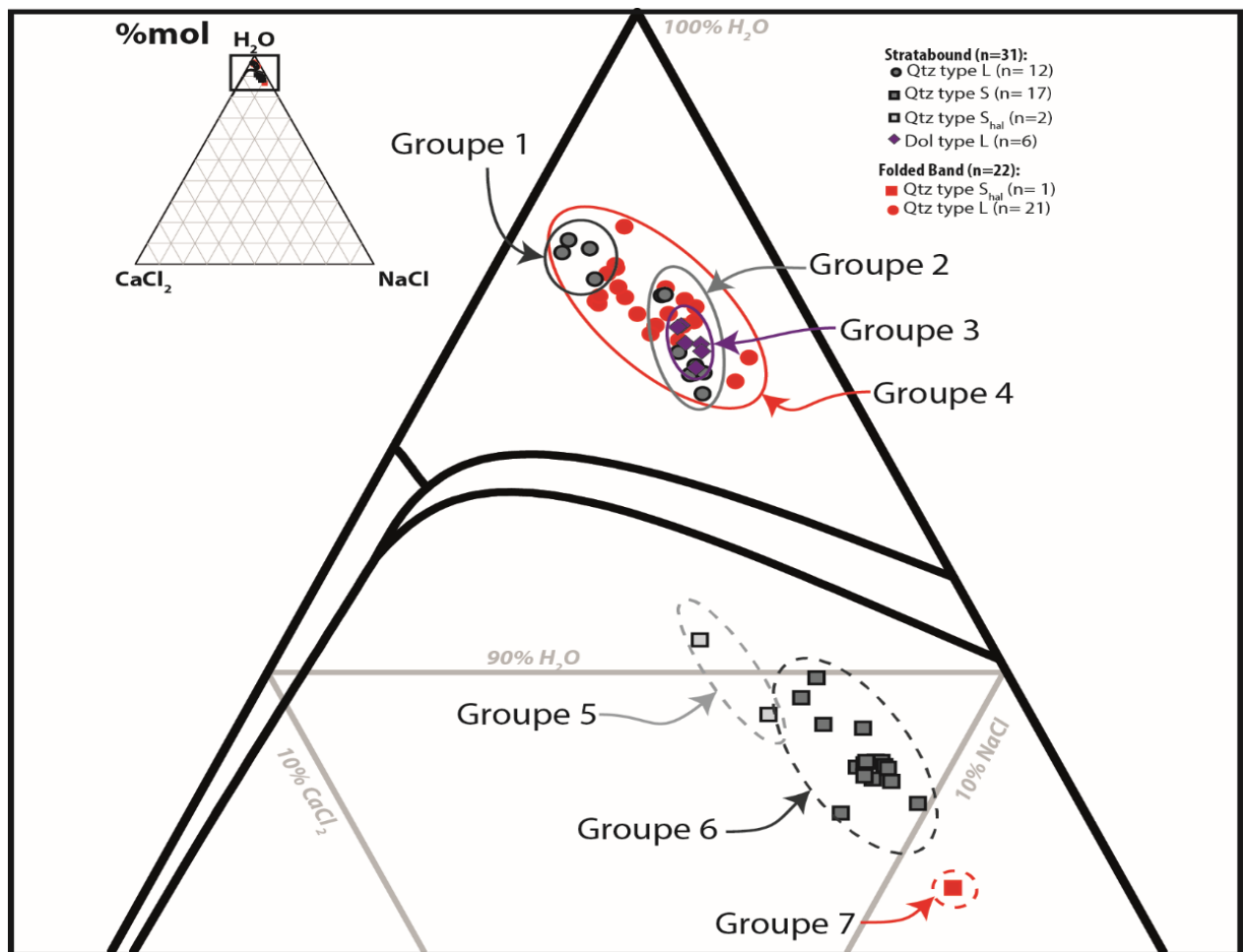


Figure 138 : Diagramme ternaire H₂O-NaCl-CaCl₂ en pourcentage molaire montrant les différents groupes en fonction de leur salinité.

L'étude micro-thermométrique et pétrographique permet de discriminer des sous-groupes au sein de deux types d'inclusions fluides :

- en fonction de la nature du cristal hôte, **quartz** ou **dolomite**.
- en fonction de leur taille (par exemple **Type L** et **Type L_{<5 μm}**)
- en fonction de la phase qui disparaît à l'homogénéisation. En effet trois inclusions fluides de **Type S_{hal}** se sont homogénéisées par dissolution du cube de halite alors que les autres inclusions de **type S** se sont homogénéisées par disparition de la phase vapeur.
- en fonction de leur projection dans le diagramme ternaire H₂O-NaCl-CaCl₂ (**Fig. 138**).

Soit, les groupes suivant (**Fig. 138**) :

- Le **groupe 1** correspond à des inclusions de type L dans le quartz de l'échantillon de Oued R'Them, ayant un pourcentage molaire de NaCl inférieur à 0,02%.
- Le **groupe 2** correspond à des inclusions de type L dans le quartz de l'échantillon de Oued R'Them, ayant un pourcentage molaire de NaCl supérieur à 0,02%.
- Le **groupe 3** correspond à des inclusions de type L au sein des fractures recoupant les dolomites du site de Oued R'Them.
- Le **groupe 4** correspond aux inclusions de type L du site de Jbel Laassel.
- Le **groupe 5** aux deux inclusions de type S_{hal} du site de Oued R'Them.
- Le **groupe 6** correspond aux inclusions de type S du site de Oued R'Them s'homogénéisant par disparition de la phase vapeur.
- Le **groupe 7** correspond à l'unique mesure d'inclusion fluide de type S_{hal} de Jbel Laassel.

Sur chacun des deux types d'inclusions fluides, quelle que soit la zone d'étude ou leur minéral hôte, la teneur globale en sels (NaCl et $CaCl_2$) est indépendante de la température d'homogénéisation (**Fig. 139D**) (environ 17% pour les inclusions fluides de type L et à environ 33 % pour les inclusions fluides de type S et S_{hal}). Bien que le rapport Ca/Na varie au sein de chaque type d'inclusions fluides (**Fig. 139C**), leur teneur en chlore reste constante. Ceci implique probablement des échanges Na-Ca entre le fluide et la roche. En revanche les teneurs en NaCl et $CaCl_2$ varient selon les différents groupes d'inclusions établis précédemment (**Fig. 139 A et B**).

- Le groupe 1 montre un rapport Ca/Na allant de 2 à 4 (**Fig. 139C**), une teneur en NaCl constante à environ 3%wt NaCl (**Fig. 139A**) et à forte teneur en $CaCl_2$, de l'ordre de 14%wt (**Fig. 139B**).
- La teneur en NaCl des inclusions du groupe 2 augmente avec la température d'homogénéisation, passant de 6 à 10%wt NaCl (**Fig. 139A**) à teneur en $CaCl_2$ constante (9%wt) (**Fig. 139B**).
- Le groupe 3 ne montre ni variation significative de T_h (260°C) ni variation de teneur en NaCl (9%wt) et $CaCl_2$ (9%wt) (**Fig. 139**).
- Le groupe 4 présente des T_h dispersées dans la gamme $135^\circ \pm 35^\circ C$ pour des teneurs en sel qui varient de 4 à 12%wt NaCl (**Fig. 139A**) et de 6 à 15%wt $CaCl_2$ (**Fig. 139B**). Par ailleurs ces variations de teneurs en sels du groupe 4 ne montrent pas de lien avec la T_h (**Fig. 139**).

- Le groupe 5 est à teneur en sels constante à 15%wt NaCl (**Fig. 139A**) et 17%wt CaCl₂ (**Fig. 139B**).
- Le groupe 6 montre une teneur en NaCl qui augmente de 16 à 24%wt avec la température d'homogénéisation (**Fig. 139A**). En revanche, la teneur en CaCl₂, du groupe 6 varie de 10 à 15%wt CaCl₂ sans lien apparent avec la T_h (**Fig. 139B**). Le groupe 7 comporte une unique inclusion à teneur globale en sels de l'ordre de 36%wt pour une T_h de 150°C (**Fig. 139D**).

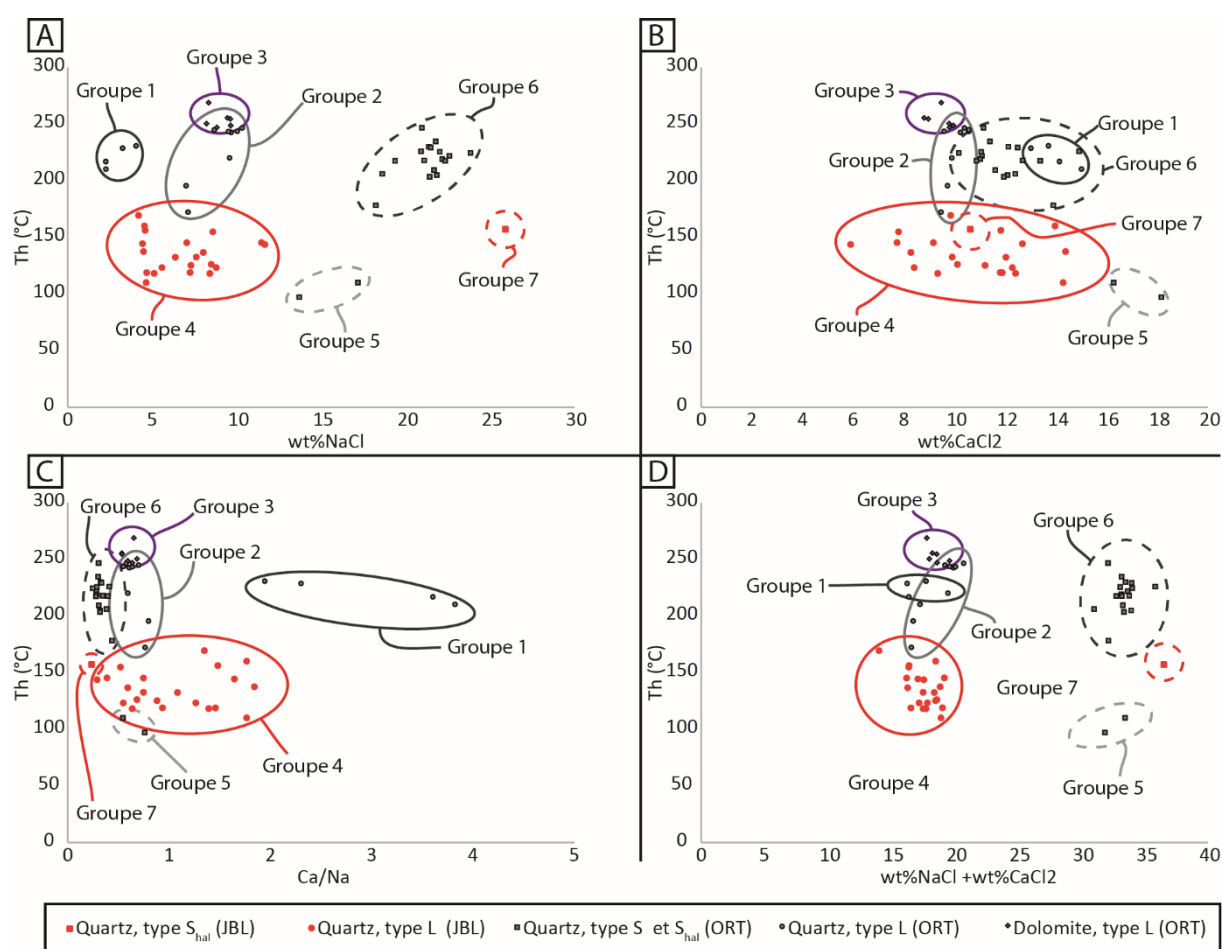


Figure 139 : Planche de graphiques binaires représentant les différents groupes discriminés en fonction des teneurs en sels et de la température d'homogénéisation (T_h) : A, T_h en fonction du wt% NaCl ; B, T_h en fonction de wt% CaCl₂ ; C, T_h en fonction du rapport molaire Ca/N ; D, T_h en fonction de la teneur cumulée de NaCl et CaCl₂.

Les groupes 1, 2 3 et 4 semble former un domaine de salinité dans le diagramme ternaire (**Fig. 138**) avec deux extrêmes allant d'un pôle riche en NaCl (12 wt%) vers un pôle appauvri en NaCl (3 wt%). Au sein de ce domaine, les groupes 2 et 3 forment un sous domaine montrant une variation linéaire depuis un pôle riche en NaCl (10 wt%) à T_h élevée (250°C) par rapport aux autres mesures de ces deux groupes, vers un pôle appauvri en NaCl

(6 wt%) à T_h plus faible (150°C). Cette tendance peut signifier des phénomènes pulsatoires lors de la formation des fractures et du transfert des fluides. Les observations du groupe 1 ont également des salinités particulières par rapports aux autres observations de ce domaine. En effet leur rapport Ca/Na varie de 2 à 4 alors que le reste des observations est soit constant pour les groupe 2 et 3, soit inférieur à 2 pour le groupe 4 (**Fig. 139C**).

Les groupes 5, 6 et 7 semblent également former un domaine de salinité H_2O -NaCl- $CaCl_2$ (**Fig. 138**) avec deux extrêmes allant d'un pôle riche en NaCl (26 wt%) vers un pôle appauvri en NaCl (14 wt%).

6.6. *PRESSION MINIMALE DE PIEGEAGE ET CORRECTION DE PRESSION*

Pour le calcul des isochores des inclusions de type L e S, le modèle numérique développé par Zhang and Frantz (1987) a été utilisé. Deux inclusions fluides de type S_{hal} (homogénéisation par fusion de la halite) ont été observées dans l'indice de Oued R'Them et une dans le gisement de Jbel Laassel (**Fig. 140**). Becker et al. (2008) ont proposé une méthode pour estimer la pression minimale de piégeage (P_{min}) de ces inclusions. Elle correspond dans le diagramme de phase pression température, du système H_2O -NaCl, à l'intersection de l'isochore partant du point T_{L+V} (T homogénéisation liquide + vapeur) avec la droite liquidus (H+L) – L définit en fonction de $T_{m,h}$ (**Fig. 141**). Pour le site de Oued R'Them, les P_{min} de piégeage de ces IF sont de 38 et 100 MPa et de 184 MPa pour le site de Jbel Laassel, correspondant à une température minimale de piégeage de 250°C environ (**Fig. 140**).

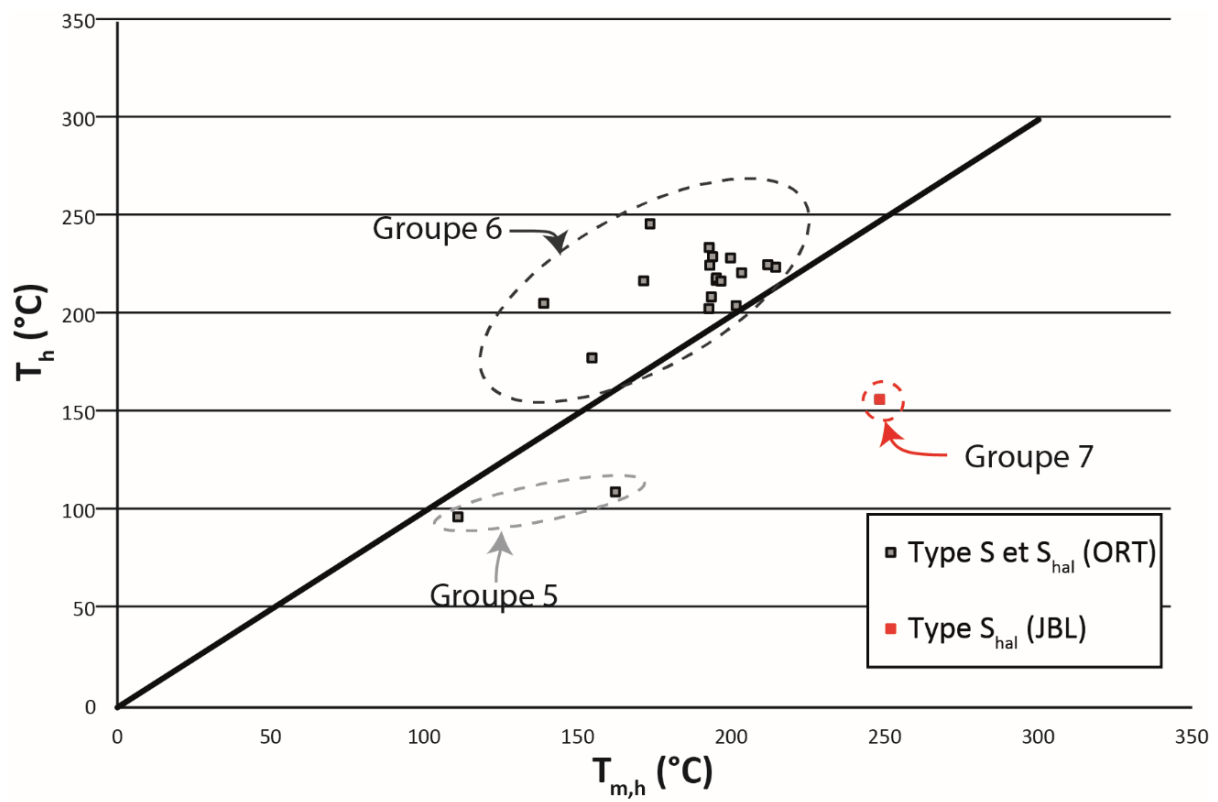


Figure 140 : Graphique montrant les températures de fusion de la halite ($T_{m,h}$) en fonction des températures d'homogénéisation (T_h).

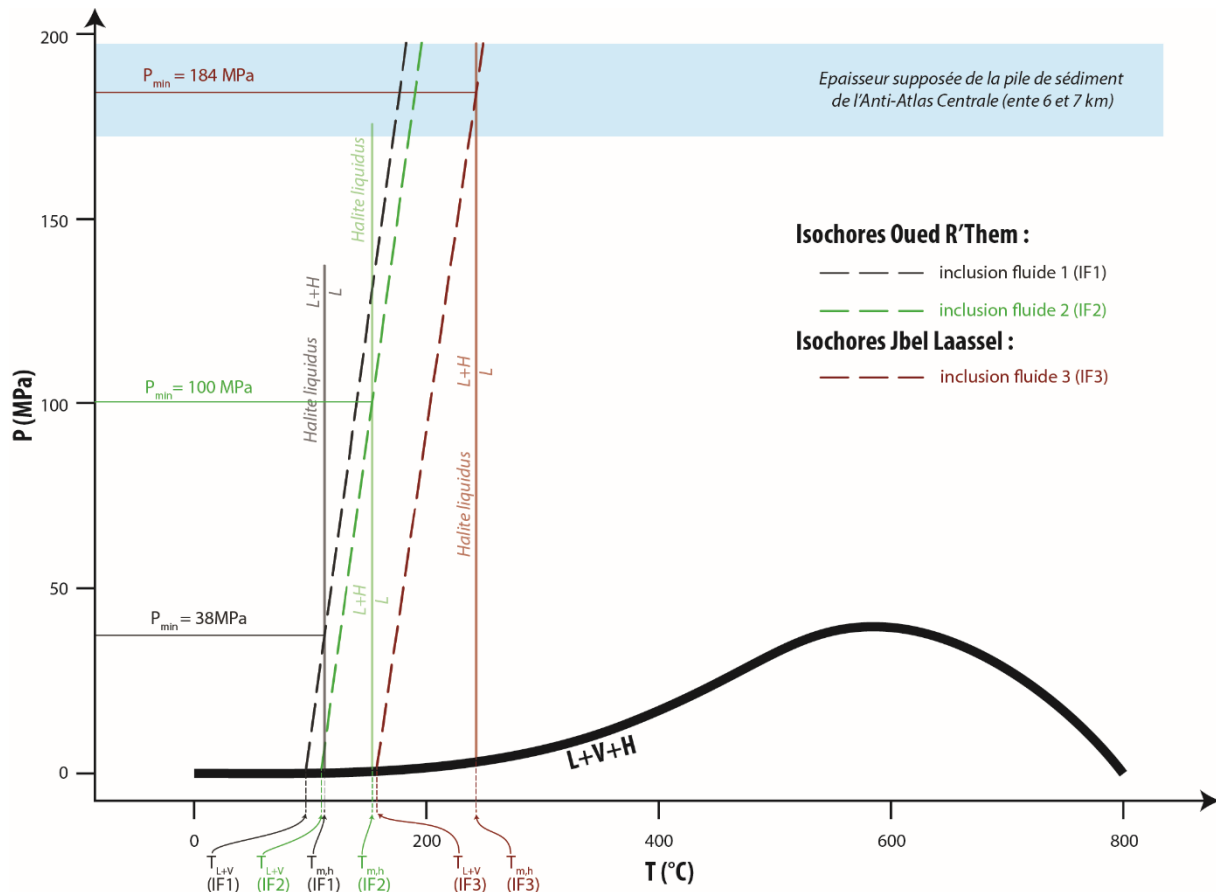


Figure 141 : Diagramme de phase pression (P) température (T) du système $H_2O-NaCl$ avec les isochores des inclusions fluides dont l'homogénéisation était marquée par la fusion de la halite (modifié d'après Becker et al., 2008). Abréviations : P_{min} , pression minimale de piégeage ; T_{L+V} , température d'homogénéisation de la phase liquide et vapeur ; $T_{m,h}$, température de fusion de la halite.

La pile sédimentaire dans l'Anti-Atlas occidental possède une épaisseur comprise entre 8 et 10 km, pour l'Anti-Atlas occidental entre 4 et 5 km (Michard et al., 2008). Par conséquent, l'épaisseur de cette pile sédimentaire dans l'Anti-Atlas central a été estimée, dans cette étude, entre 6 et 7 km. En tenant compte de cette épaisseur de sédiments, une correction de température de l'ordre de 80°C pour les isochores de l'ensemble de nos mesures (**Fig. 142**). Par conséquent :

- les inclusions fluide mesurées sur le site de Oued R'Them auraient une température de piégeage moyenne de :
 - 299°C pour celles de type S mesurées dans le quartz,
 - 305°C pour celles de types L mesurées dans le quartz,
 - 334°C pour celles de type L mesurées dans la dolomite.

- les inclusions fluide mesurées sur le site de Jbel Laassel auraient une température de piégeage moyenne de :
 - 238°C pour celle de type S mesurée dans le quartz,
 - 215°C pour celles de type L mesurées dans le quartz.

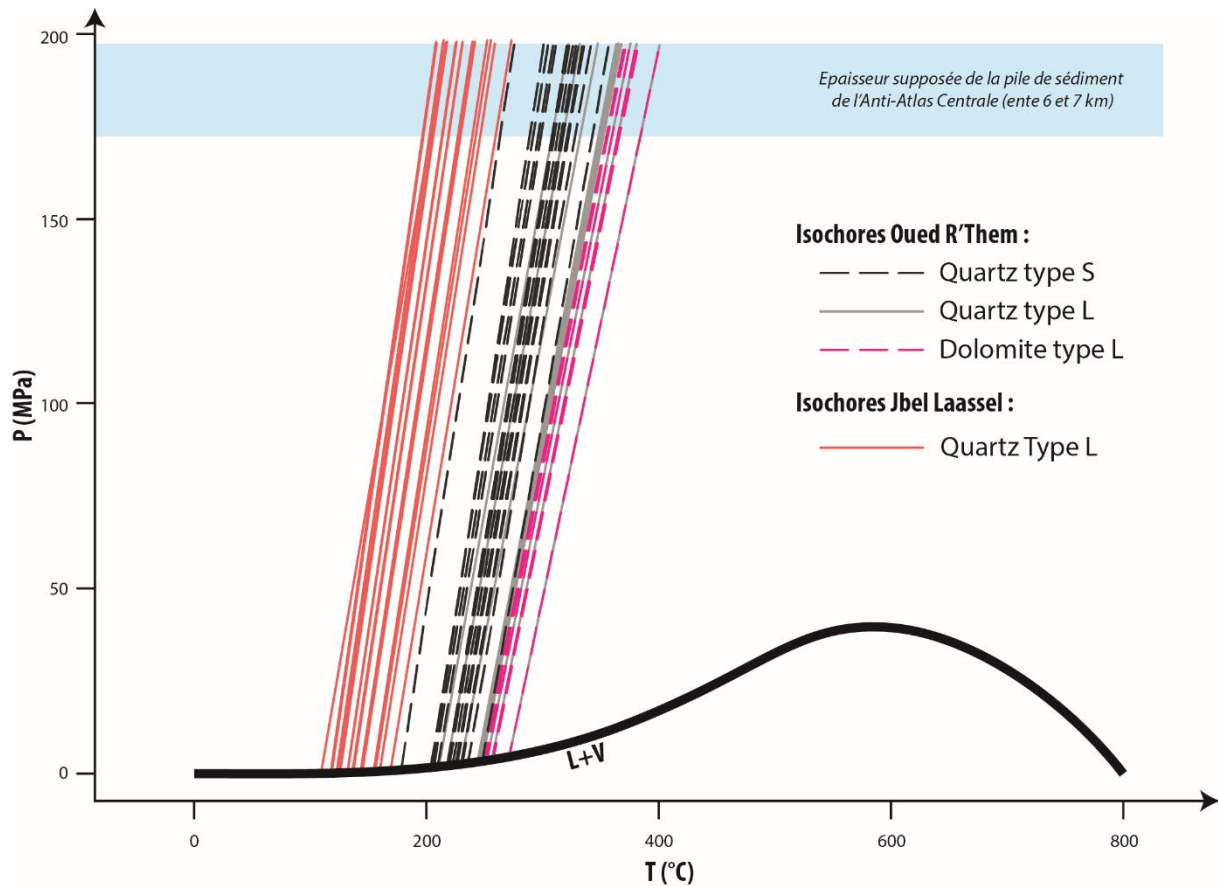


Figure 142 : Diagramme de phase pression (P) température (T) du système $H_2O-NaCl$ avec les isochores des inclusions fluides (modifié d'après Bodnar, 1994).

Chapitre 7. Discussion

7. Discussion

7.1. DEUX MORPHOLOGIES DIFFÉRENTES POUR LES CORPS MINÉRALISÉS

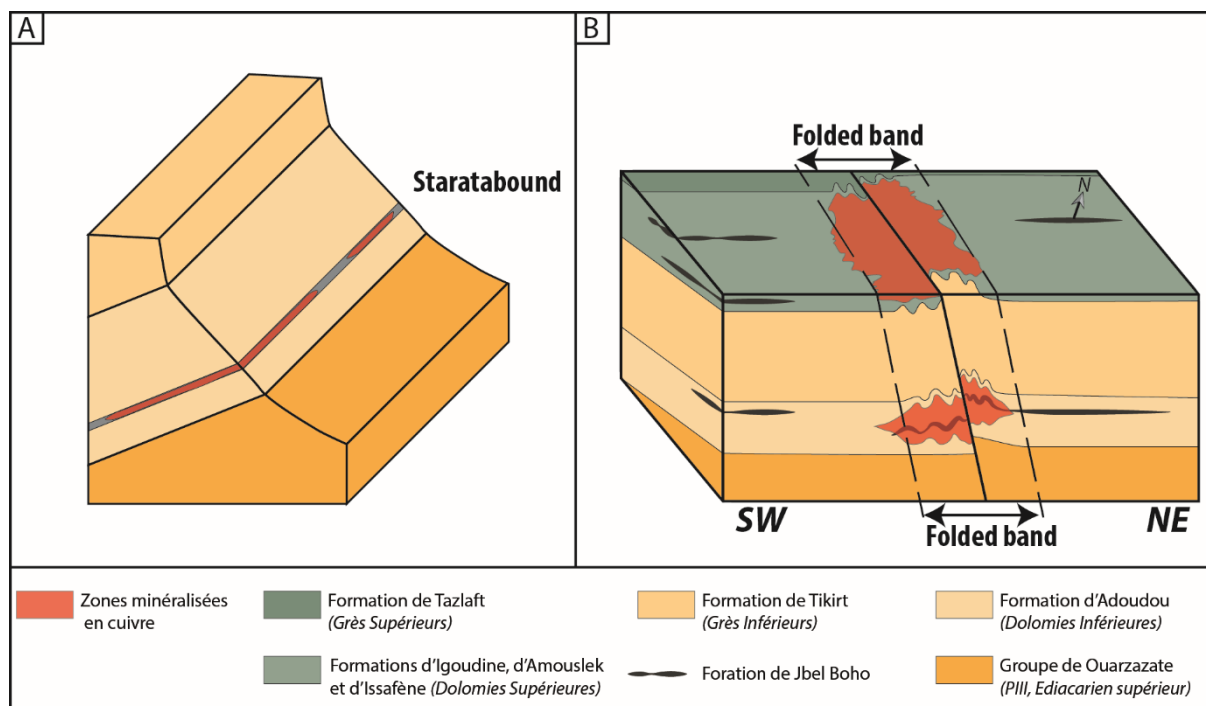


Figure 143 : Représentation schématique en – 3D - des deux morphologies de corps minéralisés cuprifères de la couverture néoproterozoïque à Cambrienne observés dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. A, le type « stratabound » ; B, le type « folded-band ».

Deux types de corps minéralisés en cuivre ont été observés au sein de la couverture Néoproterozoïque à Cambrienne de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (**Fig. 143**). Le type « stratabound » est localisé à la base de la formation d'Adoudou au sein d'un niveau porteur composé systématiquement des mêmes faciès sur l'ensemble des sites étudiés (**Fig. 143A**), de la base au toit : un niveau bréchique, un niveau de dolomie noire, un niveau de dolomie beige et un autre niveau de dolomie noire. Ce niveau porteur est présent sur l'ensemble du pourtour de la boutonnière mais il a été décrit comme minéralisé seulement dans la partie Est de celle-ci (**Fig. 29**). Le type « folded-band » est localisé au sein de la formation d'Adoudou et également au sein des formations d'Igoudine, d'Issafène et d'Amouslek. Les corps minéralisés de type folded-band sont présents lorsque ces formations sont recoupées par des failles de directions N130° à N160° à l'origine des plis localisés de part et d'autre de ces failles (« folded-band ») (**Fig. 143B**). D'après nos observations, les corps cuprifères se concentrent dans les charnières des anticlinaux des folded-band (**Fig. 50**) ou au contact des failles inverses de même direction (**Fig. 53**).

7.2. COMPARAISON DES MINÉRALISATIONS DE TYPE « STRATABOUND » ET « FOLDED-BAND »

7.2.1. Apport des textures et des successions paragénetiques dans la compréhension de ces minéralisations

Dans les deux types de minéralisation, « stratabound » et « folded-band », les minéraux porteurs du cuivre se concentrent sous la forme d'un stockwork, sécant sur les structures sédimentaires (**Fig. 144**). A l'œil nu, les minéraux cuprifères disséminés ont été décrits comme connectés au réseau de veines du stockwork. Cette observation a également été réalisée au microscope électronique à balayage (MEB) (**Fig. 144**). De plus, la minéralogie et les textures, des veines et de ces disséminations, sont auto-similaires de l'échelle du terrain à celle du MEB (**Fig. 144 et 145**). Ces veines présentent localement des textures de type « brèche cocarde » et « quartz en peigne ».

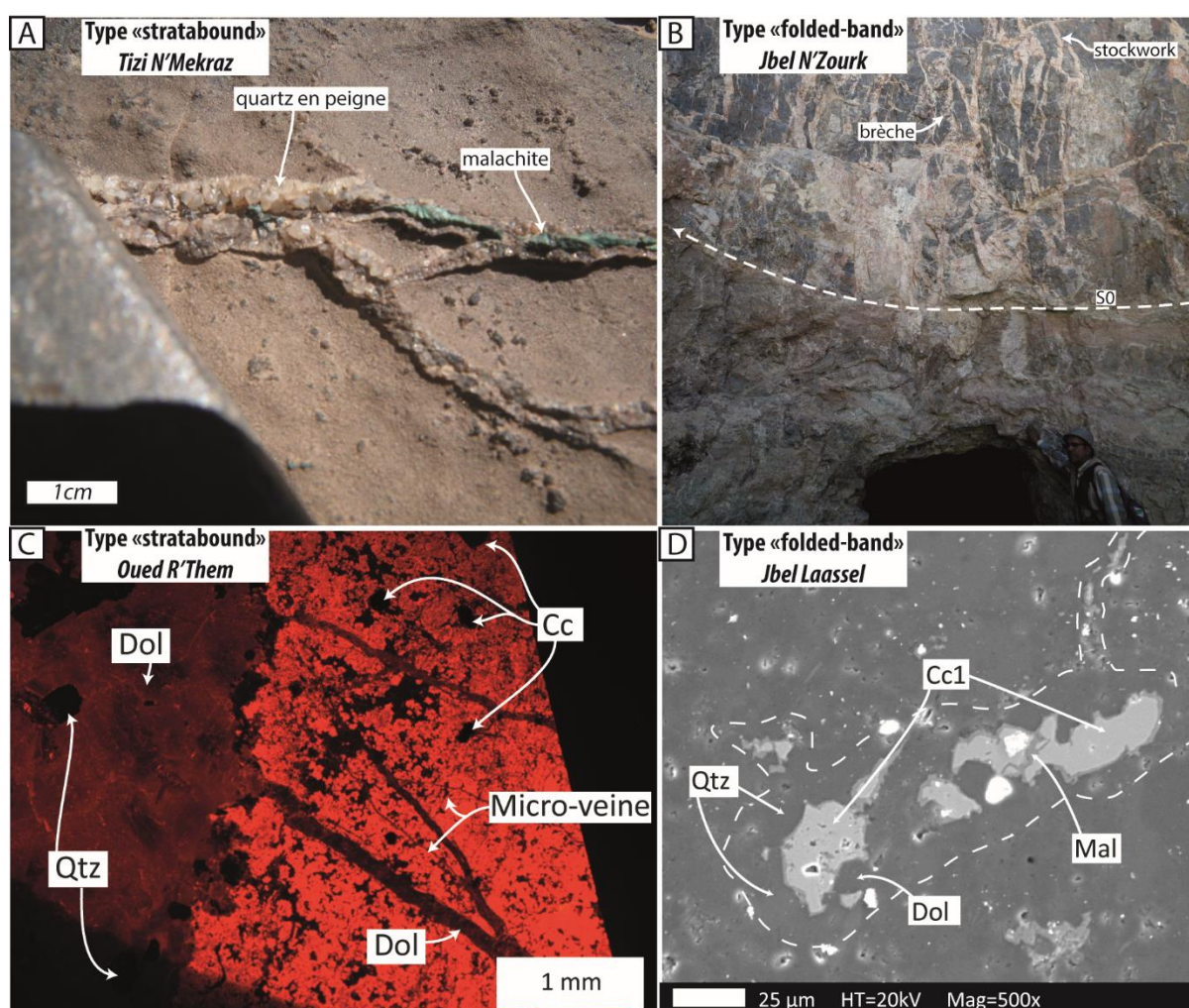


Figure 144 : Planche photographique montrant une synthèse des observations à différentes échelles pour les minéralisations de types « stratabound » et « folded band ». Les figures A et B sont des photos de terrain, la figure D est une image MEB ; La

figure C est une image prise en cathodoluminescence (12,7 mV, 112mA et 2s) montrant une veine à quartz et dolomite reliée à un réseau de veinules à quartz et/ou dolomite connectant les sulfures disséminés dans la dolomie. Abréviations : Dol : dolomite, Cc : chalcocite, Mal : Malachite, Qtz : quartz.

En effet, dans les deux types morphologiques décrits, le stockwork à cuivre est systématiquement associé à une gangue composée, dans l'ordre chronologique et des épontes vers le cœur des veines, de quartz, de dolomite et de calcite (**Fig. 145**). Les sulfures primaires s'intercalent ou sont présents en inclusion dans ces minéraux de gangue. Ces sulfures sont constitués de bornite, de chalcocite et de chalcopirite, les deux premiers étant présents dès le stade à quartz jusqu'au stade à calcite, alors que la chalcocite n'est présente qu'entre les stades à dolomite et à calcite. Cependant, entre ces deux derniers minéraux de gangue, la chalcocite est systématiquement présente sur l'ensemble des sites étudiés (**Fig. 145**). Aucune pyrite, ni sulfures de plomb, ni sulfures de zinc n'ont été observés. Au total, quatre phases de mise en place de veines ont été mises en évidence, correspondant à quatre phases de réouverture des veines ou/et de fracturation. En effet, ces minéraux (gangue est sulfures) peuvent être présents ensemble, au sein des mêmes veines, mais ils peuvent également être présents sous forme de veine « monominérale » connectée aux veines multi-minérales. Les minéraux secondaires, qu'il s'agisse des sulfures (covellite, digenite et chalcocite secondaire), des carbonates (malachite) ou des oxydes (tenorite et cuprite) sont issus de l'altération des sulfures primaires. Le terme « minéralisation oxydé de la couverture » est fréquemment employé pour évoquer ces minéralisations (MAACHA et al., 2011b) cependant, la proportion sulfurée primaire ou hypogène n'est pas négligeable dans ces minéralisations. En effet, la minéralisation du gisement de Jbel Laassel présente un rapport de teneur entre le cuivre dit oxydé (correspondant aux carbonates et oxydes de cuivre) et le cuivre total (correspondant à l'ensemble des minéraux cuprifères) constant égal à environ 0,6 (**Fig. 146**).

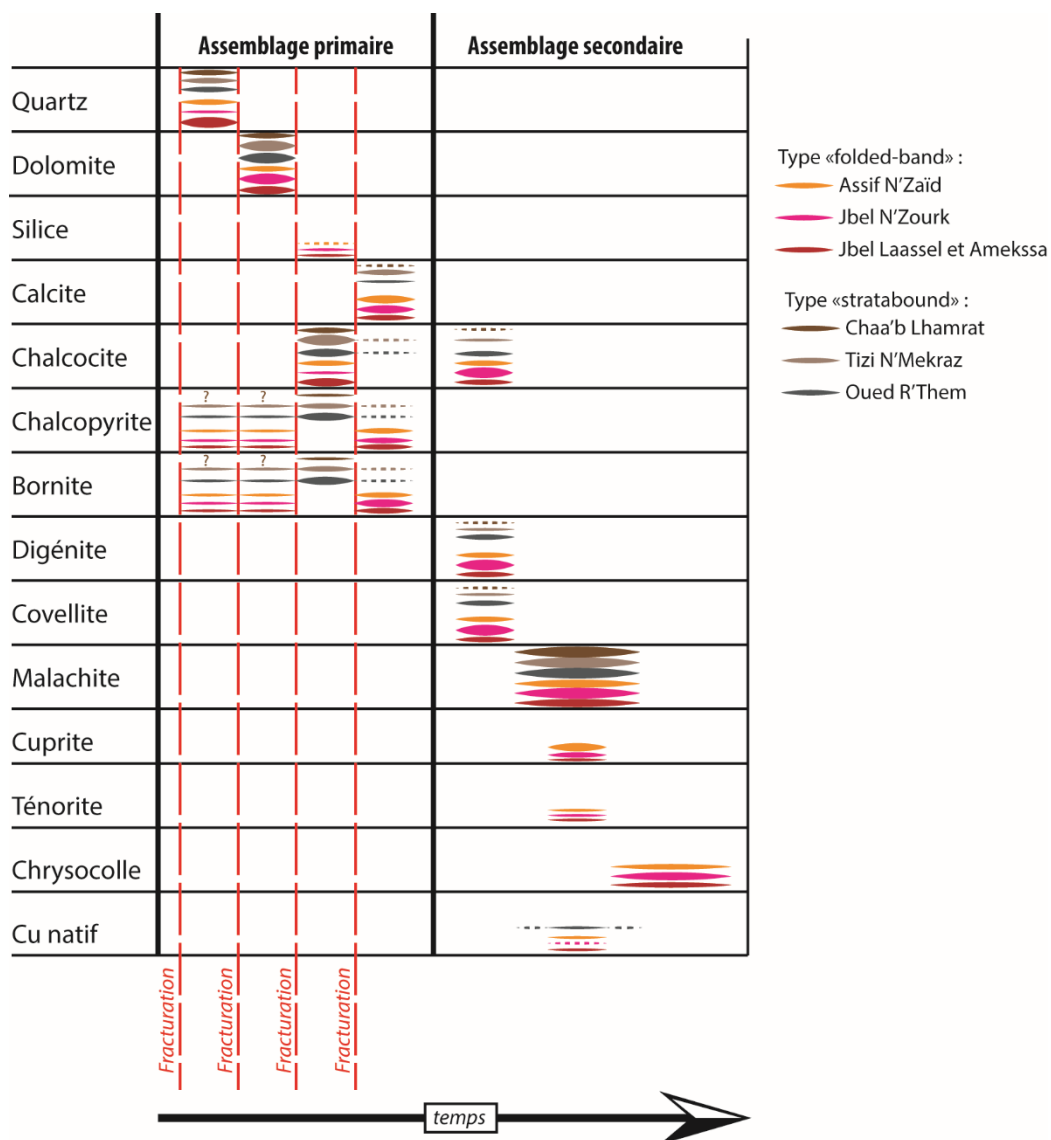


Figure 145 : Successions paragénétiques de l'ensemble des indices étudiés de la couverture.

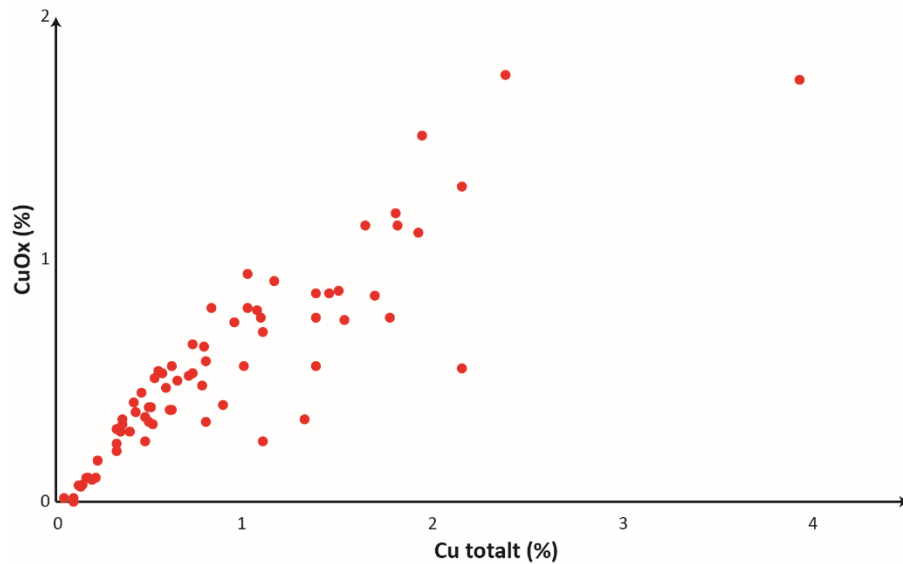


Figure 146 : Graphique présentant les teneurs en cuivre oxydés en fonction de celle en cuivre total pour l'ensemble des échantillons roche totales analysés du gisement de Jbel Laassel.

7.1.3. Une déformation en lien intime avec le stockwork cuprifère

La concentration des corps minéralisés dans les charnières anticlinales des « folded band » peut être expliquée par des zones d'ouverture de type « *saddle reef* » (**Fig. 147A**). En effet, des glissements banc sur banc, localisés au sein des niveaux moins compétents comme les siltites, ont été observés sur les flancs des anticlinaux ainsi que des zones d'ouvertures minéralisées dans les charnières (**Fig. 147B**). Ces observations vont dans le sens d'une origine synchrone de la minéralisation cuprifère de type « folded band » et de la formation des plis.

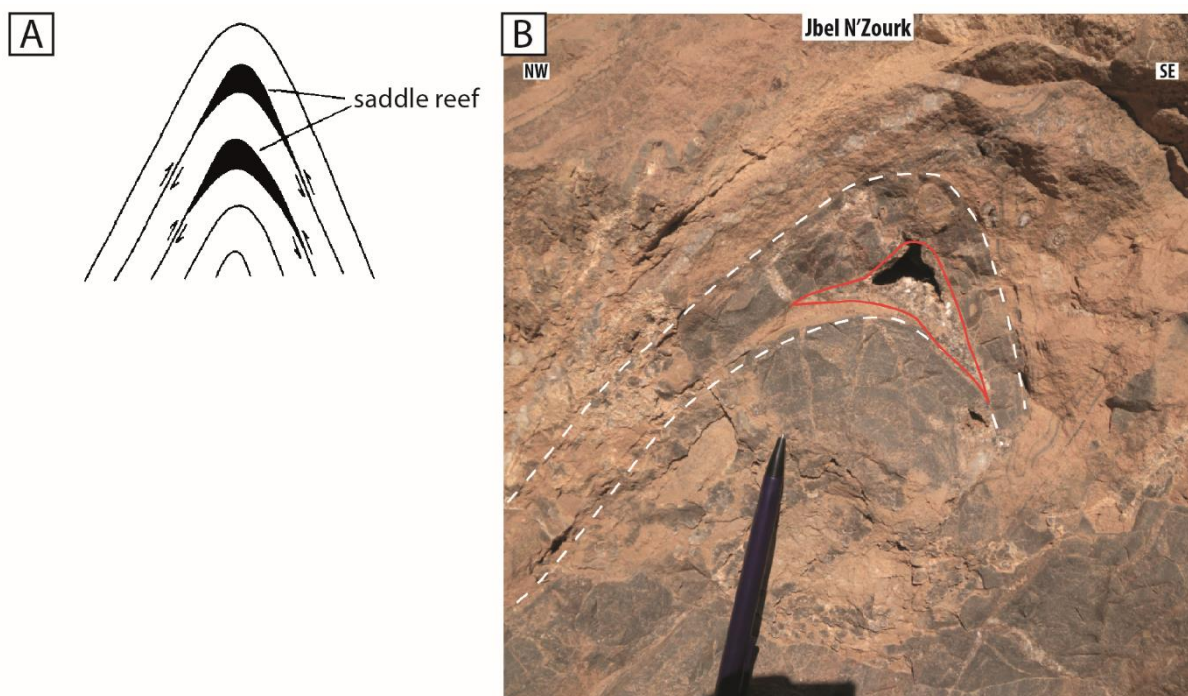


Figure 147 : A, Illustration schématique montrant la géométrie des « saddle reef » par glissement banc sur banc (Cox et al., 1991) ; B, Photographie d'une charnière de plis minéralisée en cuivre du gisement de Jbel N'Zourk.

L'étude des orientations de veines du stockwork a révélé les mêmes familles de direction de veines dans les deux types morphologiques (**Fig. 148A**). Pour le type « folded-band » deux familles directionnelles de veines dominant et ce, sur les trois indices étudiés :

- Jbel Lassel et Amekssa : les veines orientées dans la direction N160° à pendage vertical ou de 50° vers le SO et 70° vers le NE,
- Assif N'Zaïd : les veines orientées dans la direction N120° à pendage de 70° vers le SO et 80° vers le NE,
- Jbel N'Zourk : les veines orientées dans la direction N160° à pendage de 80° vers le SO et 75° vers le NE.

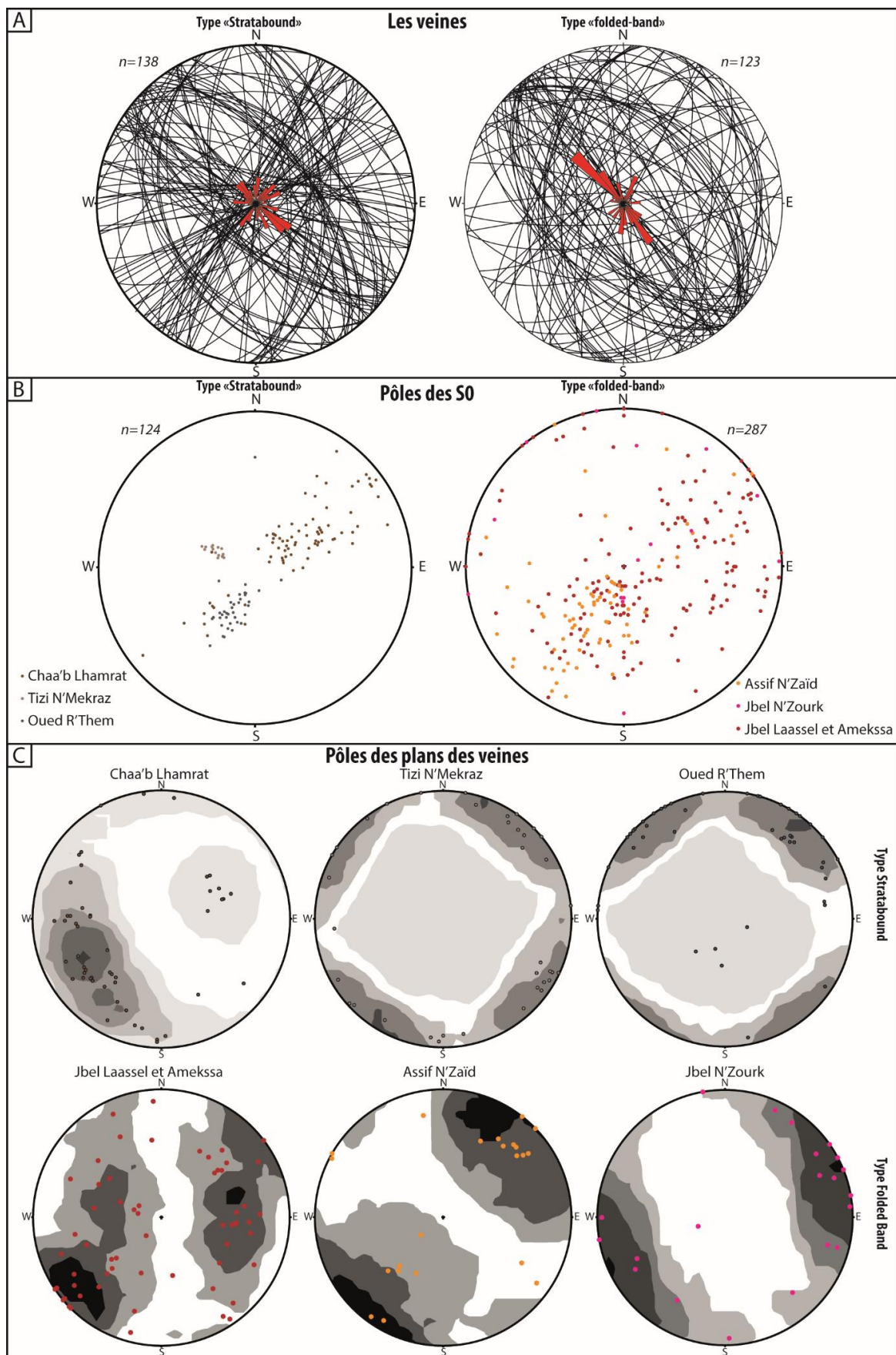


Figure 148 : Planche montrant les données d'orientations des veines des stockwork des différents sites étudiés dans la couverture. Les projections sont faites dans un canevas de Schmidt (hémisphère inférieur) à l'aide du logiciel Stereonet. A,

Projections de la trace des plans de veines de type stratabound et folded band avec la représentation en rosace de ces directions de veines (classe de 10°, 30 % des données sont représentées du centre à la périphérie du canevas) ; B, Projection des pôles des plans de la stratification S0 pour les deux types de minéralisation ; C, Projections des pôles des plans des veines et contours de densité de points en utilisant la méthode de Kamb (intermédiaire entre deux contours = 2 sigma avec un niveau de signifiante égal à 3 sigma).

La direction des veines est identique à celle des plis, ce qui est cohérent avec une mise en place en extrados de ces familles de veines (**Fig. 149**).

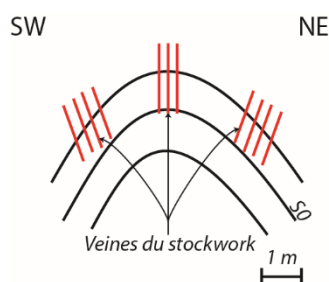


Figure 149 : Schéma de l'interprétation des veines du stockwork en extrados d'un pli de la « folded-band ».

Pour le niveau stratabound les familles de veines les mieux représentées sont différentes selon les indices :

- Oued R'Them : une famille de direction N127° et de pendage 70° vers le SO et une autre de direction N048° à pendage moyen de 80° vers le SE (**Fig. 148C**),
- Tizi N'Mekraz : les mêmes familles représentés qu'à Oued R'Them avec des pendages sub-verticaux (**Fig. 148C**),
- Chaa'b Lhamrat : une famille de veines très bien représentée de direction N150° à pendage 60° vers le NE et une autre de même direction, moins bien exprimée à pendage de 45° vers le SO (**Fig. 148C**).

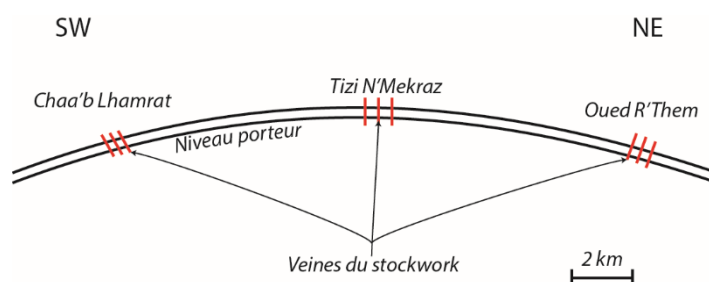


Figure 150 : Représentation schématique des veines du stockwork en extrados du pli formant la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Schéma de l'interprétation des veines du stockwork en extrados du pli formant la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

L'orientation de ces veines peut être justifiée par une mise en place extrados, à l'échelle du large anticlinal formant la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (**Fig. 150**). Effectivement, les indices minéralisés de Chaa'b Lhamrat, Tizi N'Mekraz et Oued R'Them se

répartissent respectivement sur le flanc SO, au centre et sur le flanc NE de la boutonnière. Les textures en extension observées sur les veines (quartz en peigne, brèches cocardes) sont cohérentes avec ce type de mise en place.

Toutefois, les veines orientées dans le direction N025-N060°, perpendiculaires aux veines d'extrados et à l'axe du plissement ont également été observées au cours de ces travaux et auparavant décrites et modélisées par Florez-Nino et al., (2005). D'après ces auteurs, l'orientation globale de ces veines (NNE-NE) est cohérente avec la formation de failles et microfailles perpendiculaires à l'axe de plis, avant et pendant la formation de ce dernier (**Fig. 151**).

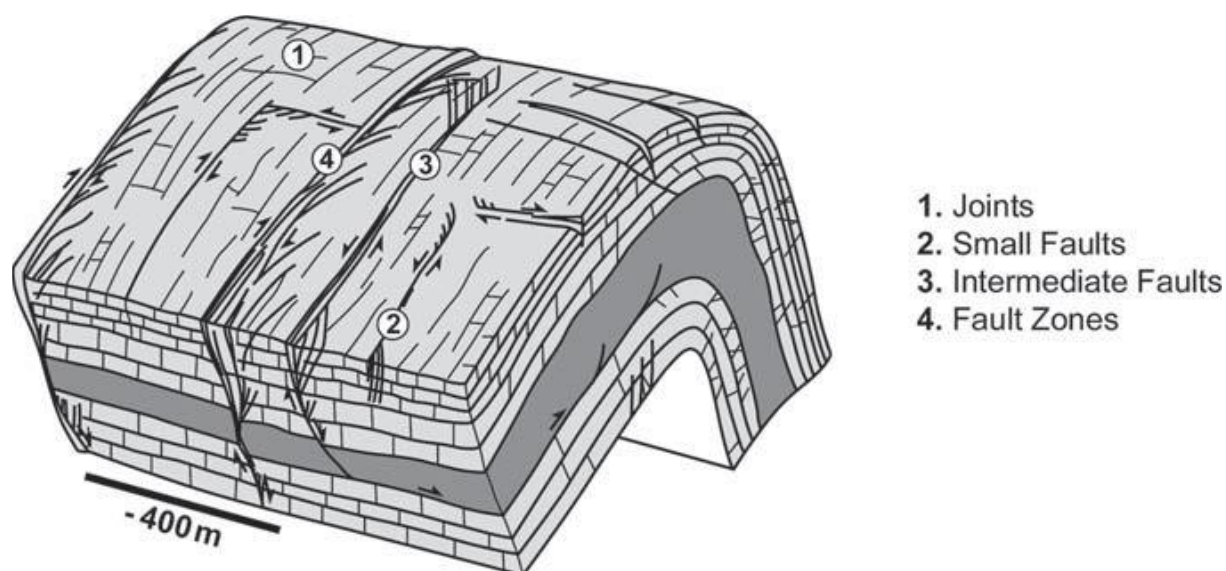


Figure 151 : Modèle conceptuel du système de failles et de fractures au sein de plis (Lacombe et al., 2007 d'après Florez-Niño et al., 2005).

D'après l'ensemble de ces observations, la mise en place de la minéralisation (sous forme de veine) semble synchrone de la déformation à l'origine des plis qui constituent à la fois la « folded-band » ou du grand anticlinal formant la boutonnière.

Evans et Fischer, (2012) ont réalisé plusieurs modèles conceptuels de circulation de fluides lors de la formation de plis (**Fig. 152**). Concernant les circulations fluides lors du plissement de la « folded-band », la localisation dans les charnières des corps minéralisés, les veines du stockwork en extrados et le fait que ces veines soient sécantes sur les lithologies suggèrent un modèle de type « compartimentation structural » (**Fig. 152d**) (Evans and Fischer, 2012). Cependant, les textures de type brèche hydraulique et l'intense connectivité du

stockwork à petite échelle suggèrent que le modèle de type « chasse d'eau » ou « flushing fluids » (Evans and Fischer, 2012) peut localement s'appliquer (**Fig. 152e**).

La minéralisation de type stratabound et la morphologie des corps au sein du niveau porteur sont caractéristiques d'un modèle de circulation fluide de type « stratifié » (Evans and Fischer, 2012), impliquant un niveau stratigraphique de haute perméabilité (**Fig. 152b**). La brèche de base pourrait être associée à un plan de faille qui aurait pu également favoriser les circulations des fluides au sein du niveau stratabound. Des textures de brèche hydraulique ont également été observées mais elles ne recoupaient pas les niveaux sus- et sous-jacents.

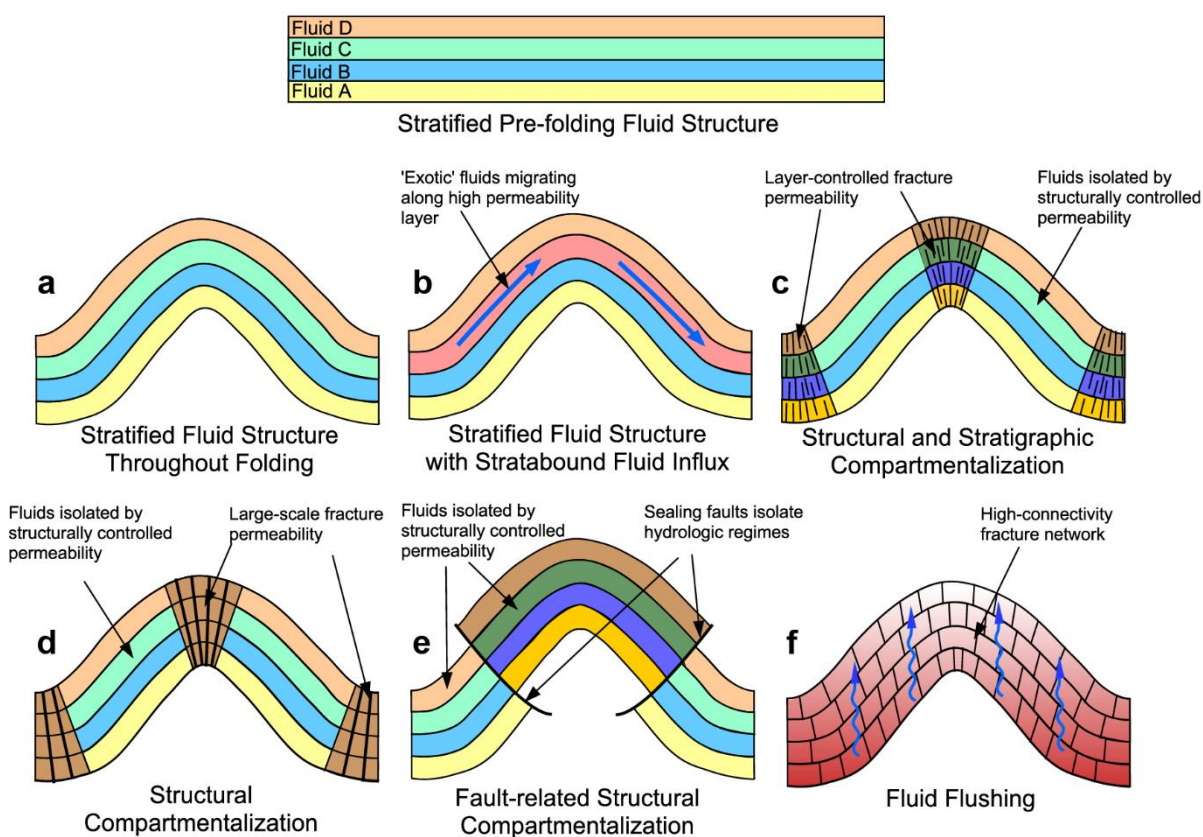


Figure 152 : Modèles conceptuels de distribution des fluides dans les plis (Evans and Fischer, 2012). (a) distribution stratifiée des fluides, la distribution de ces fluides (A-D) reste inchangée durant le plissement ; (b) Les fluides fluent le long d'un niveau stratigraphique de haute perméabilité ; (c) Compartimentation structurale et stratigraphique des fluides résultant de la localisation de la fracturation, les couleurs sombres indiquent une modification de la chimie des fluides durant le plissement ; (d) compartimentation structurale des fluides dans les charnières indépendante de la nature des niveaux stratigraphiques ; (e) compartimentation structurale des fluides par des failles où ils évoluent séparément (couleurs foncées) ; « effet chasse d'eau » (« flushing fluids ») associés au développement d'une importante fabrique de fracturation connectée.

Les failles d'extension plurikilométrique, associées aux plis de type « folded-band », montrent également au niveau des zones de brèche, un lien intime avec le développement du stockwork. Ceci implique sans doute que le flux de fluides minéralisateurs précède leur

piégeage dans les zones plissées. Au niveau de l'indice de Chaa'b Lhamrat, l'une de ces failles associée à la folded band a été décrite et cartographiée comme spatialement associée à une teneur en cuivre élevée et donc, au stockwork. Par conséquent, ces failles ont très certainement joué le même rôle de chemins d'alimentation en fluides des deux types de minéralisation, comme cela peut être suggérer sur une coupe passant par les sites de Oued R'Them et Assif N'Zaïd (**Fig. 153**)

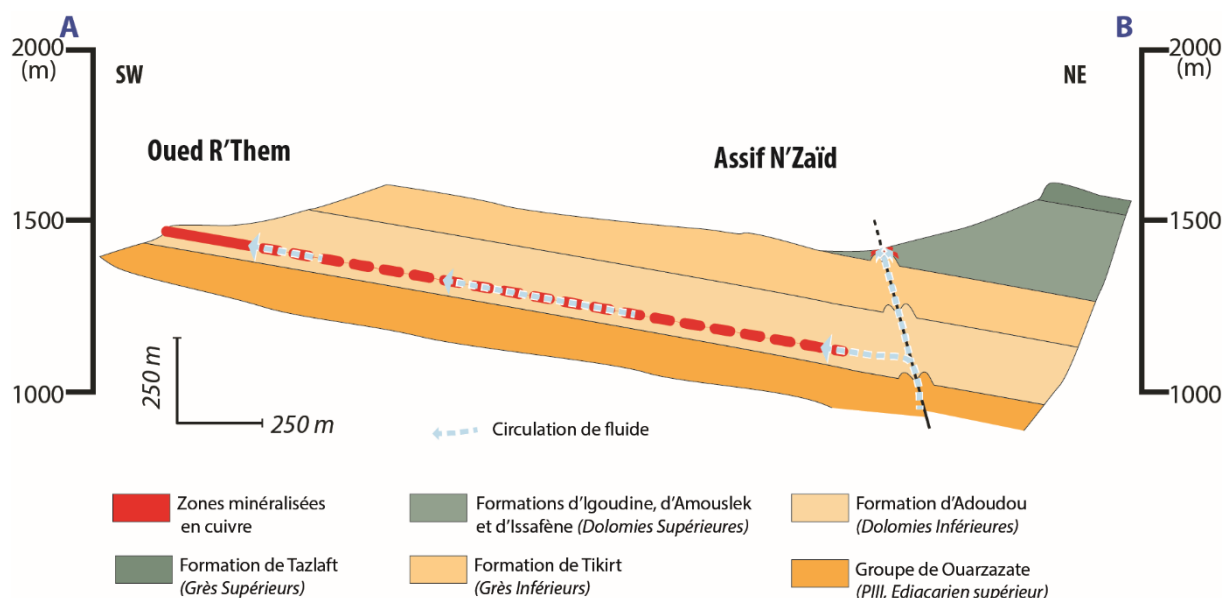


Figure 153 : Coupe passant par les indices de Oued R'Them et Assif N'Zaïd illustrant zones potentielle de circulation des fluides à l'origine des minéralisations cuprifères.

7.1.4. Apport de la géochimie roche totale sur la conception d'un modèle de genèse

D'après les résultats des analyses en composante principale réalisées à partir des données roche totale, le cuivre ne présente pas d'affinité avec les autres éléments pris en compte et ce, dans les deux types de minéralisations.

De plus, d'après l'analyse des bases de données du type « folded-band » le cuivre n'a pas d'affinité avec les lithologies de l'encaissant (siltites, dolomies ou laves). De ce fait, les associations entre les éléments (en citer quelques-unes) révélées par ACP, correspondent essentiellement à des liens génétiques associés à l'histoire de la roche encaissante et non à la genèse de la minéralisation cuprifère. Enfin, la géochimie roche totale a confirmé l'absence de métaux de base (Pb et Zn) supplémentaires.

D'après les profils litho-géochimiques réalisés sur le types stratabound, le cuivre n'est pas réparti de manière homogène à l'échelle du niveau porteur, ni verticalement, ni latéralement au sein des différents indices (Oued R'Them et autres). Les ACP réalisées incluant les teneurs en cuivre oxydé ont révélé que celui-ci était associé au cuivre total comme l'étude minéralogique associée l'a démontrée.

7.1.5. Etudes des inclusions fluides des gangues silico-carbonatées

Au sein des deux types de minéralisations, les mêmes typologies d'inclusions fluides ont été observées. Il s'agit d'inclusions fluides secondaires recoupant le quartz et les dolomites de la gangue du stockwork. Cependant, les images réalisées en cathodoluminescence ont montré que ces fractures présentent un lien intime avec la minéralisation sulfurée primaire, du stade de fracturation à chalcocite hexagonale (**Fig. 129E, F et 130**). En effet, la luminescence rouge-orangée de ces fractures riches en inclusions fluides a permis de mettre en évidence des textures de terminaison en cracks radiaux au niveau des sulfures des veines. Une auréole de contact de même couleur de luminescence est également observée en halo dans la dolomite, autour de ces sulfures de cuivre. Ces fractures, riches en inclusions fluides viennent se connecter à ce halo. Par conséquent, nous interprétons ces fluides comme étant associés à la précipitation de ces sulfures de cuivre primaires. Ces fluides sont composés de deux familles présentes sur les deux sites étudiés au sein des mêmes fractures : i) une famille à phase liquide + vapeur + cube de halite (type S) et ii) une famille à solide + liquide (type L). Concernant l'indice de Oued R'Them, la température d'homogénéisation (T_h) moyenne du type L est de 245°C pour des salinités allant de 15 à 22 % wt. eq. NaCl + CaCl₂ et pour le type S une T_h moyenne de 205°C pour des salinités allant de 30 à 36 % wt. eq. NaCl + CaCl₂ pour le type S. Pour le gisement de Jbel Laassel la température T_h moyenne du type L est de 137°C pour des salinités allant de 15 à 20 % wt. eq. NaCl + CaCl₂ et pour le type S une T_h de 157°C pour une salinité 36 % wt. eq. NaCl + CaCl₂ pour le type S. Les pressions minimales de piégeage ont été calculées à partir de 3 inclusions fluides de type S s'homogénéisant par fusion du cube de halite d'après la méthode de Becker et al., (2008). Ces pressions minimales indiquent une profondeur de piégeage minimale de 100 MPa pour le type stratabound et de 184 MPa pour le type « folded band » ce qui correspondrait pour cette dernière approximativement à l'épaisseur de la colonne stratigraphique complète de la couverture néoprotérozoïque à Carbonifère de l'Anti-Atlas Central.

Ces saumures à $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ ont déjà été décrites dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara au sein du gisement de Co-As de Bou Azzer (En-Naciri et al., 1997; Essarraj et al., 2005a) et de Aït Ahmane (En-Naciri et al., 1997) ainsi que dans d'autres gisements de l'Anti Atlas : Imiter (Hulin, 2013; Essarraj et al., 2016) et Zgounder (Essarraj et al., 1998). Dans le gisement d'or de Far West, des saumures à $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ sont signalées (Barakat et al., 2002). L'ensemble de ces inclusions fluides sont décrites comme synchrones à postérieures des minéraux de gangue du minéral hôte de la substance économique de ces gisements du socle Protérozoïque (En-Naciri et al., 1997; Essarraj et al., 1998; Barakat et al., 2002; Essarraj et al., 2005b; Hulin, 2013; Essarraj et al., 2016). De plus, la composition en sel de ces inclusions recoupe ou se superpose aux compositions des fluides décrites dans ce manuscrit. L'ensemble des données de ces gisements associés aux données de cette étude dessinent une droite de mélange entre un pôle riche en sel, au niveau des inclusions de type S, et un autre pauvre en sel, au niveau des inclusions de type L (**Fig. 154**).

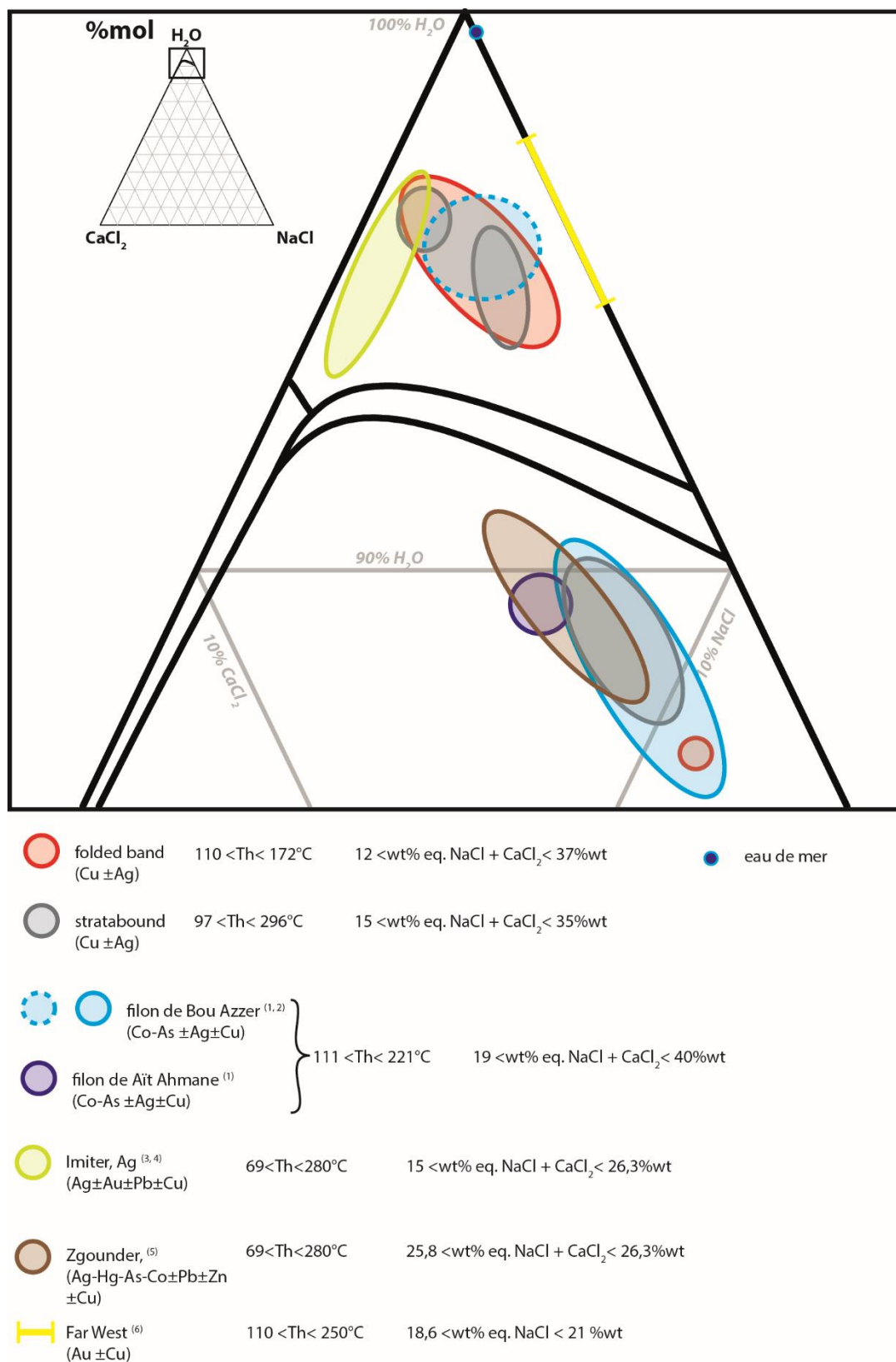


Figure 154 : Diagramme ternaire H₂O-NaCl-CaCl₂ en pourcentage molaire montrant les données d'inclusions fluides à NaCl-CaCl₂-H₂O de cette étude de la bibliographie dans des échantillons provenant de Bou Azzer, d'Aït Ahman et d'Imiter. Références : (1) En-Naciri et al., 1997, (2) (Essarraj et al., 2005a), (3) (Hulin, 2013), (4) (Essarraj et al., 2016), (5) (Essarraj et al., 1998) (6) (Barakat et al., 2002).

7.3. DES MINÉRALISATIONS DU SOCLE TARDI- A POST-COMPRESSION PANAFRICAIN

Deux types de minéralisations ont été décrits dans le socle Protérozoïque. Dans les deux cas, les minéralisations cuprifères sont associées à des failles cassantes, sécantes sur les structures Panafricaines. Pour le type Bleida, ces failles sont de direction N070° à jeux apparents senestres. La minéralisation est composée de bornite, chalcopryrite et pyrite épigénétique en remplacement de niveaux pyriteux syngénétiques (Leblanc and Arnold, 1994; Maacha, 2013) (type nord) ou sous la forme de stockwork au sein de schistes noirs (Type sud) comme cela a été auparavant décrit par Maacha, (2013) (**Fig. 155A**). Le deuxième type de minéralisation est présent au niveau de bandes plissées et faillées de direction N110° à N130°, sous la forme de lentilles de même direction sécantes sur la schistosité S1 panafricaine. Ces lentilles sont associées à des failles fragiles jouant en jeux décrochants senestres ou dextres. La minéralisation cuprifère s'exprime sous la forme de sulfures de cuivre associés à une altération silico-carbonatée de l'encaissant formant ces lentilles plus ou moins massives connectées à un stockwork recoupant l'ensemble des structures Panafricaines de l'encaissant (**Fig. 155B**). Dans les deux types de minéralisations, la minéralisation observée est composée uniquement de sulfures de cuivre ou de fer. Maacha (2013) suggère que ces deux minéralisations sont synchrones d'une déformation cassante tardi-Panafricaine. L'auteur connecte ces deux types de minéralisations en présentant le type associé aux failles de direction N110 à 130° comme une zone de rejeux des structures ductiles Panafricaines. Ces failles constitueraient une zone d'alimentation de fluides riches en cuivre circulant ensuite au sein des faille N070° et précipitant des sulfures de cuivre le long de ces failles. Ce modèle sera discuté dans la partie synthèse des minéralisations de la boutonnière.

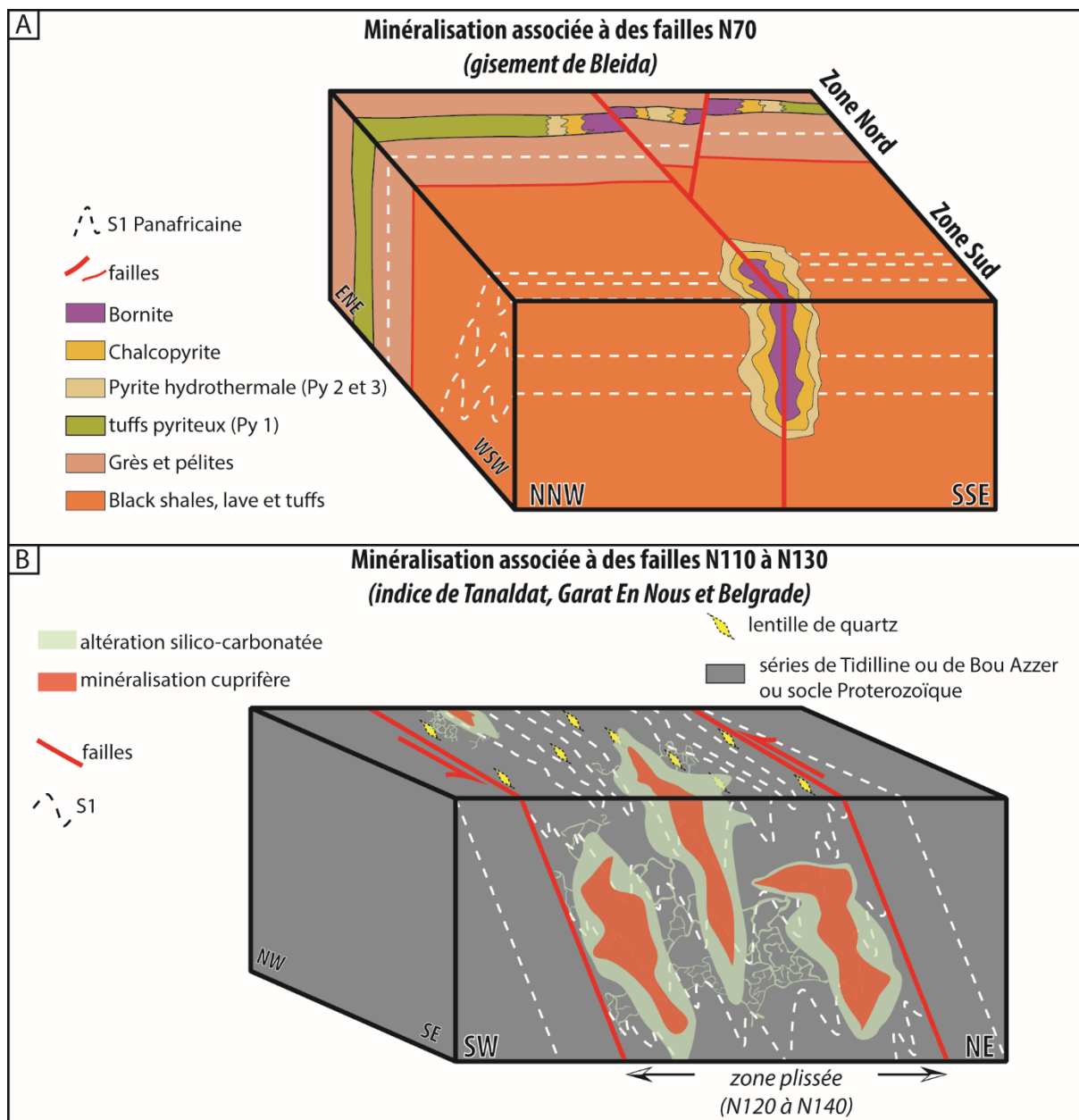


Figure 155 : A, bloc 3D schématique des minéralisations de type Bleida (modifié d'après Maacha, 2013) ; B, bloc 3D schématique des minéralisations associées aux failles de direction N110 à N140°.

7.4. PLACE DE LA DEFORMATION OBSERVEE DANS LA BOUTONNIERE DE BOU AZZER-EL GRAARA DANS L'EVOLUTION STRUCTURALE DE L'ANTI-ATLAS

Au sein de la couverture Néoprotérozoïque à Cambrienne de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, deux directions de failles, chevauchements et de plissements sont omniprésentes : NE-SO et NO-SE° (**Fig. 157**). Ces directions sont également décrites sur

l'ensemble de l'Anti-Atlas (**Fig. 156**) (Soulaïmani et al., 1997; Caritg et al., 2004; Helg et al., 2004; Hoepffner et al., 2005; Burkhard et al., 2006; A. Michard et al., 2008; Soulaïmani and Burkhard, 2008; Soulaïmani et al., 2014). Cependant, les structures NO-SE sont présentes essentiellement à proximité des boutonnières Précambriennes (Soulaïmani et al., 1997; A. Michard et al., 2008; Soulaïmani et al., 2014). Ces structures plissées et faillées NO-SE de cette couverture sont interprétées comme des déformations varisques liées à des rejeux de structures héritées Panafricaines du socle Précambrien (Soulaïmani et al., 1997; Caritg et al., 2004; Helg et al., 2004; Hoepffner et al., 2005; Burkhard et al., 2006; Michard et al., 2008; Soulaïmani and Burkhard, 2008; Soulaïmani et al., 2014). Les rejeux des failles du socle sont cohérents avec les données de traces de fission au sein de zircons du socle donnant des âges compris entre 340 et 314 Ma (**Fig. 158**) (Malusà et al., 2007; Sebtì et al., 2009; Ruiz et al., 2011; Oukassou et al., 2013). Une deuxième période de rejeux a été estimée d'après les traces de fission sur apatite donnant des âges compris entre 168 et 133 Ma (**Fig. 158**) (Malusà et al., 2007; Sebtì et al., 2009; Ruiz et al., 2011; Oukassou et al., 2013). Toutefois, les déformations NE-SO et NO-SE sont clairement recoupées et décalées par le dyke de Fom Zguid (**Fig. 49 et 53**) daté à 200 Ma (Ar/Ar sur plagioclases) (Leblanc, 1973; Sebai et al., 1991). Ces structures seraient donc liées à la compression Varisque. L'influence des structures Panafricaines s'observent notamment par l'orientation globale NO-SE de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, acquise durant la phase compressive Varisque, parallèle à l'accident majeur de l'Anti-Atlas d'origine Panafricaine (**Fig. 156**).

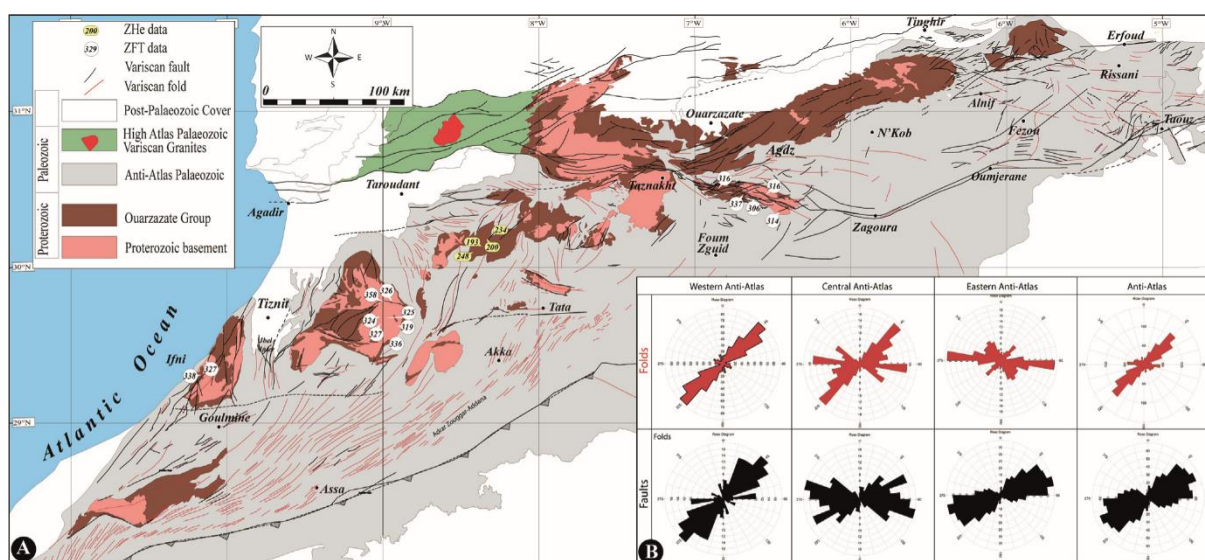


Figure 156 : A, Carte structurale du domaine Varisque de l'Anti-Atlas (Soulaïmani et al., 2014) ; B, Diagrammes en rose des failles (en noir) et des plis (en rouge) de l'Anti-Atlas occidental, central, oriental et de l'ensemble de l'Anti-Atlas (Soulaïmani et al., 2014).

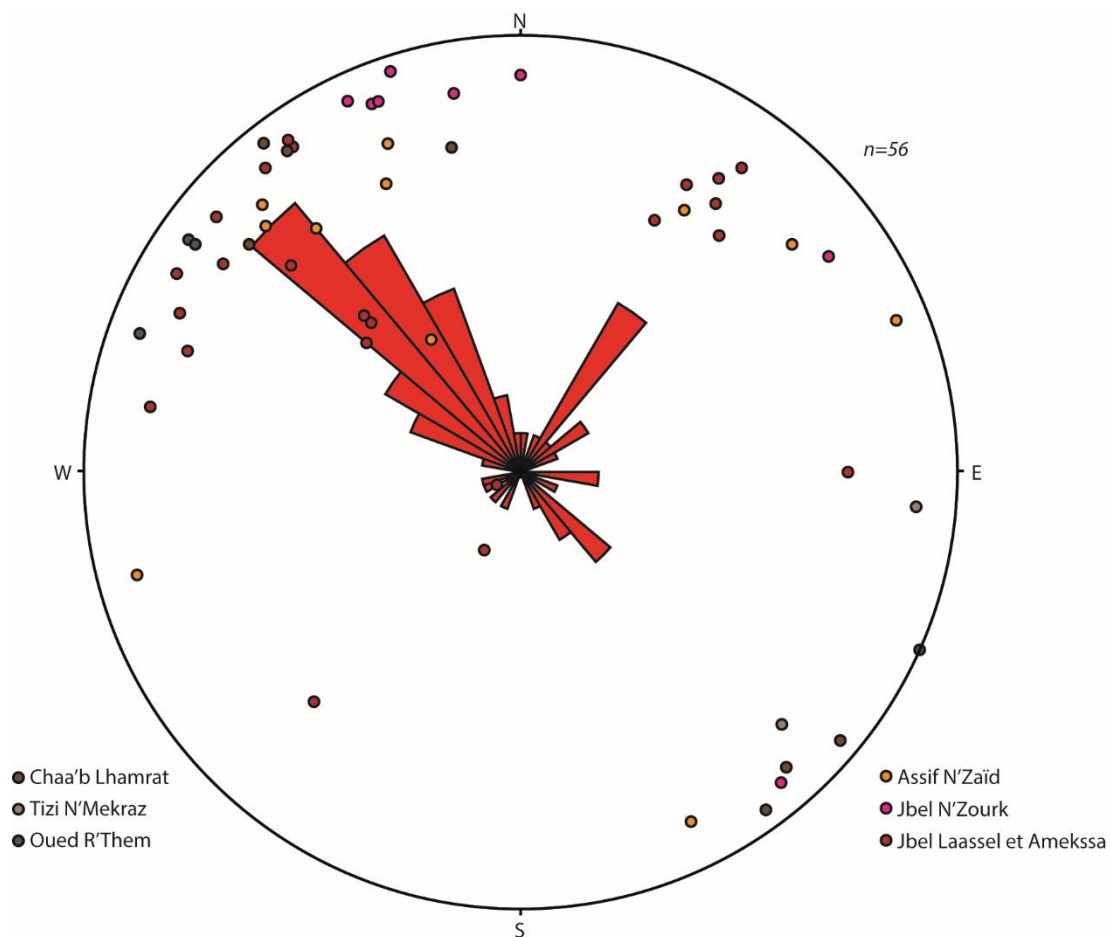


Figure 157 : Projection dans un canevas de Schmidt (hémisphère inférieur) des pôles des axes de plis mesurés sur l'ensemble des indices minéralisés avec la représentation en rosace des directions de ces axes (classe de 10°, 20% des données sont représentées du centre jusqu'au périmètre du canevas).

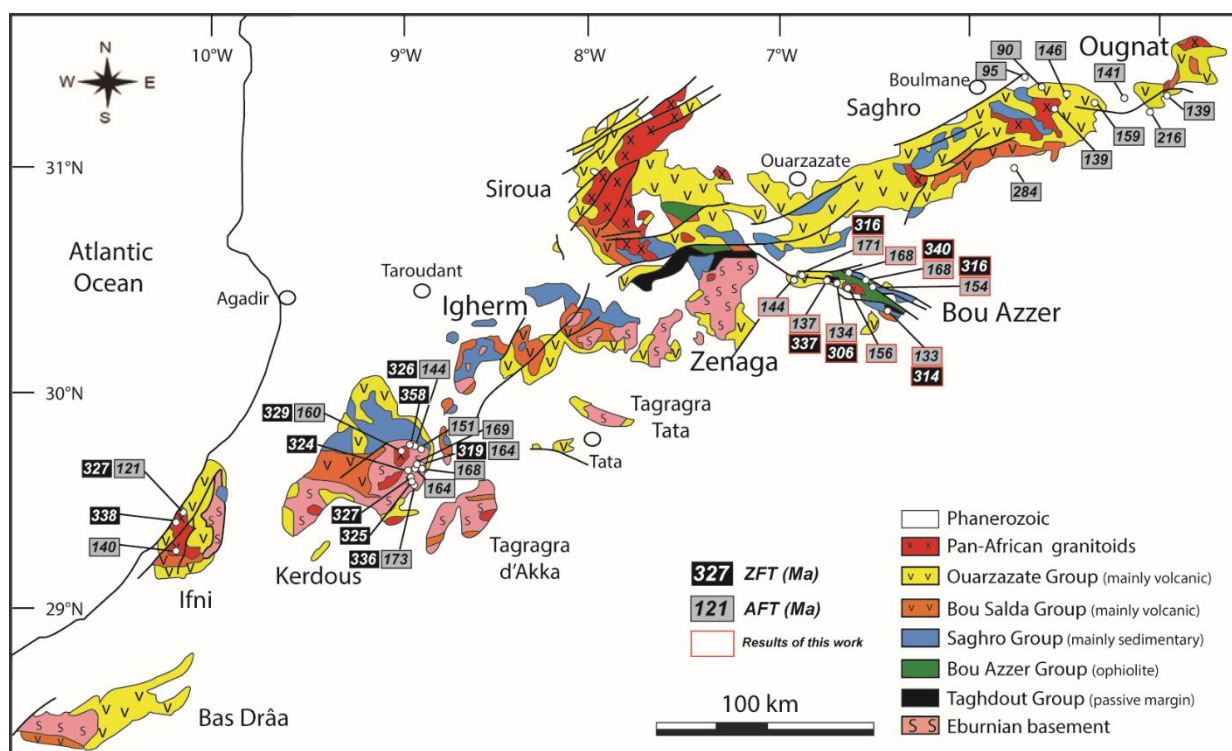


Figure 158 : Carte géologique de l'Anti-Atlas (Thomas et al., 2004) synthétisant les données de traces de fission sur zircon (ZFT) et sur apatite (AFT) (Oukassou et al., 2013). Les données de l'Anti-Atlas occidental proviennent de Sebti et al., (2009) et Ruiz et al., (2011), celles de l'Anti-Atlas oriental proviennent de Malusà et al., (2007) et celles de l'Anti-Atlas Central de Sebti et al., (2009).

Caritg et al. (2004) ont mis en évidence un premier système de contraintes compressives avec un sigma 1 orienté NO-SE suivi d'une rotation légère des contraintes avec un sigma 1 orientée N-S, lors de cette compression Varisque dans l'Anti-Atlas occidental. D'après nos données prélevées sur les failles striées du gisement de Jbel Laassel, un seul système de contraintes NO-SE inclut la totalité des structures NE-SO et NO-SE. Effectivement, au niveau du gisement de Jbel Laassel une structure chevauchante NE-SO recoupe les structures NO-SE. Les niveaux de décollement, à l'origine des structures NE-SO, recoupent également les structures NO-SE du gisement de Jbel N'Zourk. Cependant, comme cela a été proposé en Iran par Lacombe et al. (2007), ces structures orthogonales peuvent se développer dans un même système de contraintes en association avec des rejeux de failles de socle (**Fig. 159**). Pour la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, le modèle proposé est le suivant :

- Dans un premier temps, les failles du socle rejouent et induisent les structures NO-SE dans la couverture (notamment les « folded-band ») mal orientées par rapport à la contrainte sigma 1,
- Dans un second temps, cette première accommodation de la déformation ne suffit plus et la déformation s'effectue par le biais des décollements et des chevauchements NE-SO.

Ce modèle devra évidemment être étayé par une étude structurale plus approfondie mais celui-ci est toutefois cohérent avec les observations de terrain réalisées dans le temps imparti de cette thèse.

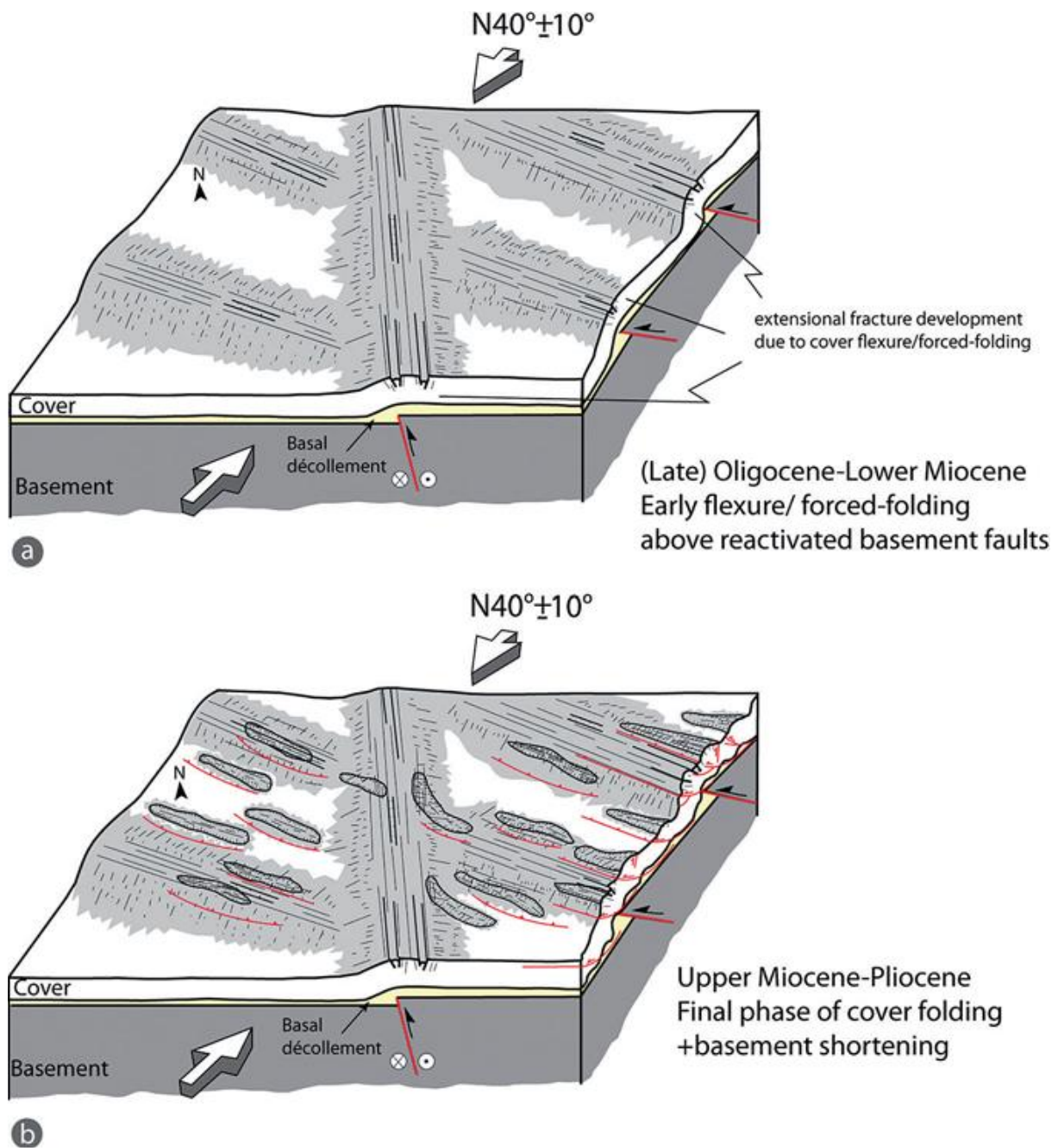


Figure 159 : Modèle de développement de fractures et de plis dans la couverture dans le Zagros Central (Iran) liés à la réactivation de failles du socle (Lacombe et al., 2007).

7.5. VERS UN MODELE DE GENESE COMMUN A L'ECHELLE DE LA BOUTONNIERE

Les minéralisations de types « stratabound » et « folded band » présentent les mêmes caractéristiques indépendamment de leur morphologie :

- une texture en stockwork auto-similaire à toutes les échelles d'observation, sécante sur les structures sédimentaires de l'encaissant,
- une histoire minéralogique identique avec les mêmes phases de fracturation entre les différentes générations de minéraux et une même minéralogie de sulfures exclusivement cuprifères,
- une orientation des veines du stockwork induisant une mise en place en extrados d'anticlinaux d'orientation NO-SE,
- aucune affinité entre le cuivre et un autre élément analysé dans les bases de données roche totale,
- des inclusions fluides situées dans le même type de fractures, de composition $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, avec des salinités de même ordre et de type saumure.

L'ensemble de ces éléments reflète le caractère épigénétique et synchrone de ces deux types de minéralisations à l'échelle de la boutonnière. Le fait que ces minéralisations soient encaissées dans la formation d'Adoudou et dans celles d'Igoudine, d'Issafène et d'Amouslek suggère une circulation de fluides au sein de la couverture. Par ailleurs, la période de plissement associée à ces minéralisations a déjà été discutée et est associée à la compression Varisque. Par conséquent, ces minéralisations sont également Varisques. Le lien entre les déformations de la couverture et les structures du socle héritées de l'orogénèse Panafricaine a également été discuté. Il en résulte un rejeu des failles du socle lors de la mise en place de ces minéralisations. Les saumures associées à la minéralisation cuprifères, sont également présentes dans les structures minéralisées NO-SE et NE-SO de Bou Azzer et de Aït Ahmane (En-Naciri et al., 1997; Essarraj et al., 2005b). Ceci signifie que les mêmes fluides ont dû circuler du socle vers la couverture, notamment par ces failles passant du socle dans la couverture (**Fig. 160**). Cet évènement hydrothermal varisque dans le socle est appuyé avec un âge Sm/Nd sur carbonate à 308 ± 31 Ma et un âge (u-Pb) sur brannerite à 310 ± 5 Ma d'échantillon provenant d'un filon à Co-As de la mine de Bou Azzer (Oberthür et al., 2009). Les minéralisations observées dans le socle et décrites comme associées à un évènement cassant tardi-panafricain par Maacha, (2013) présentent des similarités avec celle de la couverture :

- une minéralogie composée uniquement de sulfures de cuivre, de quartz et de carbonates,
- un lien avec des failles cassantes NO-SE et NE-SO recoupant les structures panafricaines,

- une même texture en stockwork sécante sur la schistosité S1 Panafricaine,

De plus, des bandes plissées et faillées, orientées NO-SE, sont présentes au niveau des zones minéralisées NO-SE du socle rappelant les « folded-band » de la couverture. Par conséquent, nous proposons un modèle de genèse potentiellement commun à l'ensemble des minéralisations cuprifères étudiées à l'échelle de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (**Fig. 160**).

Concernant l'origine des fluides cuprifères, Maacha (2013) évoque un lessivage des roches basiques de l'ophiolite de Bou Azzer pour expliquer la minéralisation de Bleida. Étant donné que nous proposons un modèle commun des minéralisations du cuivre à l'échelle de la boutonnière, cette hypothèse de lessivage du complexe ophiolitique comme origine du cuivre paraît cohérente. Cependant, des poches de saumures anciennes ont été trouvées dans tous les vieux socles archéens, Canada et dans le bouclier fennoscandien par exemple (Frape et al., 1984; Nurmi et al., 1988). Or la boutonnière de Bou Azzer-El Graara est située sur l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas qui est reconnu comme la limite en profondeur du craton archéen ouest africain (Fabre, 2005; Liégeois et al., 2005; Soulaïmani et al., 2006b; Ennih and Liégeois, 2008). On propose que des saumures anciennes aient été stockées, en profondeur, dans le socle de l'Anti-Atlas et mobilisées lors de la compression varisque, et expulsées dans la couverture (**Fig. 160**).

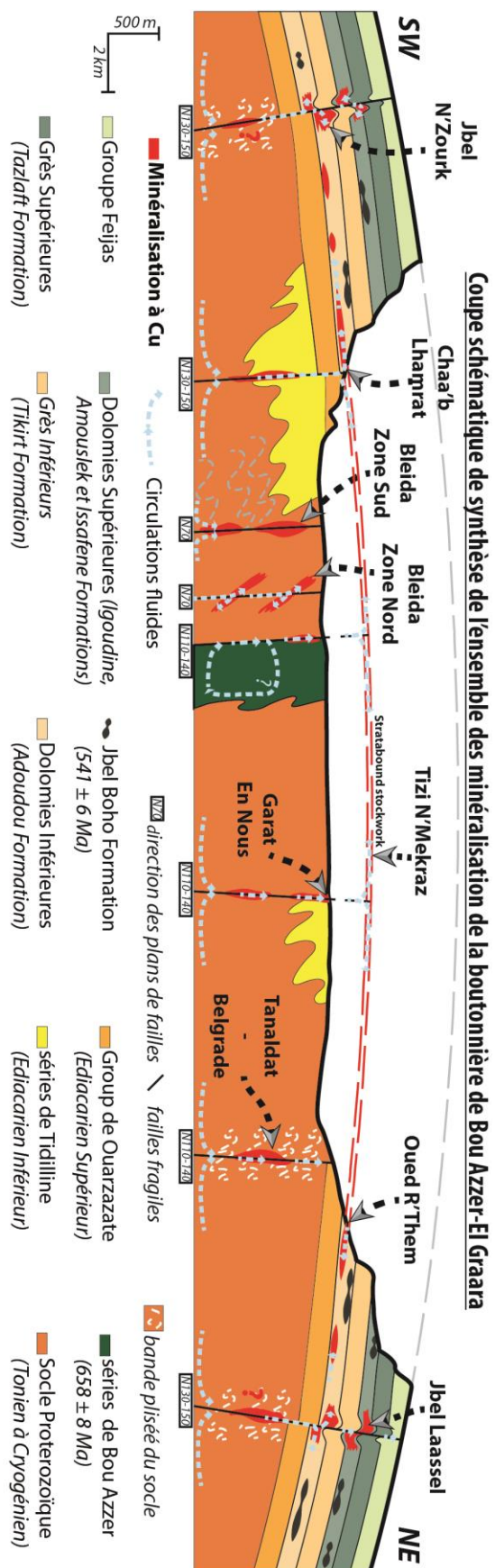


Figure 160 : Coupe schématique présentant l'ensemble des minéralisations de la boutonnière de Bou-Azzer-El Graara et les circulations fluides associées proposées.

7.6. COMPARAISON AUX GISEMENTS DE CUIVRE DANS LE MONDE

Les caractéristiques principales des modèles de gisement de cuivre encaissés dans des roches sédimentaires ont été synthétisées sous forme de tableaux avec : (i) en vert, les points communs entre ces modèles et les minéralisations de la couverture de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara ; (ii) en rouge, les divergences (**tableau 8 à 11**). Il en résulte que les minéralisations présentées dans ce manuscrit ne semblent pas correspondre clairement à aucun modèle de ce type.

- Pour l'analogie avec les Kupferschiefer (**Tab. 8**), il manque des zonations verticales et latérales des sulfures ; il existe aussi des différences de paragenèse (**Tab. 8, Fig. 161**).

Tableau 8 : Principales caractéristiques des gisements de type Kupferschiefer (Vaughan et al., 1989).

Kupferschiefer Cu, Ag, Pb, Zn, Ba, (Co, Ni, As)	
Minéralogie	pyrite, bornite, chalcopryrite, chalcocite, galène, sphalérite, anhydrite, gypse
Textures	zonations verticales et latérales entre les sulfures de Cu, Pb et Zn
	zonation au sein des sulfures de cuivre
	front oxydo-réducteur
	pyrite framboïdale
roches encaissantes	dolomies, grès shales noirs, calcaires
contexte géologique	bassin sédimentaire en climat aride à semi-aride (présence d'évaporite), tansgression marine rapide
relation avec la stratification	stratabound

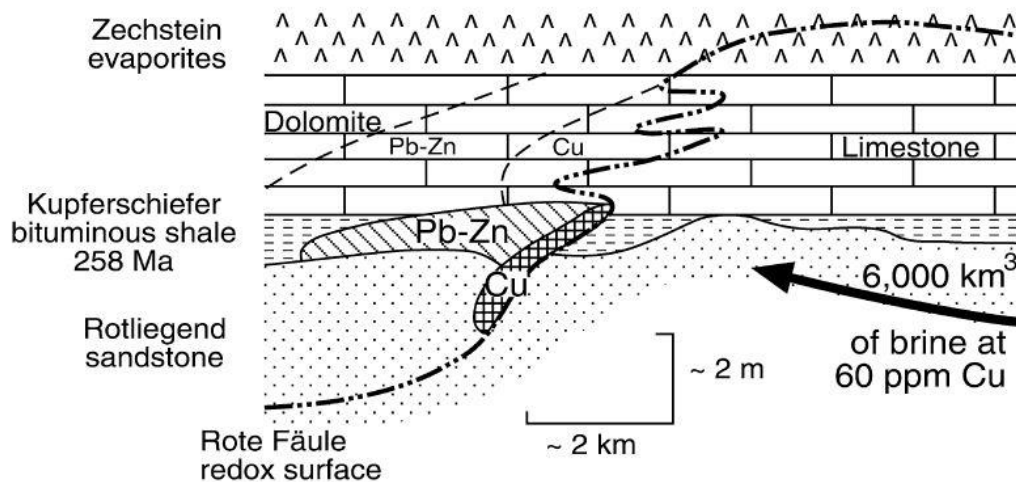


Figure 161 : Modèle de zonation des sulfures de cuivre au sein d'une minéralisation de type Kupferschiefer (Vaughan et al., 1989)

- Gisements MVT. Les analogies possibles sont un encaissant carbonaté (cas des minéralisations ‘stratabound’) et le lien avec des fluides de type ‘saumures de bassin’. En revanche, les principales différences sont le manque de sulfures de Pb, Zn ainsi que l’absence de textures paléo-karstiques et de brèche de dissolution (Tab. 9 et Fig. 162)

Tableau 9 : Principales caractéristiques des gisements de type MVT (Anderson and Macqueen, 1982; Garven, 1985; Ohle, 1985; Guilbert and Park, 1986)

MVT Zn, Pb, (Cu), ±Ag	
Minéralogie	galène, sphalérite, pyrite, marcasite, fluorine, barytine, chalcopryrite, dolomite, calcite, quartz
Textures	sulfures massifs ou disséminés
	sphalérite colomorphes
	concordant ou discordant avec la stratification
	stratoïde, "filon"
	structure de dissolution
roches encaissantes	calcaires dolomitisés, brèche de dissolution et d'effondrement, paléo-karst
contexte géologique	bassin sédimentaire en extension sans manifestation magmatique
relation avec la stratification	stratabound

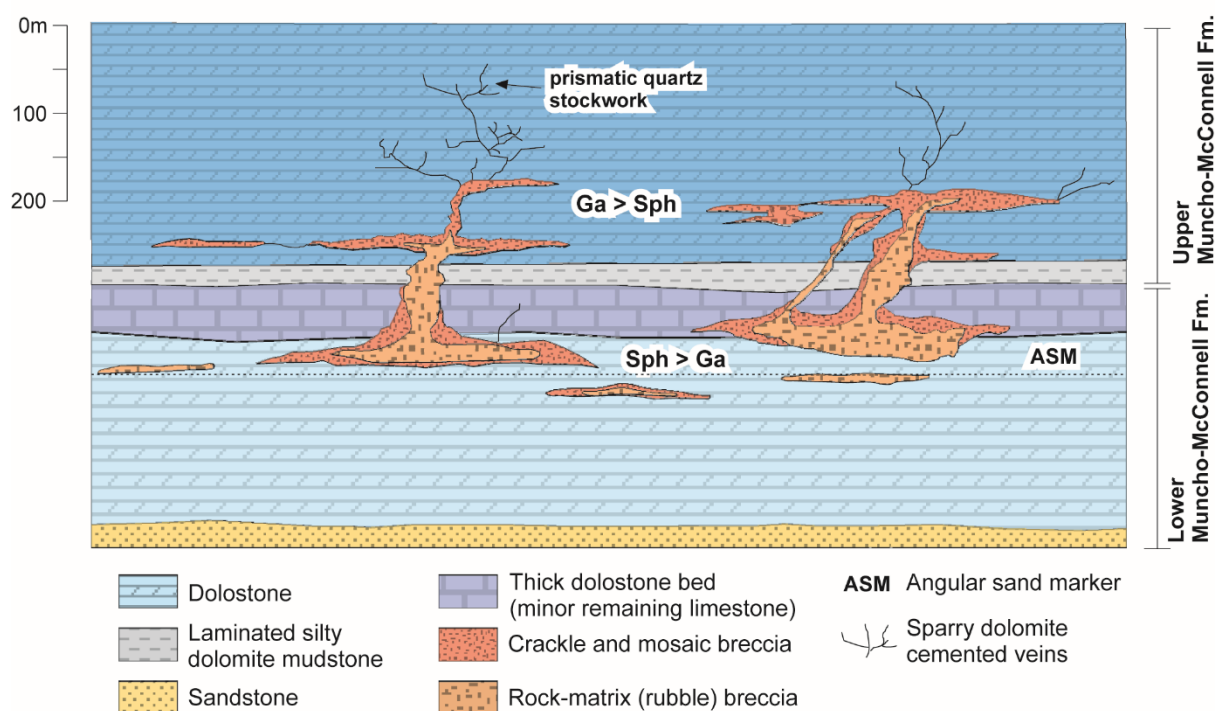


Figure 162 : Schéma du modèle MVT proposé à Robb Lake et les zonations minéralogiques associées (Paradis et al., 2007).

- Gisements de type SEDEX : les différences principales sont l’absence de volcanisme associé durant la compression varisque ainsi que dans les paragenèses et les textures (Tab. 10 et Fig. 163)

Tableau 10 : Principales caractéristiques des gisements de type SEDEX (Lydon, 1996)

Sedex Zn, Pb, Ba $\pm$ Cu, $\pm$ Ag	
Minéralogie	Pyrite, pyrrhotite, sphalérite, galène, chalcopryrite, arsénopyrite, marcassite rare, barytine
Textures	Alternances de lits sédimentaires avec des niveaux riches en sulfures et des niveaux pauvres en sulfures (dissémination)
	sulfures massifs
roches encaissantes	roches clastiques gréseuses à silteuses ou carbonates
contexte géologique	Bassins sédimentaires en extension, intracratoniques ou épicrotoniques sur une marge continentale
	Dépressions dans le bassin
	Faïlles syn-sédimentaires
	Roches volcaniques (sill de laves)
relation avec la stratification	stratiforme

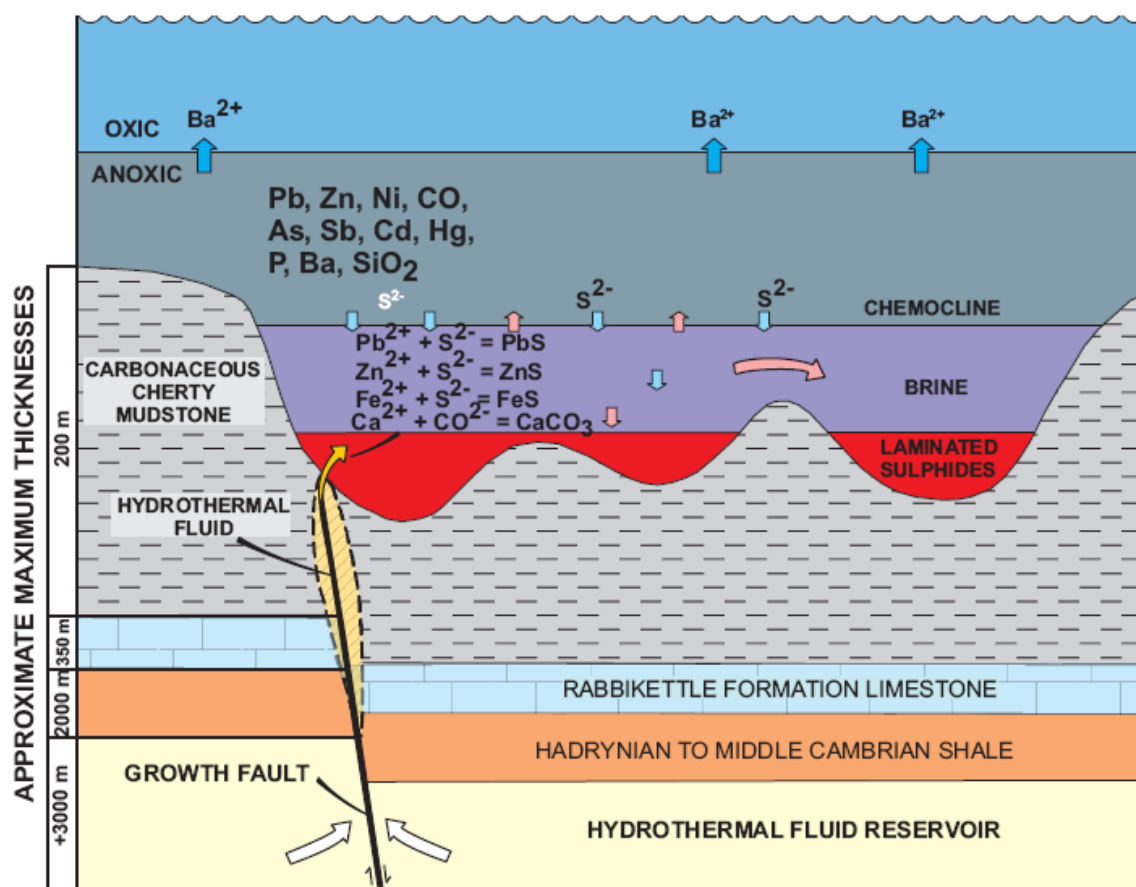


Figure 163 : Schéma conceptuel de formation des minéralisations de type SEDEX (Goodfellow and Lydon, 2007)

- Gisements de type Red Bed : les principales différences concernent l'encaissant, les textures et et contexte géologique (**Tab. 11**).

Tableau 11 : Principales caractéristiques des gisements de type Red Bed (Brown, 1997)

Red Bed Pb, Zn, (Cu), ±Ag	
Minéralogie	galène, sphalérite, cuivre natif, chalcocite, bornite, chalcopryrite, pyrite
Textures	sulfures disséminés
roches encaissantes	grès à ciment de sulfures
contexte géologique	grand lacs salins arides à semi-arides
	marge océanique ou intracontinentale
relation avec la stratification	corps minéralisés tabulaires, discordants sur le litage

7.7. SYNTHESE A L'ECHELLE DE L'ANTI-ATLAS

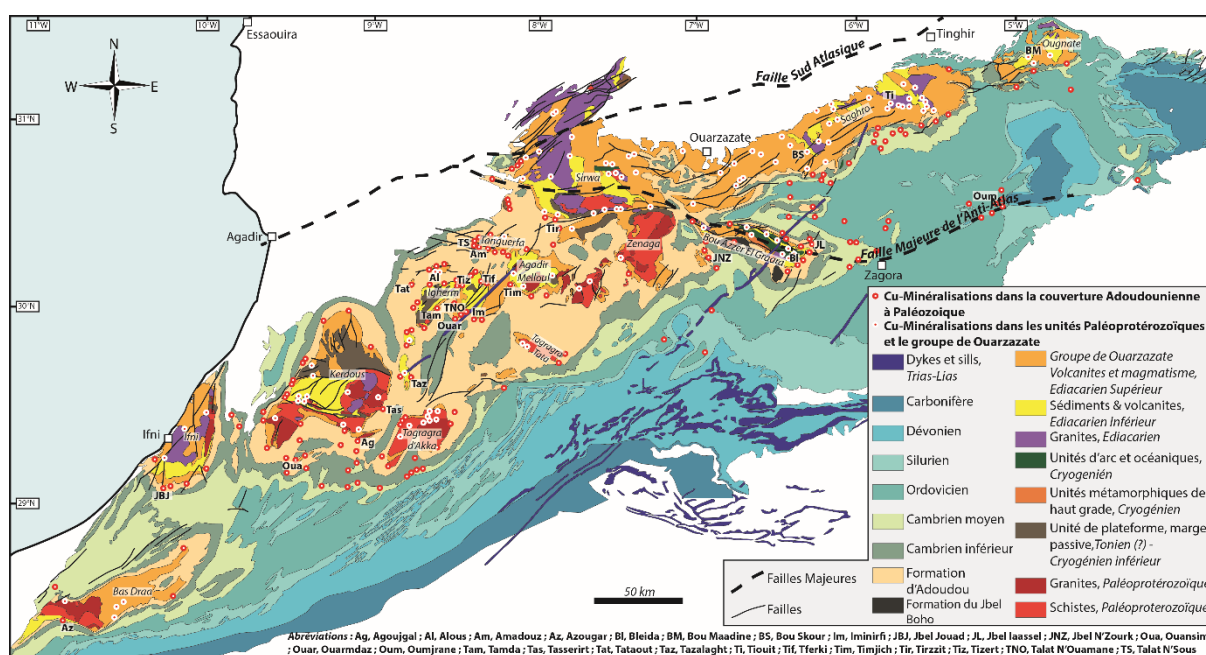


Figure 164 : Carte géologique de l'Anti-Atlas compilée d'après les données de la littérature montrant la répartition des occurrences cuprifères au sein de cette province (Hollard et al., 1985; Service Géologique du Maroc, 1985; Benali, 1999; Walsh et al., 2002; Gasquet et al., 2008; Blein et al., 2014)

A l'échelle de l'Anti-Atlas, les minéralisations cuprifères sont encaissées dans l'ensemble des unités du socle Précambrien et elles sont présentes jusqu'aux lithologies Ordoviciennes dans la couverture (**Fig. 164**). Par ailleurs, au sein de cette couverture, l'essentiel des minéralisations référencées est localisé sur le pourtour des boutonnières Précambriennes ou le long de l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas (AMAA). Nous avons montré que les minéralisations de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara étaient associées à des rejeux de failles du socle Précambrien lors de la compression Varisque. Ces rejeux structurent, à l'échelle de l'Anti-Atlas, la morphologie des boutonnières Précambriennes (Soulaimani et al., 1997; Hoepffner et al., 2005; Burkhard et al., 2006).

7.7.1. Les minéralisations stratabound de l'Anti-Atlas occidental

La morphologie des corps minéralisés de l'Anti-Atlas occidental correspond à un niveau stratabound situé à la base de la formation d'Adoudou au sein de la série de base (Pouit, 1966; Elsass, 1975; Benssaou and Hamoumi, 1999c; Maddi et al., 2011). Cette lithologie n'est pas présente dans la boutonnière concernée dans le cadre de cette étude. Les textures de la minéralisation stratabound de l'Anti-Atlas occidental correspondent à des disséminations et des veines à sulfures de cuivre, quartz et carbonates (Pouit, 1966; Elsass, 1975; Maddi et al., 2011). Les textures de cette minéralisation stratabound sont donc similaires à celles décrites macroscopiquement au niveau de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Par conséquent, les arguments tels que (i) la proximité entre ces minéralisations stratabound de l'Anti-Atlas et les zones de rejeux du socle Panafricain à proximité des boutonnières Précambriennes, (ii) les textures et la minéralogie de ces minéralisations, (iii) la présence d'occurrences cuprifères au sein des formations du socle Précambrien (**Fig. 164**), viennent conforter le modèle proposé dans ce manuscrit pour expliquer la genèse de ces minéralisations stratabound. En revanche, il semble que la minéralogie diffère, car des sulfures de plomb et de zinc ont été décrits dans l'Anti Atlas occidental (Pouit, 1966; Elsass, 1975; Maddi et al., 2011). Les paléo-relief associés spatialement à ce niveau stratabound ne sont pas remis en question mais ils pourraient être assimilés à des zones préférentielles de rejeux des structures du socle. Cette explication pourrait justifier l'association spatiale mise en évidence.

7.7.2. Les minéralisations filoniennes de la couverture néoprotérozoïque à Paléozoïque

Pour les gisements d'Ouansimi (formation d'Adoudou) et d'Oumjrane (ordovicien) la minéralisation cuprifère est présente sous la forme de filon. Dans le cas du gisement de Ouansimi, ces filons sont composés de sulfures de cuivre, de pyrite, de galène, de sphalérite, de quartz et de carbonates (Baoutoul, 2013). Ils sont orienté N155° à pendage sub-vertical (Baoutoul, 2013). Dans le cas de Oumjrane, les filons sont composés d'un remplissage de pyrite, d'ankérite, de sulfures de cuivre, de sulfures de plomb et de quartz. Ces filons sont orientés globalement E-O et sont parallèles à l'AMAA (Kharis et al., 2011). Ces deux gisements sont donc associés à une tectonique cassante recoupant les formations encaissantes, de même orientation que les « folded-band » décrites dans ce manuscrit pour les filons d'Ouansimi, et de même orientation que l'AMAA pour ceux d'Oumjrane. La minéralogie de

ces deux gisements est similaire à celle décrite dans cette étude à l'exception de la présence de pyrite et de sulfures de plomb. Le modèle que nous proposons pour la genèse des minéralisations de type strata-bound n'est donc pas incompatible avec la formation de ces minéralisations filoniennes. De plus, la localisation du gisement d'Oumjrane le long de l'AMAA est tout à fait cohérente avec les jeux de structures héritées de l'épisode Panafricain et donc des circulations de fluides associées.

7.7.3. Les autres modèles de la couverture Néoprotéozoïque à Paléozoïque

L'ensemble des données bibliographiques des minéralisations cuprifères stratabound, filoniennes ou de type « folded-band » discutées précédemment n'est pas cohérent avec le modèle de paléo-placer proposé par Parnell et al. (2014). Le modèle karstique du gisement d'Amadouze proposé par Anthonioz et al. (1979) ne peut pas être expliqué par notre modèle qui n'inclut pas de karst. Cependant, il serait intéressant d'étudier à nouveau ce gisement en tenant compte des observations réalisées dans ce manuscrit.

7.7.4. Les minéralisations du socle Précambrien

Les minéralisations du socle précambrien sont beaucoup plus diversifiées que celles de la couverture : Bou Azzer (Co-As), Imiter et Zgounder (Ag), Bou Skour et Bleida (Cu), Far West (Au), Tiouit (Au), Bou Maïdden (Au, Ag, Zn, Pb, Cu). Par conséquent, une interprétation de l'ensemble de ces minéralisations dans un seul événement Varisque serait plus qu'hasardeuse. Concernant la minéralisation uniquement cuprifère du gisement de Bou Skour, une remobilisation Varisque d'une minéralisation primaire de cuivre est évoquée par certains auteurs (e.g. El Azmi et al., 2014). Cette minéralisation primaire est recoupée par des dykes rhyolitiques datés à 564 Ma (Walsh et al., 2008). Il n'est donc pas possible d'expliquer l'intégralité de l'épisode minéralisateur à cuivre avec le modèle proposé dans ce manuscrit mais il est en revanche possible d'invoquer ce modèle pour la partie « Varisque » de ces minéralisations évoquée par (Maacha et al., 2011b; El Azmi et al., 2014).

La présence de saumures à NaCl-CaCl₂-H₂O décrites dans ce manuscrit ainsi que dans plusieurs gisements du socle Précambrien, est cohérente avec un événement hydrothermal à l'échelle de l'Anti-Atlas durant la compression Varisque (En-Naciri et al., 1997; Essarraj et al., 1998; Barakat et al., 2002; Essarraj et al., 2005b; Hulin, 2013; Essarraj et al., 2016). En revanche le lessivage du complexe ophiolitique de Bou Azzer comme origine du cuivre ne peut pas s'étendre à l'intégralité de l'Anti-Atlas du fait de la localisation de ces lambeaux

ophiolitiques uniquement dans l'Anti-Atlas Central. Les saumures de chimie comparable qui sont associées aux minéralisations cuprifères du socle et de la couverture de la boutonnière de Bou Azzer ont été répertoriées à l'échelle de l'Anti-Atlas (**figure 154**). On sait que dans la croûte continentale ou océanique, le cuivre est transporté sous forme de complexes chlorurés par des fluides chauds ($>250^{\circ}\text{C}$), acides et réduits (Michard et al., 1987; Bowers et al., 1988). Le contrôle lithologique des minéralisations cuprifères du socle par des niveaux de schistes noirs ou des niveaux pyriteux suggère que le dépôt des sulfures associés résulte de l'interaction entre les saumures cuprifères pauvres en soufre réduit et un encaissant riche en sulfures. Cette interprétation est cohérente avec le fait que, dans les systèmes géothermiques de haute énergie, les sulfures précipitent lors du « flashing » (décompression) à partir d'un fluide riche en métaux de base et pauvre en soufre réduit (Criaud and Fouillac, 1989).

Les minéralisations de la couverture de Bou Azzer-El Graara ont la particularité d'être très pauvres en fer (dépourvues de pyrite et associé à la bornite, sulfure dont le rapport atomique Cu/Fe est 5). Elles diffèrent donc des minéralisations en cuivre du socle de l'Anti-Atlas et d'autres minéralisations de la couverture néoproterozoïque à Cambrien inférieur (par exemple le gisement de Ouansini où la pyrite est présente dans toute la paragenèse précoce (Maacha et al., 2011b; El Azmi et al., 2014). Etant donné que le fer et le cuivre ont un comportement identique dans les solutions hydrothermales, il est très difficile d'expliquer le découplage du fer et du cuivre dans un gisement hydrothermal où les sulfures de cuivre sont primaires. La seule explication vraisemblable est celle invoquée pour expliquer la formation des 'banded iron formations' (BIF) à l'Archéen et au Protérozoïque : les saumures ont subi une oxydation brutale au cours de leur histoire, qui a induit la précipitation brutale du fer.

Références bibliographiques

- Algouti, A., Algouti, A., Beauchamp, J., Chbani, B., Taj-Eddine, K., 2000. Paléogéographie d'une plateforme infracambrienne en dislocation : série de base adoudounienne de la région Waoufengha-Igherm, Anti-Atlas occidental, Maroc. *Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. IIA - Earth Planet. Sci.* 330, 155–160. doi:10.1016/S1251-8050(00)00109-9
- Algouti, A., Algouti, A., Chbani, B., Zaim, M., 2001. Sedimentation et volcanisme synsédimentaire de la série de base de l'adoudounien infra-cambrien à travers deux exemples de l'Anti-Atlas du Maroc. *J. Afr. Earth Sci.* 32, 541–556. doi:10.1016/S0899-5362(02)00096-9
- Álvaro, J.J., Benziane, F., Thomas, R., Walsh, G.J., Yazidi, A., 2014. Neoproterozoic–Cambrian stratigraphic framework of the Anti-Atlas and Ouzellagh promontory (High Atlas), Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 98, 19–33. doi:10.1016/j.jafrearsci.2014.04.026
- Álvaro, J.J., Debrenne, F., 2010. The Great Atlasian Reef Complex: An early Cambrian subtropical fringing belt that bordered West Gondwana. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 294, 120–132. doi:10.1016/j.palaeo.2009.11.022
- Álvaro, J.J., Ezzouhairi, H., Ayad, N.A., Charif, A., Popov, L., Ribeiro, M.L., 2008. Short-term episodes of carbonate productivity in a Cambrian uplifted rift shoulder of the Coastal Meseta, Morocco. *Gondwana Res.* 14, 410–428. doi:10.1016/j.gr.2008.04.003
- Álvaro, J.J., Ezzouhairi, H., Vennin, E., Ribeiro, M.L., Clausen, S., Charif, A., Ayad, N.A., Moreira, M.E., 2006. The Early-Cambrian Boho volcano of the El Graara massif, Morocco: Petrology, geodynamic setting and coeval sedimentation. *J. Afr. Earth Sci.* 44, 396–410. doi:10.1016/j.jafrearsci.2005.12.008
- Álvaro, J.J., Ferretti, A., González-Gómez, C., Serpagli, E., Tortello, M.F., Vecoli, M., Vizcaíno, D., 2007. A review of the Late Cambrian (Furongian) palaeogeography in the western Mediterranean region, NW Gondwana. *Earth-Sci. Rev.* 85, 47–81. doi:10.1016/j.earscirev.2007.06.006
- Álvaro, J.J., Rouchy, J.M., Bechstädt, T., Boucot, A., Boyer, F., Debrenne, F., Moreno-Eiris, E., Perejón, A., Vennin, E., 2000. Evaporitic constraints on the southward drifting of the western Gondwana margin during Early Cambrian times. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 160, 105–122. doi:10.1016/S0031-0182(00)00061-4
- Álvaro, J.J., Subías, I., 2011. Interplay of phosphogenesis and hydrothermalism in the latest Ediacaran rift of the High Atlas, Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 59, 51–60. doi:10.1016/j.jafrearsci.2010.08.004
- Amthor, J.E., Grotzinger, J.P., Schröder, S., Bowring, S.A., Ramezani, J., Martin, M.W., Matter, A., 2003. Extinction of Cloudina and Namacalathus at the Precambrian–Cambrian boundary in Oman. *Geology* 31, 431. doi:10.1130/0091-7613(2003)031<0431:EOCANA>2.0.CO;2
- Anderson, G.M., Macqueen, R.W., 1982. Ore Deposit Models - 6. Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits. *Geosci. Can.* 9.
- Anthonioz, P., Bahi, L., Khalek, M., 1979. Un cas d'accumulation métallifère de type karstique dans un milieu carbonaté discontinu : gîte cuprifère d'Amadou (Anti-Atlas occidental, Maroc). *CR Acad Sci Paris* 3.
- Azizi Samir, M.R., Ferrandini, J., Tane, J.L., 1990. Tectonique et volcanisme tardi-Pan Africains (580-560 M.a.) dans l'Anti-Atlas Central (Maroc): interprétation géodynamique à l'échelle du NW de l'Afrique. *J. Afr. Earth Sci. Middle East* 10, 549–563. doi:10.1016/0899-5362(90)90105-N
- Banerjee, D., Schidlowski, M., Siebert, F., Brasier, M., 1997. Geochemical changes across the Proterozoic–Cambrian transition in the Durmala phosphorite mine section,

- Mussoorie Hills, Garhwal Himalaya, India. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 132, 183–194. doi:10.1016/S0031-0182(97)00060-6
- Baoutoul, H., 2014. Rapport de synthèse des travaux réalisés à Ouansimi. *Managem.*
- Baoutoul, H., 2013. Le gisement cuprifère de Ouansimi (Anti-Atlas occidental, Maroc) : Caractérisation géologique et paragenèses minérales.
- Baoutoul, H., n.d. Exploration du site de Jbel Boho. *Managem.*
- Barakat, A., Marignac, C., Boiron, M.-C., Bouabdelli, M., 2002. Caractérisation des paragenèses et des paléocirculations fluides dans l'indice d'or de Bleïda (Anti-Atlas, Maroc). *Comptes Rendus Geosci.* 334, 35–41. doi:10.1016/S1631-0713(02)01709-1
- Becker, S.P., Fall, A., Bodnar, R.J., 2008. Synthetic Fluid Inclusions. XVII. PVTX Properties of High Salinity H₂O-NaCl Solutions (>30 wt % NaCl): Application to Fluid Inclusions that Homogenize by Halite Disappearance from Porphyry Copper and Other Hydrothermal Ore Deposits. *Econ. Geol.* 103, 539–554. doi:10.2113/gsecongeo.103.3.539
- Benali, A., 1999. Carte des gîtes minéraux du Maroc au 1/1 000 000.
- Benssaou, M., Hamoumi, N., 2004. Les microbialites de l'Anti-Atlas occidental (Maroc) : marqueurs stratigraphiques et témoins des changements environnementaux au Cambrien inférieur. *Comptes Rendus Geosci.* 336, 109–116. doi:10.1016/j.crte.2003.10.024
- Benssaou, M., Hamoumi, N., 2003. Le graben de l'Anti-Atlas occidental (Maroc) : contrôle tectonique de la paléogéographie et des séquences au Cambrien inférieur. *Comptes Rendus Geosci.* 335, 297–305. doi:10.1016/S1631-0713(03)00033-6
- Benssaou, M., Hamoumi, N., 2001. The western Anti-Atlas of Morocco: sedimentological and palaeogeographical formation studies in the Early Cambrian. *J. Afr. Earth Sci.* 32, 351–372. doi:10.1016/S0899-5362(01)90102-2
- Benssaou, M., Hamoumi, N., 1999a. L'Anti-Atlas occidental du Maroc: remplissage sédimentaire d'un bassin de type rift intracontinental au Cambrien inférieur. *Géologie Méditerranéenne* 3, 259–279.
- Benssaou, M., Hamoumi, N., 1999b. Le Protérozoïque terminal-Cambrien inférieur de l'Anti-Atlas occidental (Maroc): évolution sédimentologique et implications géodynamiques. *Afr. Geosci. Rev.* 6, 361–380.
- Benssaou, M., Hamoumi, N., 1999c. Paléoenvironnements et minéralisations de l'Anti-Atlas occidental marocain au Cambrien précoce. *Chron MinesRech Min* 536, 113–119.
- Benziane, F., Yazidi, A., 1982. Géologie de la Boutonnière précambrienne d'Ifni (Anti-Atlas occidental). Editions du Service géologique du Maroc.
- Benziane, F., Yazidi, A., Prost, A.E., 1983. Le passage du précambrien, le Cambrien précoce volcanique et sédimentaire de l'anti-atlas oriental, comparaisons avec l'anti-atlas occidental. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 7, 549–556.
- Bernardin, C., Cornée, J.-J., Corsini, M., Mayol, S., Muller, J., Tayebi, M., 1988. Variations d'épaisseur du Cambrien moyen en Meseta marocaine occidentale: signification géodynamique des données de surface et de subsurface. *Can. J. Earth Sci.* 25, 2104–2117. doi:10.1139/e88-194
- Beuf, S., 1971. Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara: Sédimentation et discontinuités; évolution structurale d'un craton. Ed. Tech.
- Bhilisse, M., Wafik, A., Admou, H., Maacha, L., Constantin, M., 2014. Impact of Serpentinization on Deposits of Nickel, Chromite and Cobalt, Mining District of Bou Azzer, (Central Anti-Atlas). *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 6, 110–132.
- Bihouix, P., De Guillebon, B., 2010. Quel futur pour les métaux?, EDP Sciences. ed, Hors Collection.

- Blatrix, P., Burg, J.P., 1981. ^{40}Ar - ^{39}Ar dates from Sierra Morena (southern Spain): Variscan metamorphism and Cadomian orogeny. *N Jb Min. Mh* 10, 470–478.
- Blein, O., Baudin, T., Soulaïmani, A., Cocherie, A., Chèvremont, P., Admou, H., Ouanaïmi, H., Hafid, A., Razin, P., Bouabdelli, M., Roger, J., 2014. New geochemical, geochronological and structural constraints on the Ediacaran evolution of the south Sirwa, Agadir-Melloul and Iguerda inliers, Anti-Atlas, Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 98, 47–71. doi:10.1016/j.jafrearsci.2014.06.019
- Bodnar, R.J., 1994. Synthetic fluid inclusions: XII. The system H_2O - NaCl . Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40 wt% NaCl solution. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 1053–1063. doi:10.1016/0016-7037(94)90571-1
- Boudda, A., Choubert, G., Faure-Muret, A., 1979. Essai de stratigraphie de la couverture sédimentaire de l'Anti-Atlas: Adoudounien–Cambrien inférieur. *Notes Mém. Serv. Géologique Maroc* 271, 99.
- Bouougri, E.H., Saquaque, A., 2004. Lithostratigraphic framework and correlation of the Neoproterozoic northern West African Craton passive margin sequence (Siroua–Zenaga–Bouazzar Elgraara Inliers, Central Anti-Atlas, Morocco): an integrated approach. *J. Afr. Earth Sci.* 39, 227–238. doi:10.1016/j.jafrearsci.2004.07.045
- Bourque, H., 2013. Rapport interne, Managem.
- Bourque, H., Barbanson, L., Sizaret, S., Branquet, Y., Ramboz, C., Ennaciri, A., El Ghorfi, M., Badra, L., 2015. A contribution to the synsedimentary versus epigenetic origin of the Cu mineralizations hosted by terminal Neoproterozoic to Cambrian formations of the Bou Azzer–El Graara inlier: New insights from the Jbel Laassel deposit (Anti Atlas, Morocco). *J. Afr. Earth Sci.* 107, 108–118. doi:10.1016/j.jafrearsci.2015.04.005
- Bowers, T.S., Campbell, A.C., Measures, C.I., Spivack, A.J., Khadem, M., Edmond, J.M., 1988. Chemical controls on the composition of vent fluids at 13° – 11°N and 21°N , East Pacific Rise. *J. Geophys. Res.* 93, 4522. doi:10.1029/JB093iB05p04522
- Brasier, M.D., 1992. Background to the Cambrian Explosion. *J. Geol. Soc.* 149, 585–587. doi:10.1144/gsjgs.149.4.0585
- Brown, A., 1997. Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits. *Geosci. Can.* 19, 125–141.
- Buggisch, W., Flügel, E., 1988. The Precambrian/Cambrian boundary in the Anti-Atlas (Morocco) discussion and new results, in: Jacobshagen, V.H. (Ed.), *The Atlas System of Morocco*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp. 81–90.
- Buggisch, W., Heinitz, W., 1984. Slumpfolds and other early deformations in the early Cambrian of the Western and Central Anti-Atlas (Morocco). *Geol. Rundsch.* 73, 809–818. doi:10.1007/BF01824983
- Buggisch, W., Marzela, C., Hügel, P., 1979. Die fazielle und paläogeographische Entwicklung der infrakambrischen bis ordovizischen Sedimente im Mittleren Anti-Atlas um Agdz (S-Marokko). *Geol. Rundsch.* 68, 195–224. doi:10.1007/BF01821128
- Buggisch, W., Siegert, R., 1988. Paleogeography and facies of the “gres terminaux” (uppermost Lower Cambrian, Anti-Atlas/Morocco), in: Jacobshagen, V.H. (Ed.), *The Atlas System of Morocco*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp. 107–121.
- Burkhard, M., Caritg, S., Helg, U., Robert-Charrue, C., Soulaïmani, A., 2006. Tectonics of the Anti-Atlas of Morocco. *Comptes Rendus Geosci.* 338, 11–24. doi:10.1016/j.crte.2005.11.012
- Caritg, S., 2003. Relations entre domes de socle et couverture plissée en front de chaîne de montagne: Etude géologique structurale de la chaîne hercynienne de l'Anti-Atlas, Maroc. Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel.
- Caritg, S., Burkhard, M., Ducommun, R., Helg, U., Kopp, L., Sue, C., 2004. Fold interference patterns in the Late Palaeozoic Anti-Atlas belt of Morocco. *Terra Nova* 16, 27–37. doi:10.1111/j.1365-3121.2003.00525.x

- Chabane, A., Boyer, C., 1979. Séries volcaniques et minéralisations cuprifères du Précambrien supérieur de Tanguerfa, Anti-Atlas, Maroc. CR Acad Sci Paris 4.
- Chazan, W., 1954. Les gisements stratiformes plomb-zincifères de l'Infracambrien de l'Anti-Atlas occidental (Maroc). Notes Mém. Serv. Géologique Maroc 120, 97–126.
- Chbani, B., Beauchamp, J., Algouti, A., Zouhair, A., 1999. Un enregistrement sédimentaire éocambrien dans un bassin intracontinental en distension: le cycle « conglomérats de base — unité calcaire — grès de Tikirtde Bou-Azzer El Graara (Anti-Atlas central, Maroc). Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. IIA - Earth Planet. Sci. 329, 317–323. doi:10.1016/S1251-8050(00)88581-X
- Choubert, G., 1963. Histoire géologique du précambrien de l'Anti-Atlas. Notes Mém. Serv. Géologique Maroc 352.
- Choubert, G., 1952. Histoire géologique du domaine de l'Anti-Atlas. Presented at the 19e Congr. Géol. Int. Alger. Monogr. Region, 3e Ser. Maroc, 19e Congr. Géol. Int. Alger. Monogr. Region, 3e Ser. Maroc.
- Choubert, G., Faure-Muret, A., 1970. Livret guide de l'excursion Anti-Atlas occidental et central. Presented at the Colloque int. sur les corrélations du Précambrien, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, p. 259.
- Clavel, M., Leblanc, M., 1971. Liaison entre tectonique et minéralisation cuprifère dans les dolomies infracambriennes de la région du Jbel N'Zourk (Anti-Atlas central, Maroc). Notes Mém. Serv. Géologique Maroc 237, 229–232.
- Clavel, M., Tixeront, M., 1971. Un gîte de cuivre filonien, hydrothermal intraplutonique; bou-Skour (Anti-Atlas, Maroc). Hydrothermal Intraplutonic Venied Copp. Ore Depos. Bou-Skour Anti-Atlas Maroc. 237, 203–227.
- Coeffic, J., 2012. Rapport interne, Managem.
- Coeffic, J., 1985. Rapport Jbel El Hassel : Nouvelle estimation des réserves. Managem.
- Colmenar, J., Álvaro, J.J., 2015. Integrated brachiopod-based bioevents and sequence-stratigraphic framework for a Late Ordovician subpolar platform, eastern Anti-Atlas, Morocco. Geol. Mag. 152, 603–620. doi:10.1017/S0016756814000533
- Copper Alliance [WWW Document], n.d. URL <http://copperalliance.fr/copper-alliance> (accessed 4.20.16).
- Cox, S.F., Wall, V.J., Etheridge, M.A., Potter, T.F., 1991. Deformational and metamorphic processes in the formation of mesothermal vein-hosted gold deposits — examples from the Lachlan Fold Belt in central Victoria, Australia. Ore Geol. Rev. 6, 391–423. doi:10.1016/0169-1368(91)90038-9
- Cózar, P., Medina-Varea, P., Somerville, I.D., Vachard, D., Rodríguez, S., Said, I., 2014. Foraminifers and conodonts from the late Viséan to early Bashkirian succession in the Saharan Tindouf Basin (southern Morocco): biostratigraphic refinements and implications for correlations in the western Palaeotethys: LATE VISÉAN-EARLY BASHKIRIAN FORAMINIFERS FROM MOROCCO. Geol. J. 49, 271–302. doi:10.1002/gj.2519
- Criaud, A., Fouillac, C., 1989. Sulfide scaling in low enthalpy geothermal environments: A survey. Geothermics 18, 73–81. doi:10.1016/0375-6505(89)90012-6
- Davis, D.W., Lowenstein, T.K., Spencer, R.J., 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O, and NaCl-CaCl₂-H₂O. Geochim. Cosmochim. Acta 54, 591–601. doi:10.1016/0016-7037(90)90355-O
- Debrenne, F., Debrenne, M., 1995. Archaeocyaths of the Lower Cambrian of Morocco. Morocco 95, 121–145.

- Delvaux, D., Sperner, B., 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 212, 75–100. doi:10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06
- Destombes, J., Hollard, H., Willefert, S., 1985. Lower Paleozoic rocks of Morocco, in: *Lower Palaeozoic of North-Western and West-Central Africa*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY, pp. 157–184.
- D’Lemos, R.S., Inglis, J.D., Samson, S.D., 2006. A newly discovered orogenic event in Morocco: Neoproterozoic ages for supposed Eburnean basement of the Bou Azzer inlier, Anti-Atlas Mountains. *Precambrian Res.* 147, 65–78. doi:10.1016/j.precamres.2006.02.003
- Doblas, M., López-Ruiz, J., Cebriá, J.-M., Youbi, N., Degroote, E., 2002. Mantle insulation beneath the West African craton during the Precambrian-Cambrian transition. *Geology* 30, 839–842.
- Ducrot, J., Lancelot, J.R., 1977. Problème de la limite Précambrien–Cambrien: étude radiochronologique par la méthode U–Pb sur zircons du volcan du Jbel Boho (Anti-Atlas marocain). *Can. J. Earth Sci.* 14, 2771–2777. doi:10.1139/e77-243
- EL Azmi, D., Aissa, M., Ouguir, H., Mahdoudi, M.L., El Azmi, M., Ouadjo, A., Zouhair, M., 2014. Magmatic context of Bou Skour copper deposit (Eastern Anti-Atlas, Morocco): Petrography, geochemistry and alterations. *J. Afr. Earth Sci.* 97, 40–55. doi:10.1016/j.jafrearsci.2014.04.020
- El Ghorfi, M., Melcher, F., Oberthür, T., Boukhari, A.E., Maacha, L., Maddi, A., Mhaili, M., 2008. Platinum group minerals in podiform chromitites of the Bou Azzer ophiolite, Anti Atlas, Central Morocco. *Mineral. Petrol.* 92, 59–80. doi:10.1007/s00710-007-0208-2
- El Ghorfi, M., Oberthür, T., Melcher, F., Lüders, V., El Boukhari, A., Maacha, L., Ziadi, R., Baoutoul, H., 2006. Gold–palladium mineralization at Bleïda Far West, Bou Azzer–El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco. *Miner. Deposita* 41, 549–564. doi:10.1007/s00126-006-0077-3
- El Hadi, H., Simancas, J.F., Martínez-Poyatos, D., Azor, A., Tahiri, A., Montero, P., Fanning, C.M., Bea, F., González-Lodeiro, F., 2010. Structural and geochronological constraints on the evolution of the Bou Azzer Neoproterozoic ophiolite (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Res.* 182, 1–14. doi:10.1016/j.precamres.2010.06.011
- El Maazouz, B., Hamoumi, N., 2007. Différenciation paléogéographique à l’Ordovicien supérieur dans le Tafilalt (Anti-Atlas oriental, Maroc) sous l’interaction de la glaciation et de la tectonique. *Comptes Rendus Geosci.* 339, 562–571. doi:10.1016/j.crte.2007.07.002
- Elsass, P., 1975. Structures sédimentaires et minéralisation dans le gîte de Talate n’Ouamane, Anti-Atlas occidental, Maroc. *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France*.
- Ennaciri, A., 1995. Contribution à l’étude du district à Co, As, (Ni, Au, Ag) de Bou Azzer, anti-atlas (maroc) : données minéralogiques et géochimiques. étude des inclusions fluides. Orléans.
- En-Naciri, A., Barbanson, L., Touray, J.-C., 1997. Brine inclusions from the Co-As(Au) Bou Azzer District, Anti-Atlas Mountains, Morocco. *Econ. Geol.* 92, 360–367. doi:10.2113/gsecongeo.92.3.360
- Ennaciri, A., Barbanson, L., Touray, J.C., 1995. Mineralized hydrothermal solution cavities in the Co-As Aït Ahmane mine (Bou Azzer, Morocco). *Miner. Deposita* 30, 75–77. doi:10.1007/BF00208879
- Ennih, N., Liegeois, J.-P., 2008. The boundaries of the West African craton, with special reference to the basement of the Moroccan metacratonic Anti-Atlas belt. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 297, 1–17. doi:10.1144/SP297.1

- Ennih, N., Liégeois, J.-P., 2001. The Moroccan Anti-Atlas: the West African craton passive margin with limited Pan-African activity. Implications for the northern limit of the craton. *Precambrian Res.* 112, 289–302. doi:10.1016/S0301-9268(01)00195-4
- Essarraj, S., Boiron, M.-C., Cathelineau, M., Banks, D.A., Benharref, M., 2005a. Penetration of surface-evaporated brines into the Proterozoic basement and deposition of Co and Ag at Bou Azzer (Morocco): Evidence from fluid inclusions. *J. Afr. Earth Sci.* 41, 25–39. doi:10.1016/j.jafrearsci.2005.03.001
- Essarraj, S., Boiron, M.-C., Cathelineau, M., Banks, D.A., Benharref, M., 2005b. Penetration of surface-evaporated brines into the Proterozoic basement and deposition of Co and Ag at Bou Azzer (Morocco): Evidence from fluid inclusions. *J. Afr. Earth Sci.* 41, 25–39. doi:10.1016/j.jafrearsci.2005.03.001
- Essarraj, S., Boiron, M.-C., Cathelineau, M., Banks, D.A., El Boukhari, A., Chouhaidi, M.Y., 1998. Brines related to Ag deposition in the Zgounder silver deposit (Anti-Atlas, Morocco). *Eur. J. Mineral.* 10, 1201–1214.
- Essarraj, S., Boiron, M.-C., Cathelineau, M., Tarantola, A., Leisen, M., Hibti, M., 2016. Mineralogy and ore fluid chemistry of the Roc Blanc Ag deposit, Jebilet Hercynian massif, Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* doi:10.1016/j.jafrearsci.2016.07.020
- Evans, M.A., Fischer, M.P., 2012. On the distribution of fluids in folds: A review of controlling factors and processes. *J. Struct. Geol.* 44, 2–24. doi:10.1016/j.jsg.2012.08.003
- Fabre, J., 2005. *Geologie du Sahara occidental et central*. Geol. West. Cent. Sahara 108, 572.
- Faik, F., Belfoul, M., Bouabdelli, M., Hassenforder, B., 2001. Les structures de la couverture Néoprotérozoïque terminal et Paléozoïque de la région de Tata, Anti-Atlas centre-occidental, Maroc: déformation polyphasée, ou interactions socle/couverture pendant l'orogénèse hercynienne? *J. Afr. Earth Sci.* 32, 765–776. doi:10.1016/S0899-5362(02)00053-2
- Fekkak, A., Pouclet, A., Ouguir, H., Ouazzani, H., Badra, L., Gasquet, D., 2001. Géochimie et signification géotectonique des volcanites du Cryogénien inférieur du Saghro (Anti-Atlas oriental, Maroc). *Geodin. Acta* 14, 373–385. doi:10.1016/S0985-3111(01)01073-7
- Florez-Niño, J.-M., Aydin, A., Mavko, G., Antonellini, M., Ayaviri, A., 2005. Fault and fracture systems in a fold and thrust belt: An example from Bolivia. *AAPG Bull.* 89, 471–493. doi:10.1306/11120404032
- Frape, S.K., Fritz, P., MacNutt, R.H., 1984. The role of water–rock interactions in the chemical evolution of groundwaters from the Canadian Shield. 48, 1617–1627.
- Garven, G., 1985. The role of regional fluid flow in the genesis of the Pine Point Deposit, Western Canada sedimentary basin. *Econ. Geol.* 80, 307–324. doi:10.2113/gsecongeo.80.2.307
- Gasquet, D., Ennih, N., Liégeois, J.-P., Soulaïmani, A., Michard, A., 2008. The Pan-African Belt, in: Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Lamotte, D.F. de (Eds.), *Continental Evolution: The Geology of Morocco*, Lecture Notes in Earth Sciences. Springer Berlin Heidelberg, pp. 33–64. doi:10.1007/978-3-540-77076-3_2
- Gasquet, D., Levresse, G., Cheilletz, A., Azizi-Samir, M.R., Mouttaqi, A., 2005. Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian–Cambrian transition. *Precambrian Res.* 140, 157–182. doi:10.1016/j.precamres.2005.06.009
- Geyer, G., 1989. Late Precambrian to early Middle Cambrian lithostratigraphy of southern Morocco. *Beringeria* 1, 115–143.

- Goodfellow, W.D., Lydon, J.W., 2007. Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits. *Geol. Assoc. Can. Miner. Depos. Div. Spec. Publ.* 5, 163–183.
- Grotzinger, J.P., Bowring, S.A., Saylor, B.Z., Kaufman, A.J., 1995. Biostratigraphic and Geochronologic Constraints on Early Animal Evolution. *Science* 598.
- Guilbert, J., Park, F., 1986. *The Geology of Ore Deposits*. Freeman.
- Hassenforder, B., 1987. La tectonique panafricaine et varisque de l'Anti-Atlas dans le massif du Kerdous (Maroc). Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, Strasbourg, France.
- Hefferan, K.P., Admou, H., Hilal, R., Karson, J.A., Saquaque, A., Juteau, T., Bohn, M.M., Samson, S.D., Kornprobst, J.M., 2002. Proterozoic blueschist-bearing mélange in the Anti-Atlas Mountains, Morocco. *Precambrian Res.* 118, 179–194. doi:10.1016/S0301-9268(02)00109-2
- Hefferan, K.P., Admou, H., Karson, J.A., Saquaque, A., 2000. Anti-Atlas (Morocco) role in Neoproterozoic Western Gondwana reconstruction. *Precambrian Res.* 103, 89–96. doi:10.1016/S0301-9268(00)00078-4
- Helg, U., Burkhard, M., Caritg, S., Robert-Charrue, C., 2004. Folding and inversion tectonics in the Anti-Atlas of Morocco: FOLDING AND INVERSION TECTONICS IN THE ANTI-ATLAS OF MOROCCO. *Tectonics* 23, n/a-n/a. doi:10.1029/2003TC001576
- Histoire du cuivre, n.d. . Prix Cuivre.
- Histoire du cuivre [WWW Document], n.d. URL <http://www.courscuivre.com/histoire-du-cuivre/> (accessed 10.18.16b).
- Hoepffner, C., Soulaïmani, A., Piqué, A., 2005. The Moroccan Hercynides. *J. Afr. Earth Sci.* 43, 144–165. doi:10.1016/j.jafrearsci.2005.09.002
- Hoffman, P.F., 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science* 281, 1342–1346. doi:10.1126/science.281.5381.1342
- Hollard, H., Choubert, G., Bronner, G., Marchand, J., Sougy, J., 1985. Carte géologique du Maroc.
- Houzay, J.P., 1979. Empreintes attribuables a des Meduses dans la serie de base de l'Adoudounien (Precambrien terminal de l'Anti-Atlas, Maroc). *Impr. Relat. Jellyfishes Ser. Base Adoudounian Uppermost Precambrian Anti-Atl* 6, 379–384.
- Hulin, C., 2013. A fluid inclusion and stable isotope study at the Imiter silver world class deposit (Anti-Atlas, Morocco) (Master degree). Université Lille 1.
- Hupé, P., n.d. Contribution à l'étude du Cambrien inférieur et du Précambrien III de l'Anti-Atlas marocain. *Notes Mém. Serv. Géologique Maroc* 39, 345.
- Inglis, J.D., MacLean, J.S., Samson, S.D., D'Lemos, R.S., Admou, H., Hefferan, K., 2004. A precise U–Pb zircon age for the Bleïda granodiorite, Anti-Atlas, Morocco: implications for the timing of deformation and terrane assembly in the eastern Anti-Atlas. *J. Afr. Earth Sci.* 39, 277–283. doi:10.1016/j.jafrearsci.2004.07.041
- Javier Álvaro, J., 2013. Late Ediacaran syn-rift/post-rift transition and related fault-driven hydrothermal systems in the Anti-Atlas Mountains, Morocco. *Basin Res.* 25, 348–360. doi:10.1111/bre.12003
- Kelly, T.D., Matos, G.R., 2016. Copper end-use statistics [through 2014; last modified March 30, 2016]. Historical statistics for mineral and material commodities in the United States (2016 version): U.S. Geological Survey Data Series 140, x p., accessed [April 9, 2016].
- Kersit, 1984. Rapport interne Managem.
- Khari, A., Aissa, M., Baïdier, L., Ouguir, H., Mahmoudi, A., Zouhair, M., Ouadjo, A., 2011. Oumjrane-Bou Nahas, a Copper Mine in the Maider Upper Ordovician Quartzites, in: *NEW GEOLOGICAL AND MINING GUIDEBOOKS OF MOROCCO*. p. 374.

- Kirschvink, J.L., Raub, T.D., 2003. A methane fuse for the Cambrian explosion: carbon cycles and true polar wander. *Comptes Rendus Geosci.* 335, 65–78. doi:10.1016/S1631-0713(03)00011-7
- Knoll, A.H., Carroll, S.B., 1999. Early Animal Evolution: Emerging Views from Comparative Biology and Geology. *Science* 2129.
- Labails, C., Olivet, J.-L., Aslanian, D., Roest, W.R., 2010. An alternative early opening scenario for the Central Atlantic Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 297, 355–368. doi:10.1016/j.epsl.2010.06.024
- Lacombe, O., Roure, F., Lavé, J., Vergés, J. (Eds.), 2007. Thrust Belts and Foreland Basins, *Frontiers in Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Latham, A., Riding, R., 1990. Fossil evidence for the location of the Precambrian/Cambrian boundary in Morocco. *Nature* 344, 752–754. doi:10.1038/344752a0
- Leblanc, M., 1986. Appareil ignimbrétique et minéralisation cuprifère: Alous (Anti-Atlas, Maroc). *Miner. Deposita* 21, 129–136.
- Leblanc, M., 1981. Chapter 17 The Late Proterozoic Ophiolites of Bou Azzer (Morocco): Evidence for Pan-African Plate Tectonics. *Dev. Precambrian Geol.* 4, 435–451. doi:10.1016/S0166-2635(08)70022-7
- Leblanc, M., 1976. Proterozoic oceanic crust at Bou Azzer. *Nature* 261, 34–35. doi:10.1038/261034a0
- Leblanc, M., 1975. Ophiolites précambriennes et gîtes arseniés de cobalt: Bou Azzer (Maroc). *Cent. Géologique Géophysique Univ. Sci. Tech. Languedoc*.
- Leblanc, M., 1974. Minéralisations cuprifères et volcanisme albitophyrique dans les ophiolites précambriennes de Bou Azzer (Anti-Atlas, Maroc). *Bull. Volcanol.* 38, 1095–1109.
- Leblanc, M., 1973. Le grand dyke de dolérite de l'Anti-Atlas et le magmatisme jurassique du Sud Marocain. *CR Acad Sci Paris* 276, 2943–2946.
- Leblanc, M. (analytic), Arnold, M. (analytic), 1994. Sulfur isotope evidence for the genesis of distinct mineralizations in the Bleida stratiform copper deposit (Morocco) (English). *Econ Geol Bull Soc Econ Geol* 89, 931–935.
- Leblanc, M., Billaud, P., 1978. A volcano-sedimentary copper deposit on a continental margin of upper Proterozoic age; Bleida (Anti-Atlas, Morocco). *Econ. Geol.* 73, 1101–1111. doi:10.2113/gsecongeo.73.6.1101
- Leblanc, M., Lancelot, J.R., 1980. Interpretation géodynamique du domaine pan-africain (Précambrien terminal) de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir de données géologiques et géochronologiques. *Geodyn. Interpret. Pan-Afr. Domain Late Precambrian Anti-Atl* 17, 142–155.
- Leblanc, M., Lancelot, J.R., 1972. Sur le style disharmonique des plis hercyniens de la couverture dans l'Anti-Atlas central (Maroc). *Comptes Rendus Geosci.* 275, 803–807.
- Lehmann, B., Nägler, T.F., Holland, H.D., Wille, M., Mao, J., Pan, J., Ma, D., Dulski, P., 2007. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater. *Geology* 35, 403. doi:10.1130/G23543A.1
- Les alliages de cuivre [WWW Document], n.d. URL <http://copperalliance.fr/le-cuivre/les-alliages> (accessed 10.18.16).
- Liégeois, J.-P., Benhallou, A., Azzouni-Sekkal, A., Yahiaoui, R., Bonin, B., 2005. The Hoggar swell and volcanism; reactivation of the Precambrian Tuareg Shield during Alpine convergence and West African Cenozoic volcanism. *Spec. Pap. - Geol. Soc. Am.* 388, 379–400. doi:10.1130/2005.2388(23)
- Lydon, J.W., 1996. Sedimentary exhalative sulphides (SEDEX). *Geol. Can. Miner. Depos. Types Geol. Surv. Can.* 8, 130–152.

- Maacha, L., 2013. Etudes Métallogéniques Et Géophysiques des Minéralisations Cobaltifères et Cuprifères de Bou-Azzer El Graara Anti-Atlas Maroc : Les Minéralisations de Cuivre de la Plateforme de Bleida. UNIVERSITE CADDI AYYAD FACULTE DES SCIENCES SEMLALIA- MARRAKECH, Maroc.
- Maacha, L., El Ghorfi, M., Ennaciri, A., ALANSARI, A., Saquaque, A., Soulaïmani, A., 2011a. Chromite and Platinum Group Elements associated with the Bou Azzer ophiolites. Central Anti-Atlas. Morocco, in: NEW GEOLOGICAL AND MINING GUIDEBOOKS OF MOROCCO. NOTES ET MÉMOIRES DU SERVICE GÉOLOGIQUE, p. 374.
- MAACHA, L., Ennaciri, A., EL GHORFI, M., Saquaque, A., ALANSARI, A., Soulaïmani, A., 2011a. The Bou Azzer Cobalt-Nickel-Arsenic District (Central Anti-Atlas). Morocco, in: Main Mines of Morocco. p. 374.
- Maacha, L., Ennaciri, A., Saquaque, A., Soulaïmani, A., 2011b. Un gîte prometteur : le cuivre de Jbel N'Zourk (Anti-Atlas central), in: NEW GEOLOGICAL AND MINING GUIDEBOOKS OF MOROCCO. p. 374.
- MAACHA, L., ENNACIRI, O., EL GHORFI, M., BAOUTOUL, H., SAQUAQUE, A., 2011b. Le cuivre oxydé du J. La'sal (boutonnière d'El Graara, Anti-Atlas central).
- Maacha, L., Maamar, B., Kersit, M., Saquaque, A., Soulaïmani, A., 2011. Le cuivre de Bleïda (boutonnière de Bou Azzer-El Graara, in: NEW GEOLOGICAL AND MINING GUIDEBOOKS OF MOROCCO. p. 4.
- Maacha, L., Ouadjo, A., Azmi, M., Zouhair, M., Saquaque, A., Soulaïmani, A., 2011c. Bouskour Copper and Silver Mine (J. Saghro Inlier, Eastern Anti-Atlas). Maroc, in: NEW GEOLOGICAL AND MINING GUIDEBOOKS OF MOROCCO. p. 374.
- Maddi, A., Baoutoul, H., Maacha, L., Ennaciri, A., Soulaïmani, A., 2011. The Agjgal Mine of Southern Kerdous; Overview of the Stratabound Copper and Silver Deposits in the Western and Central Anti-Atlas, in: NEW GEOLOGICAL AND MINING GUIDEBOOKS OF MOROCCO. p. 374.
- Magaritz, M., Kirschvink, J.L., Latham, A.J., Zhuravlev, A.Y., Rozanov, A.Y., 1991. Precambrian/Cambrian boundary problem: Carbon isotope correlations for Vendian and Tommotian time between Siberia and Morocco. *Geology* 19, 847. doi:10.1130/0091-7613(1991)019<0847:PCBPCI>2.3.CO;2
- Malek, H.A., Gasquet, D., Bertrand, J.-M., Leterrier, J., 1998. Géochronologie U-Pb sur zircon de granitoïdes éburnéens et panafricains dans les boutonnières protérozoïques d'Igherm, du Kerdous et du Bas Drâa (Anti-Atlas occidental, Maroc). *Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. IIA - Earth Planet. Sci.* 327, 819–826. doi:10.1016/S1251-8050(99)80056-1
- Maloof, A.C., Porter, S.M., Moore, J.L., Dudás, F.Ö., Bowring, S.A., Higgins, J.A., Fike, D.A., Eddy, M.P., 2010. The earliest Cambrian record of animals and ocean geochemical change. *GSA Bull.* 122, 1731–1774. doi:10.1130/B30346.1
- Maloof, A.C., Schrag, D.P., Crowley, J.L., Bowring, S.A., 2005. An expanded record of Early Cambrian carbon cycling from the Anti-Atlas Margin, Morocco. *Can. J. Earth Sci.* 42, 2195–2216. doi:10.1139/e05-062
- Malusà, M.G., Polino, R., Feroni, A.C., Ellero, A., Ottria, G., Baidder, L., Musumeci, G., 2007. Post-Variscan tectonics in eastern Anti-Atlas (Morocco). *Terra Nova* 19, 481–489. doi:10.1111/j.1365-3121.2007.00775.x
- Michard, A., Beaucaire, C., Michard, G., 1987. Uranium and rare earth elements in CO₂-rich waters from Vals-les-Bains (France). *Geochim. Cosmochim. Acta* 51, 901–909. doi:10.1016/0016-7037(87)90103-7
- Michard, A., Hoepffner, C., Soulaïmani, A., Baidder, L., 2008. The Variscan Belt, in: Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Lamotte, D.F. de (Eds.), *Continental*

- Evolution: The Geology of Morocco, Lecture Notes in Earth Sciences. Springer Berlin Heidelberg, pp. 65–132. doi:10.1007/978-3-540-77076-3_3
- Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Lamotte, D.F. de (Eds.), 2008. Continental Evolution: The Geology of Morocco, Lecture Notes in Earth Sciences. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Mouttaqi, A., Sagon, J.-P., 1999. Le gisement de cuivre de Bleida (Anti-Atlas central); une interférence entre les processus de remplacement et d'exhalaison dans un contexte de rift. *Bleida Copp. Depos. Cent. Anti-Atlas Interf. Replace. Exhal* 536–537, 5–21.
- Nurmi, P.A., Kukkonen, I.T., Lahermo, P.W., 1988. Geochemistry and origin of saline groundwaters in the Fennoscandian Shield. *Appl. Geochem.* 3, 185–203. doi:10.1016/0883-2927(88)90007-8
- Oberthür, T., Melcher, F., Henjes-Kunst, F., Gerdes, A., Stein, H., Zimmerman, A., El Ghorfi, M., 2009. Hercynian age of the cobalt-nickel-arsenide-(gold) ores, Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco: Re-Os, Sm-Nd, and U-Pb age determinations. *Econ. Geol.* 104, 1065–1079.
- Ohle, E.L., 1985. Breccias in mississippi valley-type deposits. *Econ. Geol.* 80, 1736–1752. doi:10.2113/gsecongeo.80.6.1736
- Oukassou, M., Saddiqi, O., Barbarand, J., Sebti, S., Baidder, L., Michard, A., 2013. Post-Variscan exhumation of the central Anti-Atlas (Morocco) constrained by zircon and apatite fission-track thermochronology. *Terra Nova* 25, 151–159.
- Pan, J., Ma, D., Cao, S., 2004. Trace element geochemistry of the Lower Cambrian black rock series from northwestern Hunan, South China. *Prog. Nat. Sci.* 14, 64–70. doi:10.1080/10020070412331343161
- Paradis, S., Hannigan, P., Dewing, K., 2007. Mississippi valley-type lead-zinc deposits. *Spec. Publ. - Geol. Assoc. Can. Miner. Depos. Div.* 5, 185–204.
- Parnell, J., Mark, D.F., Frei, R., Fallick, A.E., Ellam, R.M., 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of exceptional concentration of metals by weathering of Precambrian rocks at the Precambrian–Cambrian boundary. *Precambrian Res.* 246, 54–63. doi:10.1016/j.precamres.2014.02.012
- Peters, S.E., Gaines, R.R., 2012. Formation of the “Great Unconformity” as a trigger for the Cambrian explosion. *Nature* 484, 363–366. doi:10.1038/nature10969
- Pique, A., Bouabdelli, M., Darboux, J.-R., 1995. Le rift cambrien du Maroc occidental. *Comptes Rendus Académie Sci. Sér. 2 Sci. Terre Planètes* 320, 1017–1024.
- Pique, A., Dahmani, M., Jeannette, D., Bahi, L., 1987. Permanence of structural lines in Morocco from Precambrian to Present. *J. Afr. Earth Sci.* 6, 247–256. doi:10.1016/0899-5362(87)90066-2
- Piqué, A., Soulaïmani, A., Hoepffner, C., Bouabdelli, M., Laville, E., Amrhar, M., Chalouan, A., 2007. *Géologie du Maroc, GEODE*. ed. Marrakech.
- Pouit, G., 1966. Paléogéographie et répartition des minéralisations stratiformes de cuivre dans l'anti atlas occidental. *Chron MinesRech Min* 279–289.
- Quesada, C., Dallmeyer, R.D., 1994. Tectonothermal evolution of the Badajoz-Córdoba shear zone (SW Iberia): characteristics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral age constraints. *Tectonophysics* 231, 195–213. doi:10.1016/0040-1951(94)90130-9
- Ramdohr, P., 1969. *The Ore Minerals and Their Intergrowths*. Pergamon Press.
- Ruiz, G.M.H., Sebti, S., Negro, F., Saddiqi, O., Frizon de Lamotte, D., Stockli, D., Foeken, J., Stuart, F., Barbarand, J., Schaer, J.P., 2011. From central Atlantic continental rift to Neogene uplift; western Anti-Atlas (Morocco). *Terra Nova* 23, 35–41. doi:10.1111/j.1365-3121.2010.00980.x
- Saadi, M., 1982. *Carte Structurale du Maroc*.

- Saadi, M., 1973. Le gisement de cuivre de Bleida (Graara, Anti-Atlas, Maroc), in: *The Copper Deposit of Bleida, Graara, Anti-Atlas, Morocco*. Masson & Cie, Paris, France, pp. 289–290.
- Saquaque, A., Admou, H., Karson, J., Hefferan, K., Reuber, I., 1989. Precambrian accretionary tectonics in the Bou Azzer-El Graara region, Anti-Atlas, Morocco. *Geology* 17, 1107. doi:10.1130/0091-7613(1989)017<1107:PATITB>2.3.CO;2
- Schmitt, M., Monninger, W., 1977. Stromatolites and Thrombolites in Precambrian/Cambrian Boundary Beds of the Anti-Atlas, Morocco: Preliminary Results, in: Flügel, E. (Ed.), *Fossil Algae*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 80–85.
- Schroder, S., Grotzinger, J.P., 2007. Evidence for anoxia at the Ediacaran-Cambrian boundary: the record of redox-sensitive trace elements and rare earth elements in Oman. *J. Geol. Soc.* 164, 175–187. doi:10.1144/0016-76492005-022
- Sdzuy, K., 1978. The Precambrian–Cambrian boundary beds in Morocco (Preliminary Report). *Geol. Mag.* 115, 83. doi:10.1017/S0016756800041133
- Sdzuy, K., Geyer, G., 1988. The base of the Cambrian in Morocco, in: Jacobshagen, V.H. (Ed.), *The Atlas System of Morocco*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp. 91–106.
- Sebai, A., Feraud, G., Bertrand, H., Hanes, J., 1991. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and geochemistry of tholeiitic magmatism related to the early opening of the Central Atlantic rift. *Earth Planet. Sci. Lett.* 104, 455–472. doi:10.1016/0012-821X(91)90222-4
- Sebti, S., Saddiqi, O., El Haimier, F.Z., Michard, A., Ruiz, G., Bousquet, R., Baidder, L., Frizon de Lamotte, D., 2009. Vertical movements at the fringe of the West African Craton: First zircon fission track datings from the Anti-Atlas Precambrian basement, Morocco. *Comptes Rendus Geosci.* 341, 71–77. doi:10.1016/j.crte.2008.11.006
- Service géologique de Bleida Somifer, 1982. Carte géologique du secteur de Bleida.
- Service Géologique du Maroc, 1985. Carte géologique du Maroc au 1/1 000 000.
- Skacel, J., 1993. Gisement cuprifère polygénétique de Tazalagh (Anti-Atlas occidental). *Mines Géologies Energ.* 54, 127–133.
- Soulaimani, A., Blein, O., Chévremont, P., Ouanaïmai, H., Hafid, A., Admou, H., Baudin, T., Bouabdelli, M., Razin, P., Abia, E.H., Beni Akhy, R., 2013. Notice explicative de la carte géologique du Maroc au 1/50 000, feuille d'Agadir Melloul. *Notes Mém. Serv. Géologique Maroc* 549 bis, 148.
- Soulaimani, A., Burkhard, M., 2008. The Anti-Atlas chain (Morocco): the southern margin of the Variscan belt along the edge of the West African craton. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 297, 433–452. doi:10.1144/SP297.20
- Soulaimani, A., Jaffal, M., Maacha, L., Kchikach, A., Najine, A., Saidi, A., 2006a. Modélisation magnétique de la suture ophiolitique de Bou Azzer–El Graara (Anti-Atlas central, Maroc). Implications sur la reconstitution géodynamique panafricaine. *Comptes Rendus Geosci.* 338, 153–160. doi:10.1016/j.crte.2005.10.001
- Soulaimani, A., Jaffal, M., Maacha, L., Kchikach, A., Najine, A., Saidi, A., 2006b. Modélisation magnétique de la suture ophiolitique de Bou Azzer–El Graara (Anti-Atlas central, Maroc). Implications sur la reconstitution géodynamique panafricaine. *Comptes Rendus Geosci.* 338, 153–160. doi:10.1016/j.crte.2005.10.001
- Soulaimani, A., Le Corre, C., Farazdaq, R., 1997. Déformation hercynienne et relation socle/couverture dans le domaine du Bas-Dra^a (Anti-Atlas occidental, Maroc). *J. Afr. Earth Sci.* 24, 271–284. doi:10.1016/S0899-5362(97)00043-2
- Soulaimani, A., Michard, A., Ouanaïmi, H., Baidder, L., Raddi, Y., Saddiqi, O., Rjimati, E.C., 2014. Late Ediacaran–Cambrian structures and their reactivation during the Variscan and Alpine cycles in the Anti-Atlas (Morocco). *J. Afr. Earth Sci.* 98, 94–112. doi:10.1016/j.jafrearsci.2014.04.025

- Steele-MacInnis, M., Bodnar, R.J., Naden, J., 2011. Numerical model to determine the composition of H₂O–NaCl–CaCl₂ fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 21–40. doi:10.1016/j.gca.2010.10.002
- Thomas, R., Barbin, V., Ramboz, C., Thirkell, L., Gille, P., Leveille, R., Ramseyer, K., 2009. Cathodoluminescence Instrumentation for Analysis of Martian Sediments, in: Gucsik, A. (Ed.), *Cathodoluminescence and Its Application in the Planetary Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 111–126.
- Thomas, R., Chevallier, L., Gresse, P., Harmer, R., Eglington, B., Armstrong, R., de Beer, C., Martini, J.E., de Kock, G., Macey, P., Ingram, B., 2002. Precambrian evolution of the Sirwa Window, Anti-Atlas Orogen, Morocco. *Precambrian Res.* 118, 1–57. doi:10.1016/S0301-9268(02)00075-X
- Thomas, R.J., Fekkak, A., Ennih, N., Errami, E., Loughlin, S.C., Gresse, P.G., Chevallier, L.P., Liégeois, J.-P., 2004. A new lithostratigraphic framework for the Anti-Atlas Orogen, Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 39, 217–226. doi:10.1016/j.jafrearsci.2004.07.046
- Vaughan, D.J., Sweeney, M.A., Friedrich, G., Diedel, R., Haranczyk, C., 1989. The Kupferschiefer; an overview with an appraisal of the different types of mineralization. *Econ. Geol.* 84, 1003–1027. doi:10.2113/gsecongeo.84.5.1003
- Vernhet, E., Youbi, N., Chellai, E.H., Villeneuve, M., El Archi, A., 2012. The Bou-Azzer glaciation: Evidence for an Ediacaran glaciation on the West African Craton (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Res.* 196–197, 106–112. doi:10.1016/j.precamres.2011.11.009
- Walsh, G.J., Aleinikoff, J.N., Benziane, F., Yazidi, A., Armstrong, T.R., 2002. U–Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic Tagragra de Tata inlier and its Neoproterozoic cover, western Anti-Atlas, Morocco. *Precambrian Res.* 117, 1–20. doi:10.1016/S0301-9268(02)00044-X
- Walsh, G.J., Benziane, F., Aleinikoff, J.N., Harrison, R.W., Yazidi, A., Burton, W.C., Quick, J.E., Saadane, A., 2012. Neoproterozoic tectonic evolution of the Jebel Saghro and Bou Azzer—El Graara inliers, eastern and central Anti-Atlas, Morocco. *Precambrian Res.* 216–219, 23–62. doi:10.1016/j.precamres.2012.06.010
- Walsh, G.J., Benziane, F., Burton, W.C., Yazidi, A., Saadane, A., Aleinikoff, J.N., Ejjaouani, H., Harrison, R.W., 2008. Mémoire explicatif de la carte géologique du Maroc au 1/50 000, feuille Bouskour. *Notes Mém. Serv. Géologique Maroc* 469 bis, 132.
- Wendt, J., 1985. Disintegration of the continental margin of northwestern Gondwana: Late Devonian of the eastern Anti-Atlas (Morocco). *Geology* 13, 815. doi:10.1130/0091-7613(1985)13<815:DOTCMO>2.0.CO;2
- Wendt, J., Aigner, T., Neugebauer, J., 1984. Cephalopod limestone deposition on a shallow pelagic ridge: the Tafilalt Platform (upper Devonian, eastern Anti-Atlas, Morocco). *Sedimentology* 31, 601–625. doi:10.1111/j.1365-3091.1984.tb01226.x
- Wille, M., Naegler, T.F., Lehmann, B., Schroeder, S., Kramers, J.D., 2008. Hydrogen sulphide release to surface waters at the Precambrian/Cambrian boundary. *Nat. Lond.* 453, 767–769. doi:10.1038/nature07072
- Zhang, Y.-G., Frantz, J.D., 1987. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaClKClCaCl₂H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geol.* 64, 335–350. doi:10.1016/0009-2541(87)90012-X
- Zwart, E.W., Touret, J.L.R., 1994. Melting behaviour and composition of aqueous fluid inclusions in fluorite and calcite; applications with the system H₂O–CaCl₂–NaCl. *Eur. J. Mineral.* 6, 773–786.

Table des figures

<i>Figure 1 : Frise d'évolution des différentes utilisations du cuivre à de sa découverte à aujourd'hui (modifié d'après « Copper Alliance » 2016)</i>	12
<i>Figure 2: courbe d'évolution du prix du cuivre de 1900 à 2014 (USGS)</i>	15
<i>Figure 3 : Pourcentage de la production de cuivre par pays en 2013 (Kelly and Matos, 2016)</i>	15
<i>Figure 4: Réserves mondiales de cuivre par pays producteurs (Kelly and Matos, 2016).</i>	16
<i>Figure 5: A : Carte géologique de l'Afrique de l'Ouest (modifiée d'après Fabre, 2005; Liégeois et al., 2005; Ennih and Liegeois, 2008). B : Carte des grandes provinces géologiques du Maroc (modifiée d'après Saadi, 1982).</i>	17
<i>Figure 6: Carte géologique du socle Précambrien de l'Anti-Atlas (modifiée d'après Hollard et al., 1985; Walsh et al., 2002; Gasquet et al., 2008; Blein et al., 2014).</i>	19
<i>Figure 7 : Cadre litho-stratigraphique du socle Panafricain et du groupe de Ouarzazate du sud du haut-Atlas et de l'Anti-Atlas (Álvaro et al., 2014). Les abréviations correspondent à des données de datations de différentes localités de l'Anti-Atlas compilées par Álvaro et al. (2014).</i>	22
<i>Figure 8: Carte géologique de la couverture tardi-Néoprotérozoïque à Paléozoïque de l'Anti-Atlas (modifiée d'après le Service Géologique du Maroc, 1985).</i>	24
<i>Figure 9 : A. Schéma géologique montrant les principales unités géologiques pré-Varisques du Maroc (Álvaro and Debrenne, 2010). B. Tentative de reconstruction des branches du rifting tardi-Ediacarien/Cambrien du Maroc, basée sur les isopaques et les centres volcaniques actifs publiés par (Choubert and Faure-Muret, 1970; Boudda et al., 1979; Benziane et al., 1983; Bernardin et al., 1988; Azizi Samir et al., 1990; Pique et al., 1995; Álvaro et al., 2008 ; Álvaro and Debrenne, 2010).</i>	25
<i>Figure 10 : Schéma paléogéographique du cycle sédimentaire adoudounien (modifié d'après Boudda et al., 1979).</i>	27
<i>Figure 11 : Schéma paléogéographique du bassin d'Adoudou lors du dépôt des formations de la « série Lie de Vin » et de Tikirt (Boudda et al., 1979).</i>	28
<i>Figure 12 : Dolomies Supérieures (Boudda et al., 1979).</i>	30
<i>Figure 13 : Grès supérieure (Boudda et al., 1979).</i>	31
<i>Figure 14 : Schéma des unités stratigraphiques de la transition néoprotérozoïque-cambrienne de l'Anti-Atlas et du Haut-Atlas (Álvaro et al., 2014).</i>	32
<i>Figure 15 : Coupe partant du bassin de la boutonnière de Tagragra d'Akka jusqu'au bassin de Tindouf (localisation sur Fig. 8). Cette coupe montre le raccourcissement lié à la compression Varisque et le rejeu de failles du socle (socle en rose) induisant des déformations dans la couverture néoprotérozoïque à paléozoïque (alternance de couches plissées sur le socle) (Burkhard et al., 2006).</i>	35
<i>Figure 16 : Les principales formations stratigraphiques de l'Anti-Atlas marocain (décrite dans la section 1.3.3.1), les cycles orogéniques et la déformation Varisque associée (Caritg, 2003). La présence de cuivre dans les formations, à l'échelle de l'Anti-Atlas, a été rajoutée au log (modifiée d'après Caritg, 2003).</i>	36
<i>Figure 17 : Carte géologique compilée d'après la littérature sur laquelle a été reporté l'ensemble des occurrences cuprifères en fonction de leur localisation : soit au sein du socle Précambrien, soit au sein de la</i>	

couverture néoproterozoïque à paléozoïque (Hollard et al., 1985; Service Géologique du Maroc, 1985; Benali, 1999; Walsh et al., 2002; Gasquet et al., 2008; Blein et al., 2014)	38
Figure 18 : Photographies des différentes textures de la minéralisation cuprifère de Bou Skour (El Azmi et al., 2014) : 1, minéralisation disséminée dans une andésite ; 2 : minéralisation en stockwork dans une andésite ; 3, texture bréchique ; 4, Texture de la minéralisation massive ; 5 et 6, textures rubanées de la minéralisation.	
Abréviations : Bn, bornite ; Ccp, chalcopryrite ; Dol, dolomite ; Py, Pyrite ; Qtz, quartz.	41
Figure 19 : Dessin de la minéralisation d'Alous (Leblanc, 1986) « A: Structure de l'ignimbrite rubanée avec des rubans à pyromérides de sulfures, des rubans chloriteux (gris) et des rubans d'ignimbrite non altérée (blanc), des rubans bréchiques et des brèches chloriteuses recoupant les rubanements; B: Disposition des sulfures dans les pyromérides: au cœur, en couronne interne, ou en bordure, la matrice des pyromérides est chloritisée (grisé). C: Détail des relations entre sulfure (1: bornite; 2:chalcocite), minéraux hydrothermaux associés (chlorite (c), albite (a), épidote (e), quartz (q)) et la structure de la pyroméride (structure de recristallisation fibroradiée de la matrice vitroclastique de l'ignimbrite) qui englobe des phénocristaux de feldspaths potassiques (f) et de quartz (q) »(d'après Leblanc, 1986)..	42
Figure 20: Schéma d'évolution de la surface sub-Cambrienne avec l'exposition de minéralisations Précambriennes du socle, lessivage de minéralisations supergènes et formation de paléoplayers au niveau de la transgression Cambrienne (Parnell et al., 2014).	43
Figure 21 : A : Tentative de reconstruction des branches du rift marocain tardi ediacrien-début cambrien, basée sur les isopaques et les centres volcaniques actifs, le diachronisme du rifting n'est pas représenté (Javier Álvaro, 2013). B et C : coupes schématiques, transverses et longitudinales, du rifting tardi ediacrien montrant le paléo-relief précédent le dépôt des dolomies de Tamjout (Javier Álvaro, 2013).	45
Figure 22 : Carte de l'Anti-Atlas occidentale montrant la localisation du niveau porteur de minéralisations cuprifères de Talat N'Ouamane et les isopaques de la formation de base (Pouit, 1966).	46
Figure 23 : Planches Photographiques en noir et blanc (d'après Elsass, 1975). A : Vue générale de l'horizon de Talat N'Ouamane au sein de la formation d'Adoudou. B : section polie montrant le contournement de banc ravinant du sédiment à lamination (Talat N'Ouamane). C : section polie montrant une lentille centimétrique de chalcocite et bornite, Horizon d'Iminirfi (Talat N'Ouamane) D : section polie montrant un filonnet minéralisé. A partir de l'éponte, calcite schistosée (Cal 1), à minéralisation de chalcopryrite puis deuxième génération de calcite fibreuse (Cal 2). Dans le sédiment, recristallisation de sulfures disséminés suivant la schistosité (Talat N'Ouamane). E : section polie montrant des micro-lentilles de chalcopryrite, frangées de cuivre gris et d'allanite, dans une argilite (Talat N'Ouamane). F : section polie montrant des micro-lentilles de chalcopryrite, frangées de cuivres gris et d'allanite, dans une argilite (indice d'Adar-Tafrent). G : section polie montrant une micro-lentille de chalcopryrite, frangée de cuivre gris et de quartz, dans une dolomie noire (Tazlaft).	48
Figure 24 : Schéma montrant l'association spatiale entre les minéralisations cuprifères de l'Anti-Atlas occidental et les paléo-relief (Pouit, 1966).	49
Figure 25 : Carte et coupes schématiques de la zone minéralisée du gisement de Jbel N'Zourk, les coupes C1, C2, C3 et C4 ont été respectivement effectuées du sud vers le nord le long de la zone plissée de Jbel N'Zourk (modifiées d'après Clavel and Leblanc, 1971).	49

Figure 26 : Photographie d'un échantillon provenant d'un sondage carotté réalisé dans le gisement de Ouansimi (H. Baoutoul, 2014).	51
Figure 27 : Coupe géologique du secteur minéralisé d'Oumjrane, d'après Popov & Belkasm (1983).	52
Figure 28 : Photographies macroscopiques de la minéralisation cuprifère d'Oumjrane (Kharis et al., 2011): A, échantillon du filon montrant la phase à chalcopryrite 2 recoupée par celle à barytine ; B, brèche à fragments d'encaissant gréseux cimentés par de la chalcopryrite et du quartz.	53
Figure 29 : A : localisation de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara au Maroc ; B : Carte géologique et métallogénique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara avec la localisation des principales mines (pour le socle Précambrien : modifié d'après Leblanc, 1975; Soulaimani et al., 2013; pour la couverture infracambrienne à cambrienne : cette étude).	57
Figure 30 : Log synthétique de la couverture néoprotérozoïque à cambrienne de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (Choubert, 1952; Boudda et al., 1979; Soulaimani et al., 2013).	59
Figure 31 : Carte géologique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara avec la localisation des différents sites étudiés au sein de la couverture néoprotérozoïque à cambrienne (pour le socle Précambrien : modifié d'après Leblanc, 1975; Soulaimani et al., 2013; pour la couverture infracambrienne à cambrienne : cette étude).	63
Figure 32 : Photographie des falaises Adoudouniennes de la localité de Ech Chguig (Nord Est de la mine de Bleida).	67
Figure 33 : Planche photographique du niveau porteur minéralisé en cuivre au sein de la formation d'Adoudou. A, niveau minéralisé de l'indice de Oued R'Them ; B, niveau bréchique de base du niveau porteur de l'indice de Oued R'Them ; C, rognon siliceux au sein des dolomies noires du niveau porteur ; D, zoom sur un échantillon du niveau bréchique de base de l'indice de Oued R'Them ; E, niveau bréchique de base du niveau porteur minéralisé de l'indice de Tizi N'Mekraz ; F, niveau porteur de Tizi N'Mekraz, G, zoom sur le niveau bréchique de base du niveau porteur minéralisé de l'indice de Tizi N'Mekraz.	68
Figure 34 : A, Carte géologique de l'indice de Oued R'Them ; B, Coupe géologique passant par les indices de Oued R'Them et d'Assif N'Zaïd.	70
Figure 35 : Photographies du niveau régional à slump au sein de la formation d'Adoudou (A, B).	70
Figure 36 : A, Carte géologique de l'indice de Tizi N'Mekraz (Coeffic, 2012), l'essentiel des failles et des plis ont été cartographiés par l'interprétation d'images satellites ; B, coupe schématique du niveau porteur de Tizi N'Mekraz.	71
Figure 37 : A, Carte géologique de Chaa'b Lhamrat ; B, coupe géologique du secteur de Chaa'b Lhamrat avec la projection des teneurs moyennes en cuivre du niveau porteur (Bourque, 2013).	72
Figure 38 : Photographies de structures siliceuses diagénétiques de l'indice de Chaa'b Lhamrat.	73
Figure 39 : Photographies des plis locaux de l'indice de Tizi N'Mekraz.	73
Figure 40 : Planche photographique des structures de déformation de l'indice de Chaa'b Lhamrat. A, charnière d'anticlinal de direction N140 ; B, failles de direction WNW-ESE de faible extension latérale recoupant le niveau porteur minéralisé ; C, Faille de direction NW-SE à jeux inverses associées à des plis en crochons ; D, Failles de direction N140 d'extension kilométrique ; E, Failles de direction N140 d'extension kilométrique avec une verticalisation des couches sédimentaires ; F, niveau minéralisé plissé par des plis orientés NW-SE.	74

- Figure 41 : Canevas de Schmidt avec les projections (hémisphère inf.) des données structurales des sites minéralisés de type « stratabound », avec « n » le nombre de mesures. _____ 75
- Figure 42 : Planche photographique montrant les différentes texture associées à la minéralisation de l'indice de Oued'Rthem. A, rognons siliceux du niveau porteur présentant des mouches et fissures à malachite ; B, géode en amande parallèle à la stratification, au toit du niveau porteur minéralisé; C, géode en amande parallèle à la stratification au toit du niveau porteur minéralisé et connectée à des veines sécantes sur la stratification; D, E et F, stockwork à bornite au sein du niveau porteur. _____ 76
- Figure 43 : Planche photographique montrant les différentes textures associées à la minéralisation de l'indice de Tizi N'Mekraz. A, veines du stockwork à quartz en peigne et malachite, sécantes sur le plan de la stratification (la photographie a été prise parallèlement à la S0) ; B, entrée d'une galerie de direction N140° dans le banc de dolomies noires inférieur du niveau porteur ; C, niveau bréchique parallèle à la stratification sur un parement de la galerie ; C', schéma extrait du carnet de terrain de la paroi de la galerie ; D, échantillons de la brèche parallèle à la stratification, prélevés dans la galerie, à fragments anguleux de dolomies dans une matrice de quartz, dolomite, chalcocite, malachite et oligiste ; E, stylolites parallèles et perpendiculaires à la stratification au sein du niveau porteur ; F, stylolite à malachite au sein du niveau porteur minéralisé. _____ 78
- Figure 44 : Planche photographique montrant les différentes texture associées à la minéralisation de l'indice de Tizi N'Mekraz. A, Vue du dessus du niveau porteur minéralisé découpé en "puzzle" par les veines du stockwork et connexion entre des nodules et le stockwork ; B, vue en coupe d'un nodule à quartz et chalcocite connecté à une veine de quartz sécante sur la stratification ; C, alignement de nodules le long d'une veine du stockwork minéralisé ; D, connexion entre le stockwork minéralisé et les nodules minéralisés ; E, concentration de nodules minéralisés au niveau du croisement de veines du stockwork minéralisé. _____ 79
- Figure 45 : Planche photographique montrant les différentes texture associées à la minéralisation de l'indice de Chaa'b Lhamrat. A, niveau porteur minéralisé de Chaa'b Lhamrat ; B, faciès à nodules de la partie supérieure du niveau porteur minéralisé ; C, stockwork à chalcocite sécant sur la stratification au sein du niveau porteur minéralisé ; D, stockwork à dolomite et chalcocite ainsi que des disséminations de sulfures dans la dolomie ; E, nodules à quartz et malachite de la partie supérieure du niveau minéralisé ; F, stockwork du niveau porteur minéralisé ; G, veine du stockwork à quartz aux épontes et dolomite et malachite au cœur ; H, veines du stockwork du niveau porteur minéralisé. Cc: chalcocite, Bn: bornite, Cpy: chalcopyrite. _____ 80
- Figure 46 : Planche photographique des textures des veines du stockwork associé à la minéralisation au sein des trois indices de types « stratabound ». _____ 81
- Figure 47 : Canevas de Schmidt avec les projections (hémisphère inf.) des données d'orientation des veines du stockwork minéralisé en cuivre des sites minéralisés de type « stratabound », avec « n » le nombre de mesures (classe de 10°, 30 % des données sont représentées du centre à la périphérie du canevas) . _____ 82
- Figure 48: Carte géologique du secteur de Jbel Laassel (la montagne de miel) et d'Amekssa (le berger) (modifiée d'après (Kersit, 1984). _____ 83
- Figure 49 : A, Carte géologique du secteur d'Amekssa (modifiée d'après (Bourque, 2013). B, Carte Géologique du secteur de Jbel Laassel (modifiée d'après (Kersit, 1984). _____ 85

- Figure 50 : Coupe géologique (section A-A' sur la **figure 49.B**) montrant les limites des corps minéralisés ainsi que les abondances minéralogiques, observées sur les sondages carottés et en lame mince, représentées sous la forme de spider diagramme. Les abondances sont exprimées du centre vers les bords par 5 paliers : (1) au centre, absent, (2) en trace, (3) fréquent, (4) abondant, (5) aux extrémités du spider diagramme, très abondant. _____ 86
- Figure 51 : Coupe géologique (section B-B' sur la **figure 49.B**) montrant les limites des corps minéralisés ainsi que les abondances minéralogiques, observées sur les sondages carottés et en lame mince, représentées sous la forme de spider diagramme. Les abondances sont exprimées du centre vers les bords par 5 paliers : (1) au centre, absent, (2) en trace, (3) fréquent, (4) abondant, (5) aux extrémités du spider diagramme, très abondant. _____ 87
- Figure 52 : Carte géologique et gîtologique de l'indice d'Assif N'Zaïd. _____ 88
- Figure 53 : A et B, Levés de surface dans la partie nord-ouest (AA') et dans la partie sud-est (CC') l'indice d'Assif N'Zaïd ; C, levé de tranchée (B'B) dans la partie centrale de l'indice d'Assif N'Zaïd (localisation **figure. 52**). ____ 89
- Figure 54 : A, carte géologique du gîte de Jbel N'Zourk ; B, coupe schématique du secteur de Jbel N'Zourk. ____ 90
- Figure 55 : Planche photographique des types de plis de direction N140 à N160. A, anticlinal en genou déjeté vers le SW de Jbel Laassel ; B, anticlinal droit et isopaque de Jbel Laassel ; C, synclinal ouvert isopaque de l'indice d'Amekssa ; D, plis crochons au contact de la faille de l'indice d'Amekssa ; E, anticlinal en genou du gîte de Jbel N'Zourk ; F, anticlinal déversé du gîte de Jbel N'Zourk ; G, anticlinal isopaque et droit de l'indice d'Assif N'Zaïd ; H, anticlinal isopaque et droit, d'amplitude décimétrique, de l'indice de Assif N'Zaïd. _____ 91
- Figure 56 ; Planche photographique illustrant les relations entre les veines du stockwork cuprifère et les plis de la « folded-band » (prise au niveau du gisement de Jbel N'Zourk) : A, anticlinal avec une ouverture en « saddle reef » minéralisée au niveau de la charnière ; B, flanc sud-est du pli de la figure A montrant des veines perpendiculaire au flanc ; C, zoom sur un échantillon orienté du niveau de siltites intercalé entre les deux bancs de dolomies du flanc de plis de la figure B, une sigmoïde indiquant un jeu inverse est observée. _____ 92
- Figure 57 : Planche photographique des plis de directions N30 : A, Vue du synclinal kilométrique associé au chevauchement à vergence SE qui affecte le secteur du gisement de Jbel Laassel ; B, pli ouvert à proximité de l'indice d'Assif N'Zaïd ; C, plis ouvert à proximité de l'indice d'Amekssa. _____ 93
- Figure 58 : Planche photographique montrant les failles majeures des différents sites de type « folded-band » : A, Jbel Laassel ; B, Amekssa ; C, Assif N'Zaïd ; D, Jbel N'Zourk. _____ 94
- Figure 59 : Planche photographique : A, zone de brèche dans une tranchée de l'indice d'Amekssa ; B et C, zone de brèche dans la tranchée de la figure XC de l'indice d'Assif N'Zaïd ; D, fragment pluri-métrique de grès de la formation de Tikirt au sein de la structure faillée d'Assif N'Zaïd. _____ 95
- Figure 60 : Planche photographique des différentes textures et micro-structures observées sur les indices de type « folded-band » : A, fentes de tension à remplissage de quartz observées sur la charnière d'un anticlinal de la « folded-band » de l'indice d'Assif N'Zaïd ; B, micro-faille parallèle au plan de S0, à remplissage de dolomite et de calcite, de l'indice d'Amekssa ; C, texture de brèche hydraulique de l'indice de Jbel N'Zourk ; D, fentes de tension en échelon, à remplissage de carbonate, du gisement de Jbel Laassel ; E, recoupement de veines en mouvement apparent inverse sur un échantillon de sondage carotté du gisement de Jbel Laassel ; F, stockwork à

quartz et chalcocite sécant sur les plans de S0 et percolant dans ces derniers sur un échantillon de sondage carotté du gisement de Jbel Laassel ; G, texture de brèche hydraulique sur un échantillon de sondage carotté du gisement de Jbel Laassel.	96
Figure 61 : Canevas de Schmidt avec les projections (hémisphère inf.) des données structurales des sites minéralisés de type « folded-band », avec « n » le nombre de mesures.	98
Figure 62 : Graphiques binaires montrant les résultats de l'optimisation des contraintes pour les contraintes sigma 1, 2, 3 et pour la valeur de stabilité de R'. Chaque graphique représente les valeurs d'optimisation de la fonction F5 en fonction de l'angle de rotation des contraintes. Une régression linéaire a été effectuée, la valeur minimale d'optimisation de F5 indique le meilleur angle de rotation des contraintes optimisées. Ces graphiques sont le résultat de l'analyse des données de 25 plans de failles striées mesurés dans la carrière d'exploitation du gisement de Jbel Laassel à l'aide du logiciel Wintensor V5.8.2 (Delvaux and Sperner, 2003).	99
Figure 63 : Planche graphique des résultats du calcul des contraintes optimisées par le logiciel Wintensor V5.8.2 (Delvaux and Sperner, 2003) sur l'analyse des données de 25 plans de failles striées mesurés dans la carrière d'exploitation du gisement de Jbel Laassel. Les flèches bleues représentent sigma 1.	100
Figure 64 : Planche photographique des textures du gisement de Jbel Laassel et de l'indice d'Amekssa : A, stockwork à calcite et dolomite sur un échantillon de sondage carotté ; B, stockwork à dolomite et chalcocite sur un échantillon de sondage carotté ; C, stockwork à quartz, dolomite et chalcocite ; D, stockwork à calcite et malachite ; E, minéralisation disséminée de chalcocite d'un échantillon de sondage carotté ; F, minéralisations disséminées à chalcocite connectées à des veines du stockwork à chalcocite d'un échantillon de sondage carotté.	101
Figure 65 : Planche photographique des textures observées au niveau de l'indice d'Assif N'Zaïd : A, stockwork à calcite et malachite recoupant et réempruntant les plans de stratification d'un banc de dolomie ; B, stockwork à dolomite et bornite.	102
Figure 66 : Planche photographique des textures observées au niveau du gisement de Jbel N'Zourk.	103
Figure 67 : Canevas de Schmidt avec les projections (hémisphère inférieure), des données d'orientation des veines des stockwork minéralisés en cuivre des différents sites de type « folded-band », avec « n » le nombre de mesures (classe de 10°, 30 % des données sont représentées du centre à la périphérie du canevas).	104
Figure 68 : Carte géologique de la boutonnière e Bou Azzer-El Graara avec la localisation des panoramas réalisés.	105
Figure 69 : Planche photographique (la localisation des paysages est donnée figure 68). A, Vue des niveaux de décollement au sein de la formation d'Adoudou au nord de l'indice de Chaa'b Lhamrat ; B, Vue du niveau porteur de l'indice d'Ech Chguig et d'un niveau de décollement au sein de la formation d'Adoudou ; C et D, zoom sur le niveau de brèche marquant le niveau de décollement repéré sur la figure B ; E, Vue du niveau de décollement entre la formation de Ouarzazate et la formation d'Adoudou situé au nord-ouest du gisement de Jbel N'Zourk.	106
Figure 70 : Photographie du niveau de décollement de la formation d'Adoudou sur le groupe de Ouarzazate au niveau de la charnière de l'anticlinal de la boutonnière d'Alougoum (la localisation du paysage est donnée figure 68).	107

Figure 71 : Planche photographique de la faille de Jbel N'Zourk et de son extension vers le nord, respectivement du sud vers le nord : A, B et C (la localisation des paysages est donnée figure 68). _____	108
Figure 72 : Planche photographiques des panoramas réalisés depuis la zone de Bou Offroh (la localisation des paysages est donnée figure 68) : A, chevauchement en duplex au sein de la formation d'Adoudou et niveau de décollement au sein de la formation d'Adoudou mais aussi sur la formation de Ouarzazate, situé au sud de la zone de Bou Offroh ; B, Vue d'un chevauchement de la formation d'Adoudou sur la formation de Ouarzazate, situé au nord-ouest du secteur de la mine de Bou Azzer ; C, Vue de failles passant de la formation de Ouarzazate à la formation d'Adoudou dans laquelle se sont formés des plis (nord de la zone de Bou Offroh). _____	110
Figure 73 : Planche photographique des zones de passages de l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas dans la couverture néoproterozoïque à cambrienne (la localisation des paysages est donnée figure 68) : A, faille passant de la formation de Ouarzazate à la formation d'Adoudou, plissement de celle -ci et niveau de décollement au niveau de la zone de Bou Offroh ; B, faille passant du socle protérozoïque à la formation de Ouarzazate et à la formation d'Adoudou, folded band dans la formation d'Adoudou recoupé par un décollement au niveau de la zone de Oued N'Khal ; C, faille mettant en contact le socle protérozoïque et la formation de Ouarzazate de la zone de Oued N'Khal. _____	111
Figure 74 : Planche photographique prise au niveau du passage de l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas (AMAA) dans la couverture néoproterozoïque à cambrienne (la localisation des paysages est donnée figure 68) : A, Lambeau appartenant au groupe de Feïja, contenant localement des traces de malachite, en contact anormal avec la formation d'Adoudou ; B, extension vers l'est de la déformation au niveau du passage de l'AMAA avec la présence de lambeau de roches appartenant à la formation des grès de Tikirt et du groupe de Feïja en contact anormal avec la formation d'Adoudou. _____	112
Figure 75 : Canevas de Schmidt avec les projections, depuis l'hémisphère nord, des données structurales des orientations des failles et des stries associées mesurées au niveau de l'AMAA. _____	113
Figure 76 : Carte géologique de surface des secteurs minéralisées du gisement de Bleida (modifié d'après Service géologique de Bleida Somifer, 1982). _____	114
Figure 77 : Photographies montrant l'association spatiale entre les failles N70 de Bleida et la minéralisation de la zone sud (amas 2) cuprifère ainsi que la relation entre faille et S1. _____	115
Figure 78 : Planche photographique synthétisant les différentes textures et structures observées sur les sondages carottés de la zone nord du gisement de Bleida : A, les trois générations de pyrites au sein du niveau pyriteux minéralisé ; B, stockwork à chalcopryrite et dolomite sécant sur la S1 ; C stockwork à quartz et chalcopryrite sécant sur le plissement de la S1. _____	116
Figure 79 : Planche photographique synthétisant les différentes textures et structures observées sur les sondages carottés de la zone Sud du gisement de Bleida : A, stockwork à bornite, chalcopryrite bréchifiant l'encaissant ainsi qu'une veine à quartz ; B, veine à quartz et dolomite sécante sur le stockwork à chalcopryrite ; C, Stockwork à chalcopryrite sécant sur l'encaissant et sur une veine à quartz ; veine à quartz et chalcopryrite recoupant sur la S1. _____	117
Figure 80 : Carte géologique du secteur Est de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara superposé aux photographie satellite montrant la localisation de trois indices cuprifères du socle Protérozoïque. _____	118

Figure 81 : Planche photographique des observations morphologiques de l'indice de Garat En Nous : A, corps minéralisés sous forme de lentilles ; B, corps minéralisés parallèles ; C, encaissant plissé à proximité des lentilles minéralisées en cuivre ; D, aperçu d'une lentille minéralisée. _____ 119

Figure 82 : Planche photographique des observations réalisées en tranchée au niveau de l'indice minéralisé de Tanaladat : A, altération silico-carbonatée recoupant la schistosité S1 de l'encaissant ; silicification et carbonatation de l'encaissant plissée ; C, plissement de la schistosité S1 observé systématiquement à proximité des zones minéralisées en cuivre ; D, échantillon prélevé au niveau de l'encaissant ayant subi une altération silico-carbonatée, présence d'ankérite brune et de quartz en remplissage de fissure ; E, stockwork recoupant l'encaissant protérozoïque à remplissage blanchâtre observé à proximité de la zone minéralisée en cuivre ; F, bande noire au sein des zones à altération silico-carbonatée composée de bornite et de chalcopryrite ; G, stockwork à quartz et chalcopryrite recoupant l'encaissant. _____ 120

Figure 83 : Planche photographique des observations réalisées en tranchée au niveau de l'indice minéralisé de Belgrade : A, lentilles minéralisée vue en coupe connecté à un stockwork à remplissage blanchâtre sécant sur le socle protérozoïque encaissant ; B, altération blanchâtre au contact des corps minéralisés en cuivre. C, plissement de la schistosité S1 observé systématiquement à proximité des zones minéralisées en cuivre ; D, limite de l'altération blanchâtre associée à la minéralisation cuprifère recoupant le plissement de la schistosité S1. _____ 121

Figure 84 : Canevas de Schmidt avec les projections en hémisphère inférieur des données structurales mesurées au niveau des indices de Tanaladat, Belgrade et Garat En Nous, avec « n » le nombre de mesures. _____ 122

Figure 85 : Planche photographique des observations microscopiques effectuées sur les rognons siliceux de la formation d'Adoudou (Fig. X chapitre terrain) : A, quartz micro-cristallin intercalé dans la S0 (LT, nic. //); B, cristal de dolomite montrant des bords corrodés et cicatrisés (cimenté) par le quartz microcristallin (LT, nic. +) ; C, Deux générations de quartz microcristallin (LT, nic. +) ; D, veines à quartz et à sulfures de cuivre recoupant un rognon siliceux (LT, nic. +) ; E, quartz microcristallin et sulfures de cuivre (LT, nic. +) ; E', sulfures de cuivre connecté à travers un réseau de fractures sécantes sur les rognons siliceux (LR, nic. //). Abréviations : **LT**, lumière transmise ; **LR**, lumière réfléchie ; **nic. //**, Nicols parallèles ; **nic. +**, Nicols croisés ; **S0**, plan de stratification ; **Cc**, chalcocite ; **Cv**, covellite ; **Dg**, digénite ; **Dol**, dolomite. _____ 128

Figure 86 : Planche photographique des minéraux de gangues associés à la minéralisation de type « stratabound » : A, Quartz sur les bords et dolomite au cœur d'une géode de l'indice de Oued R'Them (LT, nic. +) ; B, veine, sécante sur la S0, à quartz sur les épontes et dolomites au cœur de l'indice de Oued R'Them (LT, nic. +) ; C, géode à quartz et sulfures de cuivre au cœur de l'indice de Tizi N'Mekraz (LT, nic. //) ; D, veine, sécante sur la S0, à quartz sur les épontes et dolomites au cœur, de l'indice de Tizi N'Mekraz (LT, nic. +). Abréviations (Cf. légende Fig. 85)et **Qtz**, quartz. _____ 129

Figure 87 : Planche photographique des sulfures observés au sein de la minéralisation de type « stratabound » : A, bornite en inclusions dans un cristal de dolomite d'une géode (LR, nic. //) ; B, chalcopryrite en inclusion dans un cristal de quartz d'une veine (LR, nic. //) ; C, veine de calcite sécante sur la S0 (LT, nic. //) ; C', veine de dolomite et chalcopryrite sécante sur la S0 (LR, nic. //) D, bornite et chalcopryrite disséminées dans la dolomie (LR, nic. //) ; E, chalcocite disséminée dans la dolomie (LR, nic. //) ; F, veine à chalcocite, sécante sur la S0 (LR,

nic. //) ; G, chalcocite au cœur d'une géode à quartz et dolomite (LR, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85 et 86**) : **Bn**, bornite et **Cal**, calcite ; **Cpy**, chalcopryrite. _____ 130

Figure 88 : Planche photographique des minéraux supergènes de l'indice de Oued R'Them : A, veine de malachite sécante sur la SO (LT, nic. //) ; B, veine à dolomite et malachite sécante sur la SO (LT, nic. //) ; C, malachite en bordure de sulfure au sein d'une géode à quartz et dolomite (LT, nic. //) ; C', malachite en bordure de chalcocite au sein d'une géode à quartz et dolomite (LR, nic. //) ; D, remplacement d'un cristal de chalcocite par de la malachite suivant des plans de clivage hexagonaux de la chalcocite (LR, nic. //) ; E, fracture à cuivre natif sécante sur un rognon siliceux (LT, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86 et 87**) et **Cc1**, chalcocite primaire ; **Cu**, cuivre natif ; **Mal**, malachite. _____ 132

Figure 89 : Planche photographique des observations microscopiques des différentes textures observées sur l'indice de Oued R'Them : A (LT, nic. //) et A' (LR, nic. //), bornite remplissant un réseau de fissures sécant sur la SO ; B (LT, nic. //) et B' (LR, nic. //), réseau de fissures connectant les disséminations de chalcocite entre elles ; C (LT, nic. //) et C' (LR, nic. //), veine à quartz et chalcocite sécante sur un rognon siliceux et connecté via un réseau de fissures aux chalcocite disséminées dans le quartz microcristallin ; D (LT, nic. //) et D' (LR, nic. //), réseau de fissures connectant les disséminations de chalcocite au sein de la dolomie. Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 133

Figure 90 : Planche photographique des observations microscopiques, des différentes textures observées sur l'indice de Oued R'Them : A, terminaison d'une veine à dolomite sécante sur la SO en fine micro-veine de dolomite au sein de la dolomie (LT, nic. //) ; B, veine à calcite et sulfures recoupée par un micro- karst (LT, nic. //) ; C (LT, nic. //) et C' (LR, nic. //), stylolites et réseau de fissure à chalcocite, D (LT, nic. //) et D' (LR, nic. //), stylolites et réseau de fissure à chalcocite et malachite ; E (LT, nic. //) et E' (image en cathodoluminescence, 13 mV, 98 mA et 2s), texture de micro-brèche hydraulique à fragments anguleux de dolomie, cimentées par du quartz et de la dolomite. Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 135

Figure 91 : Planche photographique des observations texturales effectuées au microscope à cathodoluminescence : A (LT, nic. //) et A' (12,7 mV, 112mA et 2s), veine à quartz et dolomite reliée à un réseau de veinules à quartz et/ou dolomite connectant les sulfures disséminées dans la dolomie ; B (LT, nic. //) et B' (15,1 mV, 144 mA et 0,5s), micro-stockwork sécant sur la SO au sein de la dolomie ; C (LT, nic. //) et C' (15 mV, 116 mA et 0,5s), texture de brèche hydraulique à fragments de dolomie cimentés par du quartz de la dolomite, de la chalcocite, de la calcite et de la malachite ; D (LT, nic. //) et D' (14,9 mV, 122 mA et 1s), texture de brèche hydraulique à fragments de dolomie cimentés par du quartz de la dolomite et de la calcite. Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 136

Figure 92 : Succession paragéométrique des indices de Oued R'Them, Tizi N'Mekraz et Chaa'b Lhamrat. _____ 137

Figure 93 : Planche photographique des minéraux de gangues associés à la minéralisation de type « folded band » : A, veine du stockwork du gisement de Jbel Laassel à quartz sur les épontes, dolomite et calcite au cœur (LT, nic. +) ; B, veine du stockwork de l'indice d'Amekssa à quartz sur les épontes, dolomite et calcite au cœur (LT, nic. +) ; C, veine du stockwork de l'indice d'Assif N'Zaïd à quartz sur les épontes, dolomite et calcite au cœur (LT, nic. +) ; D, veine du stockwork du gisement de Jbel N'Zourk à quartz sur les épontes et dolomite au cœur (LT,

nic. +) ; E, veine du stockwork du gisement de Jbel N'Zourk à dolomite sur les épontes et calcite au cœur (LT, nic. +). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86 et 87**). _____ 138

Figure 94 : Planche photographique des sulfures observés au niveau du gisement de Jbel Laassel : A, bornite en inclusion dans un cristal de quartz (LR, nic. //) ; B, bornite en inclusion dans un cristal de dolomite (LR, nic. //) ; C, bornite entre du quartz et de la dolomite (LR, nic. //) ; D, chalcocite cimentant des cristaux de quartz et de dolomite (LR, nic. //) ; E, clivage hexagonaux de la chalcocite soulignés par le remplacement de la chalcocite par de la malachite (LR, nic. //) ; F, clivage hexagonaux de la chalcocite soulignés par le remplacement de la chalcocite par de la malachite (LR, nic. //) ; G, dissémination de chalcocite et malachite connectées entre elles par des micro-veinules (LR, nic. //) ; H, chalcopryrite et bornite associée à de la calcite (LR, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 139

Figure 95 : Planche photographique des sulfures les plus présents dans les autres minéralisations de type « folded-band » : A, veine, de l'indice d'Amekssa, à chalcocite au centre, du quartz puis dolomite à l'éponte (LR, nic. //) ; B, veine, de l'indice d'Amekssa, à calcite et bornite (LR, nic. //) ; C, veine, de l'indice d'Assif N'Zaïd, à chalcocite au cœur et quartz à l'éponte (LR, nic. //) ; D, veine, de l'indice d'Assif N'Zaïd, à bornite et calcite (LR, nic. //) ; E, veine, du gisement de Jbel n'Zouk, à chalcocite et dolomite (LR, nic. //) ; F, veine, du gisement de Jbel n'Zouk, à chalcopryrite et calcite (LR, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 141

Figure 96 : Planche photographique des minéraux supergènes du gisement de Jbel Laassel : A, veine à malachite et chrysocolle (LT, nic. //) ; B, veine à malachite et cuprite (LT, nic. //) ; C, veine à dolomite remplacée par de la malachite (LT, nic. //) ; D, veine à cuprite et tenorite (LR, nic. //) ; E, Veine à dolomite montrant des textures en golfe de corrosion cicatrisés par de la chrysocolle (LR, nic. +) ; F, chrysocolle montrant des textures de « mudcracks » (LR, nic. //) ; G, Veine à cuprite, tenorite et cuivre natif (LR, nic. //). Abréviations : Ccl, chrysocolle ; Cup, cuprite ; Ten, tenorite (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 142

Figure 97 : Planche photographique des observations microscopiques des différentes textures observées sur les minéralisations de type « folded-band » : A, veine à quartz en peigne du gisement de Jbel Laassel (LT, nic. +) ; B, veine à quartz et dolomite, du gisement de Jbel Laassel, connectée à un micro-stockwork de veinule à quartz, dolomite et chalcocite (LT, nic. //) ; C (LT, nic. //) et C' (LR, nic. //), veine, du gisement de Jbel Laassel, à quartz et chalcocite, sécante sur l'encaissant qui contient lui-même des chalcocites disséminées, connectées localement à la veine ; D, texture de micro-brèche cocarde au sein de veine du stockwork du gisement de Jbel Laassel, à élément de siltite cimentés par quartz, dolomite puis chalcocite (LT, nic. //) ; E, veinule de chalcocite et chalcocite disséminée dans l'encaissant du gisement de Jbel Laassel (LR, nic. //) – une vue à plus fort grossissement est donnée dans la figure 14 ; F, indice d'Amekssa, veine montrant des texture de micro-brèche hydraulique à fragment de dolomie cimentés par du quartz, de la dolomite et de la calcite de (LT, nic. //) ; G, indice d'Assif N'Zaïd, veine montrant des textures de micro-brèche hydraulique à fragment de dolomie cimentés par du quartz, de la chalcocite et de la malachite (LT, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 144

Figure 98 : Photographies prises au MEB des minéralisations disséminées du gisement de Jbel Laassel (Fig. 13E) : A, image en BSE d'une micro-veine (100 µm d'épaisseur) composée de quartz, de dolomite et de chalcocite ; B ;

image en BSE d'une micro-veine (25 µm d'épaisseur) composée de quartz, de dolomite et de chalcocite.

Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 145

Figure 99 : Planche photographique des différentes textures observées au niveau des minéralisations de type « folded-band » : A, micro-veinule de dolomite connectée à une veine à quartz et dolomite du stockwork minéralisé de l'indice d'Amekssa (LT, nic. //) ; B, micro-géode (au centre de la photo), de l'indice d'Amekssa, à quartz et chalcocite connecté à un réseau de micro-veines (LT, nic. //) ; C, connexion entre deux veines, du stockwork minéralisé d'Assif N'Zaïd, à quartz via un réseau de micro-veines de quartz (LT, nic. +) ; D, terminaisons en micro-veines de deux veines à quartz, du stockwork minéralisé d'Assif N'Zaïd (LT, nic. //) ; E, veine à quartz et malachite, de l'indice d'Assif N'Zaïd, recoupant la S0 et la décalant en jeux inverse (LT, nic. //) ; F, veine à dolomite, du gisement de Jbel N'Zourk, connectée à un fantôme de pyrite remplacé par de la dolomite (LT, nic. //). Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 146

Figure 100 : Planche photographique des observations texturales effectuées au microscope à cathodoluminescence sur des échantillons du gisement de Jbel Laassel : A (LT, nic. //) et A' (15 mV, 132 mA et 15s), veine à quartz et chalcocite ainsi qu'à silice amorphe (couleur bleue) ; B (LT, nic. //) et B' (13,7 mV, 136 mA et 6s), fracture à chalcocite avec l'encaissant silicifié de part et d'autre de la fracture et connexion avec d'autres fractures ; C (LT, nic. //) et C' (14,5 mV, 120 mA et 5s), veine à calcite et malachite, encaissant silicifié et chevelu de quartz associé à la silicification de l'encaissant ; D (LT, nic. //) et D' (13,4 mV, 128 mA et 4s), stockwork à quartz, dolomite et calcite bréchifiant la roche encaissante et montrant des textures de micro-brèche hydraulique. Abréviations (Cf. légende **Fig. 85, 86, 87 et 88**). _____ 147

Figure 101: Succession paragéométrique du gisement de Jbel Laassel et des indices d'Amekssa, Assif N'Zaïd et Jbel N'Zourk. _____ 148

Figure 102 : Résultats de l'ACP pour la base de données de Oued R'Them (86 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F2-F3. F : Projection dans le plan F2-F3 des observations et de leur lithologie. _____ 155

Figure 103 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'indice de Oued R'Them (86 observations). A : Projection des variables dans le plan F2-F4. B : Projection dans le plan F2-F4 des observations et de leur lithologie. C : Projection des variables dans le plan F2-F5. D : Projection dans le plan F2-F5 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F3-F4. F : Projection dans le plan F3-F4 des observations et de leur lithologie. _____ 156

Figure 104 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'indice de Oued R'Them (86 observations). A : Projection des variables dans le plan F3-F5. B : Projection dans le plan F3-F5 des observations et de leur lithologie. C : Projection des variables dans le plan F4-F5. D : Projection dans le plan F4-F5 des observations et de leur lithologie. _____ 157

Figure 105 : Graphique binaire représentant les teneurs en Zr, Ge, Na₂O, MnO et Ba en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables

comparées aux teneurs en cuivre. R2 est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.	158
Figure 106 : Résultats de l'ACP pour la base de données de Tizi N'Mekraz (18 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F2-F4. F : Projection dans le plan F2-F4 des observations et de leur lithologie.	160
Figure 107 : Résultats de l'ACP pour la base de données de Tizi N'Mekraz (18 observations). A : Projection des variables dans le plan F3-F4. B : Projection dans le plan F3-F4 des observations et de leur lithologie. C : Projection des variables dans le plan F2-F5. D : Projection dans le plan F2-F5 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F4-F5. F : Projection dans le plan F4-F5 des observations et de leur lithologie.	161
Figure 108: Graphique binaire représentant les teneurs en cuivre oxydé (CuOx), Ag, Sr, Fe2O3, MnO et Ba en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R2 est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.	162
Figure 109 : Résultats de l'ACP pour la base de données de Chaa'b Lhamrat (26 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection des variables dans le plan F2-F3. E : Projection des variables dans le plan F2-F7. F : Projection des variables dans le plan F3-F7.	164
Figure 110 : Graphique binaire représentant les teneurs en Zn, Perte au feu (PF) et Cr en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R2 est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.	165
Figure 111 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'ensemble des indices de type « stratabound » (104 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection des variables dans le plan F2-F3. E : Projection des variables dans le plan F2-F5. F : Projection des variables dans le plan F2-F5.	167
Figure 112 : Carte géologique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara avec la localisation de la coupe A-B sur laquelle ont été réalisé 6 profils litho-stratigraphiques.	168
Figure 113 : Projection le long de la coupe A-B, de la figure 11, des teneurs en cuivre des profils litho-stratigraphiques des indices de Oued R'Them (ORT), Ech Chguig (ECG) et Tizi N'Mekraz (TzM). L'échelle verticale est dilatée.	169
Figure 114 : Profil litho-stratigraphique PI de l'indice de Oued R'Them (ORT). L'abscisse est en échelle logarithmique.	169
Figure 115 : Profil litho-stratigraphique PII de l'indice de Oued R'Them (ORT). L'abscisse est en échelle logarithmique.	170

Figure 116 : Profil litho-stratigraphique PIII de l'indice de Oued R'Them (ORT). L'abscisse est en échelle logarithmique.	170
Figure 117 : Profil litho-stratigraphique PIV de l'indice de Oued R'Them (ORT). L'abscisse est en échelle logarithmique.	171
Figure 118 : Profil litho-stratigraphique PI de l'indice de Ech Chguig (ECG). L'abscisse est en échelle logarithmique.	171
Figure 119 : Profil litho-stratigraphique PI de l'indice de Tizi N'Mekraz (TZM). L'abscisse est en échelle logarithmique.	172
Figure 120 : A,B et C, Résultats de l'ACP pour la base de données de Jbel laassel sans les analyses de cuivre (BDD-JBL) (228 observations) ; D, E et F : Résultats de l'ACP pour la base de données de Jbel laassel avec les analyses de cuivre (BDD-JBL-Cu) (72 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs (BDD-JBL). B : Projection des variables dans le plan F1-F2 (BDD-JBL) ; C : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie (BDD-JBL).. D : tableau de corrélation entre les variables cuivre (Cu), CuOx et les facteurs (BDD-JBL-Cu) ; E : Projection des variables dans le plan F1-F2 (BDD-JBL-Cu) ; F : Projection dans le plan F3-F6 des observations et de leur lithologie (BDD-JBL-Cu).	174
Figure 121 : Graphique binaire représentant les teneurs en barium et cuivre oxydé (CuOx) en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R2 est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.	175
Figure 122 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'indice d'Amekssa (97 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F2-F5. F : Projection dans le plan F2-F5 des observations et de leur lithologie. Abréviations : Dol, dolomie ; SV, siltites vertes ; Pel, pélites ; Bre, brèche tectonique.	177
Figure 123 : Graphique binaire représentant les teneurs en TiO ₂ , SiO ₂ , K ₂ O et et Al ₂ O ₃ en fonction de la teneur total en cuivre (Cu). Les droites correspondent aux droites de régression, leurs couleurs aux différentes variables comparées aux teneurs en cuivre. R2 est le coefficient de détermination. L'échelle des ordonnées est logarithmique.	178
Figure 124 : Résultats de l'ACP pour la base de données de l'indice d'Assif N'Zaïd (108 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F6-F7. F : Projection dans le plan F6-F7 des observations et de leur lithologie. Abréviations : SV, siltites vertes minéralisées ; SV stériles, siltites vertes stériles ; Dol, dolomies minéralisées ; Dol stériles, Dolomies stériles ; PN, pélites noires minéralisées ; PN stériles, pélites noires stériles ; SB, siltites beiges minéralisées ; SB stériles, siltites beiges stériles ; Bre, brèche tectonique.	180
Figure 125: Résultats de l'ACP pour la base de données regroupant l'ensemble des occurrences de type « folded-band » (283 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection	

dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F3-F6. F : Projection dans le plan F3-F6 des observations et de leur lithologie. _____	182
Figure 126 : Résultats de l'ACP pour la base de données regroupant l'ensemble des occurrences des deux types « stratabound » et « folded-band » (283 observations). A : Valeurs propres et variances cumulées en fonction des facteurs. B : tableau de corrélation entre la variable cuivre et les facteurs. C : Projection des variables dans le plan F1-F2. D : Projection dans le plan F1-F2 des observations et de leur lithologie. E : Projection des variables dans le plan F4-F5. F : Projection dans le plan F4-F5 des observations et de leur lithologie. _____	
184	
Figure 127. Planche photographique des lieux et des échantillons sur lesquels a été réalisée l'étude micro-thermométrique : A, photographie de l'affleurement où a été prélevé l'échantillon du site de Oued R'Them ; B, photographie de l'affleurement où a été prélevé l'échantillon du site de Jbel Laassel ; C, lame mince de l'échantillon du site de Oued R'Them étudié ; D, lame mince de l'échantillon du site de Jbel Laassel étudiée. Les cercles rouges indiquent les disques où les inclusions fluides ont été mesurées. _____	
189	
Figure 128 : Planche photographique des textures de trainées d'inclusions fluides de l'indice de Oued R'Them : A (LT, nic. //) et A' (LT, nic. +), trainées d'inclusions fluides de type S et de type L au sein de quartz recoupant plusieurs cristaux de quartz ; B (LT, nic. //) et B' (LT, nic. +), trainées d'inclusions fluides au sein de quartz recoupant plusieurs cristaux de quartz ; C (LT, nic. //) et D (LT, nic. //), trainées d'inclusions fluides de type S et L sécant sur les cristaux de quartz et de dolomite ; E, (LT, nic. +) trainées d'inclusions fluides de type L et S sécantes sur les minéraux en inclusions du quartz ; F, (LT, nic. +) trainées d'inclusions fluides présentant des directions aléatoires au sein du quartz et de la dolomite. _____	
193	
Figure 129 : Planche photographique des observations en cathodoluminescence effectuées sur un échantillon provenant du site de Oued R'Them : A (LT, nic. //) et A' (14,3 mV, 153 mA et 5s), luminescence orange d'une fracture à inclusions fluides ; B (LT, nic. //) et B' (LT, nic. +), quartz présentant localement des extinctions roulantes ; D (15 mV, 130 mA et 5s) quartz luminescent en orange au niveau des extinctions roulantes ; E (LT, nic. //) et F (15,3 mV, 130 mA et 30s), texture en éventail des trainées d'inclusions fluides à partir des sulfures de cuivre. _____	
194	
Figure 130 : Planche photographique prise au microscope à cathodoluminescence : A (LT, nic. //) et A' (14,5 mV, 138 mA et 2s), couronne de réaction blanche en lumière naturelle au contact de la chalcocite et rouge en cathodoluminescence connecté aux fractures à inclusions fluides. _____	
195	
Figure 131 : Planche photographique des textures des inclusions fluides et de la fracturation associée : A, fractures à inclusions fluides recoupant les cristaux de quartz (LT, nic. //) ; B, inclusions fluide de type L dans du quartz (LT, nic. //) ; C (LT, nic. //) et C' (LT, nic. +), fractures à inclusions fluides recoupant les cristaux de quartz ; D, fractures à inclusions fluides empruntant les joints de grains entre les cristaux de quartz et texture en gerbe de ces fractures (LT, nic. +) ; E, fractures à inclusions fluides de type S et L dans un quartz (LT, nic. //). _____	
196	
Figure 132 : Planche photographique des observations en cathodoluminescence effectuées sur un échantillon provenant du site de Jbel Laassel : A (LT, nic. //) et A' (15 mV, 115 mA et 4s), cristaux de quartz parcourus de fracture à inclusions fluides dans le plan parallèle à l'éponte de la veine ; B (15 mV, 117 mA et 15s), zoom sur les fractures à inclusions fluides (luminescence rouge) et fracture à silice (luminescence bleue). _____	
197	

Figure 133 : planche photographique montrant les différentes typologies d'inclusions fluides observés dans l'échantillon du site de Oued R'Them.	199
Figure 134 : Partie supérieure du graphique ternaire $H_2O-NaCl-CaCl_2$ montrant en fonction des deux types de fluides observés les différentes transitions de phase solide-liquide observées. Abréviations : Type L , inclusions fluide à phases liquide et vapeur ; Type S , inclusions fluides à phases liquide, solide et vapeur.	201
Figure 135 : Planche montrant les histogrammes des classes de température d'homogénéisation en fonction des effectifs et par type d'inclusions fluides. Abréviations : T_h , température d'homogénéisation, ORT, indice de Oued R'Them, JBL, gisement de Jbel Laassel.	204
Figure 136 : Planche montrant la synthèse des histogrammes des classes de température d'homogénéisation en fonction des effectifs.	205
Figure 137 : Planche montrant les histogrammes des classes de pourcentage poids de NaCl et $CaCl_2$ en fonction des effectifs en fonction du type d'inclusions fluides.	206
Figure 138 : Diagramme ternaire $H_2O-NaCl-CaCl_2$ en pourcentage molaire montrant les différents groupes en fonction de leur salinité.	207
Figure 139 : Planche de graphiques binaires représentant les différents groupes discriminés en fonction des teneurs en sels et de la température d'homogénéisation (T_h) : A, T_h en fonction du wt% NaCl ; B, T_h en fonction de wt% $CaCl_2$; C, T_h en fonction du rapport molaire Ca/Na ; D, T_h en fonction de la teneur cumulé de NaCl et $CaCl_2$.	209
Figure 140 : Graphique montrant les températures de fusion de la halite ($T_{m,h}$) en fonction des températures d'homogénéisation (T_h).	211
Figure 141 : Diagramme de phase pression (P) température (T) du système $H_2O-NaCl$ avec les isochores des inclusions fluides dont l'homogénéisation était marquée par la fusion de la halite (modifié d'après Becker et al., 2008). Abréviations : P_{min} , pression minimale de piégeage ; T_{L+V} , température d'homogénéisation de la phase liquide et vapeur ; $T_{m,h}$, température de fusion de la halite.	212
Figure 142 : Diagramme de phase pression (P) température (T) du système $H_2O-NaCl$ avec les isochores des inclusions fluides (modifié d'après Bodnar, 1994).	213
Figure 143 : Représentation schématique en – 3D - des deux morphologies de corps minéralisés cuprifères de la couverture néoproterozoïque à Cambrienne observés dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. A, le type « stratabound » ; B, le type « folded-band ».	217
Figure 144 : Planche photographique montrant une synthèse des observations à différentes échelles pour les minéralisations de types « stratabound » et « folded band ». Les figures A et B sont des photos de terrain, la figure D est une image MEB ; La figure C est une image prise en cathodoluminescence (12,7 mV, 112mA et 2s) montrant une veine à quartz et dolomite reliée à un réseau de veinules à quartz et/ou dolomite connectant les sulfures disséminés dans la dolomie. Abréviations : Dol : dolomite, Cc : chalcocite, Mal : Malachite, Qtz : quartz.	218
Figure 145 : Successions paragenétiques de l'ensemble des indices étudiés de la couverture.	220
Figure 146 : Graphique présentant les teneurs en cuivre oxydés en fonction de celle en cuivre total pour l'ensemble des échantillons roche totales analysés du gisement de Jbel Laassel.	221

Figure 147 : A, Illustration schématique montrant la géométrie des « saddle reef » par glissement banc sur banc (Cox et al., 1991) ; B, Photographie d'une charnière de plis minéralisée en cuivre du gisement de Jbel N'Zourk.

222

Figure 148 : Planche montrant les données d'orientations des veines des stockwork des différents sites étudiés dans la couverture. Les projections sont faites dans un canevas de Schmidt (hémisphère inférieur) à l'aide du logiciel Stereonet. A, Projections de la trace des plans de veines de type stratabound et folded band avec la représentation en rosace de ces directions de veines (classe de 10°, 30 % des données sont représentées du centre à la périphérie du canevas) ; B, Projection des pôles des plans de la stratification S0 pour les deux types de minéralisation ; C, Projections des pôles des plans des veines et contours de densité de points en utilisant la méthode de Kamb (intermédiaire entre deux contours = 2 sigma avec un niveau de signifiacnce égal à 3 sigma).

223

Figure 149 : Schéma de l'interprétation des veines du stockwork en extrados d'un pli de la « folded-band ».

224

Figure 150 : Représentation schématique des veines du stockwork en extrados du pli formant la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Schéma de l'interprétation des veines du stockwork en extrados du pli formant la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

224

Figure 151 : Modèle conceptuel du système de failles et de fractures au sein de plis (Lacombe et al., 2007 d'après Florez-Niño et al., 2005).

225

Figure 152 : Modèles conceptuels de distribution des fluides dans les plis (Evans and Fischer, 2012). (a) distribution stratifiée des fluides, la distribution de ces fluides (A-D) reste inchangée durant le plissement ; (b) Les fluides fluent le long d'un niveau stratigraphique de haute perméabilité ; (c) Compartimentation structurale et stratigraphique des fluides résultant de la localisation de la fracturation, les couleurs sombres indiquent une modification de la chimie des fluides durant le plissement ; (d) compartimentation structurale des fluides dans les charnières indépendante de la nature des niveaux stratigraphiques ; (e) compartimentation structurale des fluides par des failles où ils évoluent séparément (couleurs foncées) ; « effet chasse d'eau » (« flushing fluids ») associés au développement d'une importante fabrique de fracturation connectée.

226

Figure 153 : Coupe passant par les indices de Oued R'Them et Assif N'Zaïd illustrant zones potentielle de circulation des fluides à l'origine des minéralisations cuprifères.

227

Figure 154 : Diagramme ternaire H₂O-NaCl-CaCl₂ en pourcentage molaire montrant les données d'inclusions fluides à NaCl-CaCl₂-H₂O de cette étude de la bibliographie dans des échantillons provenant de Bou Azzer, d'Aït Ahman et d'Imiter. Références : (1) En-Naciri et al., 1997, (2) (Essarraj et al., 2005a), (3) (Hulin, 2013), (4) (Essarraj et al., 2016), (5) (Essarraj et al., 1998) (6) (Barakat et al., 2002).

230

Figure 155 : A, bloc 3D schématique des minéralisations de type Bleida (modifié d'après Maacha, 2013) ; B, bloc 3D schématique des minéralisations associées aux failles de direction N110 à N140°.

232

Figure 156 : A, Carte structurale du domaine Varisque de l'Anti-Atlas (Soulaïmani et al., 2014) ; B, Diagrammes en rosace des failles (en noir) et des plis (en rouge) de l'Anti-Atlas occidental, central, oriental et de l'ensemble de l'Anti-Atlas (Soulaïmani et al., 2014).

233

Figure 157 : Projection dans un canevas de Schmidt (hémisphère inférieur) des pôles des axes de plis mesurés sur l'ensemble des indices minéralisés avec la représentation en rosace des directions de ces axes (classe de 10°, 20% des données sont représentées du centre jusqu'au périmètre du canevas).	234
Figure 158 : Carte géologique de l'Anti-Atlas (Thomas et al., 2004) synthétisant les données de traces de fission sur zircon (ZFT) et sur apatite (AFT) (Oukassou et al., 2013). Les données de l'Anti-Atlas occidental proviennent de Sebti et al., (2009) et Ruiz et al., (2011), celles de l'Anti-Atlas oriental proviennent de Malusà et al., (2007) et celles de l'Anti-Atlas Central de Sebti et al., (2009).	235
Figure 159 : Modèle de développement de fractures et de plis dans la couverture dans le Zagros Central (Iran) liés à la réactivation de failles du socle (Lacombe et al., 2007).	236
Figure 160 : Coupe schématique présentant l'ensemble des minéralisations de la boutonnière de Bou-Azzer-El Graara et les circulations fluides associées proposées.	239
Figure 161 : Modèle de zonation des sulfures de cuivre au sein d'une minéralisation de type Kupferschiefer (Vaughan et al., 1989)	240
Figure 162 : Schéma du modèle MVT proposé à Robb Lake et les zonations minéralogique associées (Paradis et al., 2007).	241
Figure 163 : Schéma conceptuel de formation des minéralisations de type SEDEX (Goodfellow and Lydon, 2007)	242
Figure 164 : Carte géologique de l'Anti-Atlas compilée d'après les données de la littérature montrant la répartition des occurrences cuprifères au sein de cette province (Hollard et al., 1985; Service Géologique du Maroc, 1985; Benali, 1999; Walsh et al., 2002; Gasquet et al., 2008; Blein et al., 2014)	243
Tableau 1 : Tableau de quelques objets en cuivre commun avec les proportions relatives ou absolues de cuivre qu'ils contiennent (données compilées d'après Bihouix and De Guillebon, 2010; "Copper Alliance," n.d.).	13
Tableau 2: Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variable cuivre de la base de données de l'indice de Oued R'Them.	157
Tableau 3 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre de la base de données de l'indice de Tizi N'Mekraz.	162
Tableau 4 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre de la base de données de l'indice de Chaa'b Lhamrat.	165
Tableau 5 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre (BDD-JBL-Cu).	175
Tableau 6 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre de la base de données de l'indice d'Amekssa.	178
Tableau 7 : Tableau des coefficients de corrélations ente l'ensemble des variables et la variables cuivre de la base de données de l'indice d'Assif N'Zaïd.	181
Tableau 8 : Principales caractéristiques des gisements de type Kupferschiefer (Vaughan et al., 1989).	240
Tableau 9 : Principales caractéristiques des gisements de type MVT (Anderson and Macqueen, 1982; Garven, 1985; Ohle, 1985; Guilbert and Park, 1986)	241

<i>Tableau 10 : Principales caractéristiques des gisements de type SEDEX (Lydon, 1996).....</i>	<i>242</i>
<i>Tableau 11 : Principales caractéristiques des gisements de type Red Bed (Brown, 1997).....</i>	<i>243</i>

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Base de données géochimiques roche totales

Base de données de l'indice de Oued R'Them

	litho	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K2O (%)	MnO (%)	TiO2 (%)	P2O5 (%)	Na2O (%)	As (ppm)	Ba (ppm)	Cu (ppm)	Sr (ppm)	Zn (ppm)	Ga (ppm)	Ge (ppm)	Zr (ppm)
ORT 40	Dol<	14	0,1	0,83	25,63	19,97	0,04	0,26	0,01	0,01	0,02	16	12	6996	66	24	6	25	1
ORT 41	Dol>	2,73	0,3	1,08	27,9	21,21	0,03	0,19	0,02	0,02	0,02	13	29	2370	107	16	3	19	1
ORT 42	Dol<	9,82	0,16	0,92	25,09	20,05	0,01	0,23	0,02	0,02	0,01	8	41	11083	77	13	8	30	1
ORT 43	Dol>	4,63	0,56	1,15	29,39	20,3	0,19	0,24	0,03	0,02	0,02	8	69	2629	118	13	8	20	2
ORT 44	Dol<	10,07	0,38	0,79	24,49	21,01	0,01	0,3	0,02	0,01	0,02	295	6	5580	70	64	3	27	1
ORT 45	Dol>	3,22	0,35	0,73	27,07	21,54	0,02	0,23	0,02	0,01	0,02	183	2	5789	80	50	8	19	1
ORT 47	Dol<	9,89	1,18	1,14	25,55	19,68	0,09	0,2	0,05	0,02	0,01	14	8	1076	58	109	5	24	1
ORT 48	Dol>	1,48	0,15	0,94	27,83	21,52	0,01	0,18	0,01	0,01	0,22	45	51	2694	86	525	8	134	303
ORT 49	Dol>	5,31	0,46	1,16	27,41	20,15	0,02	0,18	0,03	0,02	0,24	8	48	947	79	31	8	171	290
ORT 50	Dol>	3,22	0,19	1,08	25,52	22,92	0,01	0,18	0,02	0,01	0,22	31	66	1059	97	128	7	159	521
ORT 51	Dol<	5,19	0,51	1,19	26,62	20,29	0,11	0,17	0,03	0,02	0,18	14	107	791	98	25	8	187	221
ORT 52	Dol>	3,5	0,2	1,08	26,91	21,13	0,02	0,17	0,01	0,02	0,19	27	91	993	96	24	9	123	361
ORT 53	Dol>	8,65	0,74	0,94	26,83	17,11	0,25	0,17	0,05	0,02	0,15	8	62	2141	89	31	10	193	231
ORT 54	Dol>	2,11	0,2	1,15	28,24	21,06	0,01	0,18	0,02	0,01	0,15	14	97	1971	80	17	11	237	505
ORT 55	Dol>	7,26	0,69	0,97	26,09	20,3	0,13	0,17	0,04	0,01	0,15	17	245	5247	71	20	10	230	685
ORT 56	Dol>	2,88	0,21	1,06	27,69	20,47	0,01	0,2	0,02	0,01	0,13	70	66	6872	79	44	8	192	223
ORT 57	Dol<	10,68	0,65	1,01	24,57	20,13	0,14	0,16	0,03	0,01	0,11	8	64	4737	65	20	9	170	206
ORT 58	Dol>	4,05	0,34	0,77	27,73	20,94	0,11	0,15	0,02	0,02	0,13	8	33	1391	75	11	7	65	166
ORT 59	Dol<	7,22	0,84	1,28	26,26	20,84	0,24	0,16	0,05	0,01	0,21	54	408	8008	75	26	9	218	506
ORT 60	Dol>	3,32	0,13	2,88	26,32	20,87	0,17	0,15	0,01	0,01	0,07	12	59	3828	72	32	1	126	199
ORT 61	Dol>	7,15	0,37	3,78	25,13	19,4	0,29	0,15	0,03	0,01	0,05	19	93	3988	73	152	1	168	406
ORT 62	Dol>	2,95	0,24	3,06	26,6	20,54	0,2	0,16	0,02	0,02	0,06	35	247	2946	98	45	3	184	241
ORT 63	Dol<	9,59	0,11	2,87	25,2	19,47	0,19	0,15	0,01	0,01	0,05	8	62	1620	71	31	1	145	473
ORT 64	Dol>	2,83	0,1	3,09	24,27	22,77	0,15	0,14	0,01	0,01	0,05	8	41	2348	86	26	1	118	149
ORT 65	Dol<	12,58	0,87	3,09	23,38	18,5	0,44	0,14	0,05	0,02	0,06	8	79	1074	76	33	1	95	105
ORT 66	Dol>	2,57	0,14	2,58	25,41	21,77	0,22	0,12	0,01	0,01	0,04	8	29	565	82	25	1	111	295
ORT 67	Dol<	15,32	0,45	2,99	23,14	17,5	0,32	0,17	0,03	0,02	0,05	12	133	1124	75	28	1	288	662
ORT 68	Dol>	2,39	0,14	3,12	26,14	21,38	0,21	0,13	0,01	0,01	0,01	25	21	2590	64	28	1	9	1
ORT 69	Dol>	12,15	0,16	2,47	24,1	19,28	0,19	0,15	0,01	0,01	0,02	8	34	1270	81	35	1	18	1
ORT 70	Dol>	2,52	0,1	3,49	25,1	21,62	0,21	0,14	0,01	0,01	0,01	20	23	2838	84	49	1	1	1
ORT 71	Dol<	6	0,1	2,96	21,96	18,35	0,13	0,17	0,01	0,02	0,01	10	31	763	78	47	1	14	1
ORT 72	Dol>	4,22	0,1	2,97	25,37	21,14	0,18	0,15	0,01	0,02	0,01	30	23	902	67	79	1	9	1
ORT 73	Dol>	7,58	0,1	3,08	24,76	19,95	0,15	0,16	0,01	0,02	0,01	8	16	1295	54	18	1	12	1
ORT 74	Dol>	2,33	0,1	3,98	26,25	20,56	0,15	0,2	0,01	0,01	0,01	8	52	765	67	19	1	12	1
ORT 75	Dol>	5,2	0,17	3,17	26,25	19,61	0,2	0,16	0,02	0,02	0,02	8	25	909	77	24	1	16	1
ORT 76	Dol>	2,01	0,18	3,76	27,05	20,33	0,2	0,15	0,02	0,02	0,01	11	29	1028	78	38	1	6	1
ORT 77	Dol>	21,54	0,7	3,98	21,07	16,06	0,38	0,16	0,04	0,02	0,01	8	95	784	67	26	1	31	1
ORT 78	Dol>	2,01	0,17	3,36	26,26	21,7	0,2	0,15	0,02	0,01	0,01	25	3	1217	75	34	1	9	1
ORT 79	Dol>	23,18	0,1	2,04	20,7	17	0,14	0,13	0,01	0,01	0,03	18	224	12821	68	33	1	121	294
ORT 80	Dol<	2,63	0,36	1	29,97	19,12	0,07	0,21	0,01	0,01	0,05	9	50	7451	63	39	1	74	379
ORT 81	Dol<	9,1	0,46	0,75	28,95	18	0,08	0,19	0,01	0,01	0,04	18	71	4184	69	25	3	122	448
ORT 82	Dol<	13,61	0,48	1,02	27,76	16,27	0,13	0,19	0,01	0,01	0,03	11	90	6223	71	35	1	139	455
ORT 83	Dol>	5,9	0,38	0,73	29,12	18,71	0,06	0,16	0,01	0,01	0,03	8	58	3072	75	35	4	116	436
ORT 84	Dol int	6,4	2,25	0,75	28,28	16,99	0,71	0,14	0,09	0,01	0,04	8	92	13333	79	30	7	133	302
ORT 85	Dol>	4,92	0,46	0,62	30,06	18,1	0,12	0,14	0,01	0,01	0,03	8	13	4907	50	24	1	121	354
ORT 86	Dol>	2	0,39	0,45	30,35	19,03	0,09	0,15	0,01	0,01	0,06	8	17	1704	88	30	3	54	90
ORT 87	Dol>	1,83	0,38	0,58	29,04	19,92	0,06	0,23	0,01	0,01	0,04	8	18	1494	79	73	3	51	81
ORT 88	Dol>	6,3	0,81	1,01	28,44	18,09	0,15	0,26	0,02	0,01	0,07	8	28	3170	88	82	1	72	184
ORT 89	Dol>	10,9	2,98	0,99	28,09	15,29	1,14	0,15	0,13	0,03	0,05	8	111	440	121	108	8	94	237
ORT 90	Dol>	19,31	1,07	1,14	25,53	15,55	0,29	0,15	0,03	0,01	0,02	8	96	452	75	102	3	70	136
ORT 91	bre base	10,24	3,18	0,54	35,8	9,67	0,99	0,05	0,14	0,04	0,03	8	115	1328	209	84	7	65	56
ORT 92	bre base	15,46	4,92	1,67	31,36	9,1	1,59	0,06	0,24	0,06	0,08	8	180	685	134	57	9	62	246
ORT 93	Dol<	17,36	0,41	0,4	24,33	17,23	0,18	0,15	0,02	0,04	0,02	8	40	833	87	68	4	41	59
ORT 94	Dol>	7,48	0,36	0,71	27,66	18,41	0,08	0,2	0,01	0,01	0,01	8	35	383	65	72	2	60	179
ORT 95	Dol<	4,64	0,66	0,68	30,45	17,06	0,15	0,21	0,02	0,01	0,02	8	49	428	83	60	5	49	136
ORT 96	Dol<	9,87	0,5	0,69	27,93	18,08	0,12	0,17	0,01	0,01	0,05	8	22	384	62	65	3	40	72
ORT 97	Dol int	6,94	2,29	0,47	30,03	16,45	0,77	0,11	0,1	0,01	0,03	8	56	81	103	49	6	42	63
ORT 98	Dol>	5,79	0,48	0,46	28,36	19	0,08	0,19	0,01	0,01	0,01	8	19	104	61	70	4	43	154
ORT 99	Dol>	3,35	0,56	0,49	30,07	18,23	0,14	0,21	0,01	0,01	0,02	8	44	133	88	69	4	35	81
ORT 100	Dol>	2,67	0,21	0,4	31,24	18,79	0,01	0,23	0,03	0,02	0,06	8	30	81	71	7	1	23	56
ORT 101	Dol>	1,41	0,1	0,3	31,5	18,92	0,01	0,19	0,02	0,02	0,07	10	18	101	61	8	1	55	47
ORT 102	Dol>	1,72	0,1	0,27	31,77	18,81	0,01	0,16	0,02	0,02	0,09	8	7	179	60	8	1	74	232
ORT 103	bre base	15,24	4,03	0,96	31,96	9,63	1,31	0,05	0,19	0,07	0,11	15	148	2245	152	23	6	52	83
ORT 104	Dol>	5,21	0,1	0,71	30,1	18,25	0,01	0,16	0,01	0,03	0,12	28	145	6130	93	32	1	163	587
ORT 105	Dol<	2,85	0,1	0,76	30,23	18,86	0,01	0,22	0,01	0,01	0,13	8	59	8198	76	16	3	200	931
ORT 106	Dol>	8,2	0,1	0,61	28,28	18,42	0,01	0,2	0,01	0,03	0,12	23	177	5841	68	34	5	198	316
ORT 107	Dol>	24,02	0,1	0,8	23,3	14,41	0,01	0,24	0,02	0,02	0,12	14	108	9791	77	21	1	129	252
ORT 108	Dol>	7,27	0,1	0,39	28,37	18,76	0,01	0,19	0,01	0,02	0,13	8	114	4004	85	14	2	200	611
ORT 109	Dol int	7,94	1,99	0,66	29,06	16,55	0,45	0,1	0,09	0,04	0,13	38	95	5017	131	27	5	145	221
ORT 110	Dol>	1,81	0,1	1,06	30,96	18,95	0,01	0,16	0,02	0,02	0,13	35	66	2027	87	27	4	124	397
ORT 111	Dol>	16,86	0,1	0,77	27,2	15,3	0,01	0,17	0,02	0,03	0,13	45	101	3495	91	16	5	133	510
ORT 112	Dol>	1,29	0,1	0,59	30,69	19,67	0,01	0,16											

		litho	Y (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Th (ppm)	PF (%)	densité
ORT 40	Dol<		0,11	0,49		0,84	0,14	0,57	0,09	0,02	0,07	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	37	2,7
ORT 41	Dol>		1,19	3,34	5,73	0,81	3,35	0,62	0,14	0,55	0,06	0,26	0,04	0,11	0,01	0,07	0,01	0,05	44,85	2,85
ORT 42	Dol<		2,09	4,04	9,11	1,08	4,44	0,88	0,20	0,86	0,09	0,41	0,07	0,16	0,02	0,10	0,01	0,08	41,11	2,77
ORT 43	Dol>		1,24	3,07	5,57	0,80	3,36	0,62	0,14	0,55	0,06	0,27	0,05	0,12	0,01	0,08	0,01	0,10	43,77	2,68
ORT 44	Dol<		0,07	0,31	0,46	0,08	0,31	0,04	0,01	0,04	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	40,96	2,82
ORT 45	Dol>		0,11	0,71	0,76	0,18	0,75	0,10	0,02	0,08	0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	44,77	2,65
ORT 47	Dol<		0,18	0,26	0,71	0,06	0,27	0,05	0,02	0,05	0,01	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,03	40,63	2,79
ORT 48	Dol>		3,88	6,39	13,62	1,57	6,13	1,17	0,15	1,00	0,13	0,70	0,13	0,47	0,06	0,42	0,07	2,76	45,93	2,85
ORT 49	Dol<		4,20	4,08	108,80	1,16	4,57	0,96	0,19	1,27	0,13	0,72	0,14	0,44	0,06	0,45	0,07	1,10	43,53	2,67
ORT 50	Dol>		2,90	2,90	6,42	0,74	3,03	0,63	0,13	0,57	0,08	0,49	0,10	0,33	0,05	0,39	0,07	0,61	45,09	2,75
ORT 51	Dol<		4,52	4,60	13,69	1,35	5,44	1,17	0,23	1,07	0,14	0,80	0,15	0,44	0,06	0,43	0,07	1,11	44,2	2,64
ORT 52	Dol>		2,62	2,81	6,30	0,75	3,13	0,66	0,14	0,60	0,08	0,47	0,09	0,28	0,04	0,30	0,05	0,47	45,25	2,79
ORT 53	Dol<		4,79	4,88	14,36	1,34	5,46	1,22	0,24	1,11	0,15	0,88	0,17	0,50	0,07	0,50	0,08	1,27	43,44	2,82
ORT 54	Dol>		6,61	11,36	24,83	2,85	10,95	2,06	0,26	1,74	0,23	1,27	0,24	0,78	0,10	0,72	0,11	5,43	45,61	2,87
ORT 55	Dol<		4,54	4,07	9,49	1,10	4,44	0,99	0,23	0,96	0,13	0,79	0,16	0,53	0,08	0,60	0,11	1,02	42,25	2,8
ORT 56	Dol>		3,73	4,04	12,12	1,07	4,31	0,89	0,17	0,81	0,11	0,66	0,13	0,39	0,06	0,39	0,06	1,06	45,16	2,6
ORT 57	Dol<		4,31	5,35	204,20	1,31	5,12	1,12	0,22	1,56	0,15	0,78	0,15	0,44	0,06	0,42	0,07	1,12	40,62	2,63
ORT 58	Dol>		2,74	2,67	6,79	0,78	3,23	0,73	0,17	0,71	0,09	0,50	0,09	0,25	0,03	0,23	0,04	0,32	44,19	2,75
ORT 59	Dol<		4,64	4,51	10,47	1,20	4,87	1,08	0,26	1,04	0,14	0,82	0,17	0,51	0,08	0,55	0,10	1,06	40,63	2,78
ORT 60	Dol>		3,58	4,88	181,00	1,16	4,54	0,97	0,19	1,55	0,13	0,65	0,12	0,35	0,05	0,34	0,06	0,82	44,47	2,7
ORT 61	Dol<		4,70	4,06	10,59	1,25	5,20	1,25	0,27	1,20	0,16	0,88	0,17	0,48	0,07	0,48	0,08	0,72	43,07	2,85
ORT 62	Dol>		4,00	4,59	12,80	1,17	4,77	0,99	0,20	0,91	0,12	0,69	0,13	0,42	0,06	0,42	0,07	1,14	44,4	2,77
ORT 63	Dol<		3,31	3,59	8,48	0,98	3,96	0,84	0,19	0,79	0,10	0,57	0,11	0,35	0,05	0,38	0,07	0,57	40,78	2,68
ORT 64	Dol>		2,65	2,83	8,39	0,77	3,19	0,67	0,13	0,62	0,08	0,48	0,09	0,27	0,04	0,27	0,04	0,72	44,95	2,82
ORT 65	Dol<		3,18	3,19	8,73	0,85	3,48	0,77	0,16	0,75	0,10	0,58	0,11	0,33	0,05	0,33	0,05	0,87	39,42	2,66
ORT 66	Dol>		3,29	3,53	79,66	0,93	3,76	0,80	0,15	0,97	0,11	0,58	0,11	0,35	0,05	0,36	0,06	0,78	45,52	2,82
ORT 67	Dol<		4,88	4,61	10,35	1,18	4,79	1,09	0,23	1,02	0,14	0,85	0,18	0,58	0,09	0,68	0,12	1,15	38,32	2,79
ORT 68	Dol>		0,01	0,04	0,06	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	44,82	2,85
ORT 69	Dol<		0,62	1,29	2,14	0,40	1,72	0,37	0,09	0,33	0,04	0,16	0,03	0,06	0,01	0,04	0,01	0,03	39,87	2,67
ORT 70	Dol>		1,28	1,21	3,13	0,39	1,71	0,39	0,09	0,41	0,05	0,25	0,04	0,11	0,01	0,08	0,01	0,11	45,33	2,75
ORT 71	Dol<		0,83	1,63	3,25	0,49	2,07	0,46	0,11	0,44	0,05	0,21	0,03	0,08	0,01	0,05	0,01	0,02	48,83	2,66
ORT 72	Dol>		0,00	0,03	0,05	0,01	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,26	2,79
ORT 73	Dol<		0,01	0,05	0,08	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	42,56	2,82
ORT 74	Dol>		0,01	0,03	0,05	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	44,63	2,87
ORT 75	Dol<		1,19	2,12	4,10	0,63	2,71	0,60	0,14	0,58	0,06	0,29	0,05	0,11	0,01	0,07	0,01	0,02	43,58	2,8
ORT 76	Dol>		0,05	0,10	0,20	0,03	0,13	0,03	0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	44,61	2,6
ORT 77	Dol<		2,89	2,34	6,26	0,76	3,34	0,93	0,24	0,94	0,11	0,56	0,10	0,25	0,03	0,19	0,03	0,40	34,37	2,63
ORT 78	Dol>		0,02	0,05	0,11	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	44,43	2,75
ORT 79	Dol<		3,71	3,49	9,42	1,13	4,81	1,44	0,27	1,08	0,14	0,72	0,13	0,37	0,05	0,34	0,06	0,39	34,04	2,78
ORT 80	Dol>		2,16	2,64	5,94	0,80	3,06	0,64	0,14	0,59	0,08	0,38	0,07	0,23	0,03	0,25	0,05	0,41	45,17	2,82
ORT 81	Dol<		3,53	3,25	7,93	0,89	3,41	0,74	0,17	0,72	0,10	0,56	0,11	0,35	0,05	0,38	0,07	0,58	40,99	2,91
ORT 82	Dol>		3,34	3,35	8,07	0,88	3,35	0,70	0,16	0,68	0,09	0,52	0,11	0,33	0,05	0,37	0,07	0,58	39,02	2,77
ORT 83	Dol<		3,18	3,04	8,01	0,85	3,11	0,60	0,13	0,59	0,08	0,45	0,09	0,31	0,05	0,36	0,06	0,54	43,47	2,83
ORT 84	Dol int		6,28	5,49	118,40	1,46	5,46	1,22	0,27	1,64	0,19	1,03	0,21	0,63	0,09	0,64	0,10	1,86	41,53	2,73
ORT 85	Dol>		0,45	0,62	17,13	0,16	0,56	0,10	0,02	0,16	0,02	0,10	0,02	0,07	0,01	0,07	0,01	0,08	44,12	2,77
ORT 86	Dol>		0,81	1,64	65,52	0,32	1,10	0,21	0,04	0,42	0,03	0,16	0,03	0,10	0,01	0,10	0,02	0,08	46,05	2,74
ORT 87	Dol>		0,53	0,98	2,64	0,23	0,85	0,15	0,04	0,15	0,02	0,10	0,02	0,06	0,01	0,05	0,01	0,09	46,49	2,78
ORT 88	Dol<		3,17	3,41	8,52	0,88	3,35	0,73	0,17	0,71	0,10	0,53	0,10	0,28	0,04	0,26	0,04	0,16	43,48	2,75
ORT 89	Dol>		10,05	8,77	22,73	2,63	9,89	2,19	0,49	2,16	0,32	1,83	0,35	1,02	0,14	0,90	0,14	1,13	38,82	2,75
ORT 90	Dol>		5,69	5,93	15,16	1,83	7,32	1,92	0,44	1,73	0,23	1,09	0,18	0,45	0,05	0,30	0,04	0,38	35,44	2,82
ORT 91	bre base		3,63	6,10	12,77	1,43	4,98	0,96	0,23	0,87	0,12	0,66	0,12	0,37	0,05	0,36	0,05	0,98	37,94	2,59
ORT 92	bre base		9,47	10,10	21,29	2,39	8,87	1,89	0,43	1,89	0,28	1,59	0,31	0,95	0,14	0,92	0,14	2,74	34,05	2,65
ORT 93	Dol<		5,20	6,72	54,23	1,95	7,42	1,62	0,36	1,76	0,19	0,90	0,15	0,40	0,05	0,28	0,04	0,38	38,39	2,71
ORT 94	Dol<		2,35	3,90	9,15	1,12	4,24	0,86	0,19	0,79	0,10	0,46	0,08	0,22	0,03	0,18	0,03	0,18	43,7	2,74
ORT 95	Dol<		0,25	0,81	1,63	0,21	0,77	0,13	0,02	0,12	0,02	0,08	0,02	0,05	0,01	0,04	0,01	0,05	44,65	2,63
ORT 96	Dol<		0,24	0,63	31,08	0,13	0,46	0,08	0,02	0,29	0,02	0,07	0,01	0,04	0,01	0,04	0,01	0,03	41,17	2,79
ORT 97	Dol int		1,94	2,25	4,86	0,54	1,97	0,37	0,08	0,40	0,05	0,30	0,06	0,18	0,03	0,17	0,03	0,40	41,35	2,65
ORT 98	Dol>		0,73	1,48	3,33	0,40	1,50	0,24	0,05	0,24	0,03	0,15	0,02	0,10	0,01	0,10	0,02	0,06	44,15	2,76
ORT 99	Dol>		1,77	3,86	8,59	1,04	3,94	0,72	0,17	0,75	0,08	0,33	0,06	0,15	0,02	0,11	0,02	0,12	45,49	2,77
ORT 100	Dol>		0,26	0,60	28,93	0,13	0,44	0,08	0,02	0,38	0,02	0,06	0,01	0,04	0,01	0,04	0,01	0,02	45,43	2,68
ORT 101	Dol>		0,86	1,17	3,65	0,29	1,02	0,20	0,04	0,22	0,03	0,15	0,03	0,09	0,01	0,09	0,02	0,11	46,33	2,74
ORT 102	Dol>		0,27	0,36	0,79	0,09	0,32	0,06	0,02	0,07	0,01	0,05	0,01	0,04	0,01	0,04	0,01	0,04	45,79	2,74
ORT 103	bre base		7,38	8,42	17,66	1,99	7,27	1,46	0,33	1,56	0,22	1,27	0,25	0,77	0,11	0,74	0,11	2,42	35,12	2,89
ORT 104	Dol<		6,50	6,83	16,69	1,76	6,58	1,37	0,34	1,45	0,19	1,03	0,20	0,60	0,09	0,61	0,11	0,65	43,43	2,69
ORT 105	Dol<		6,93	7,70	18,19	1,90	7,06	1,45	0,31	1,42	0,19	1,04	0,22</							

Base de données de l'indice de Tizi N'Mekraz :

Nom	Lithologie	puissance cumulé	PF	S	SiO2	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu
ODS N° 1	Bre base	20	38,1	0,36	14	1,02	24,65	16,36	1,15	0,06	0,16	94	34	1977	2,4	6	33	27	138
ODS N° 2	Dol inf	40	40,99	0,24	12,55	1,29	24,15	18,89	0,32	0,13	0,02	50	28	1522	2,1	6	18	13	174
ODS N° 3	Dol inf	60	41,84	0,43	11,36	0,85	24,27	19,42	0,26	0,15	0,01	34	27	3597	2	6	13	11	182
ODS N° 4	Dol inf	80	40,76	0,45	13,19	0,75	23,6	19,21	0,27	0,16	0,01	29	33	5580	1,9	6	11	11	379
ODS N° 5	Dol inf	100	43,6	0,46	7,32	0,88	25,45	20,23	0,26	0,19	0,01	26	37	5479	1,9	6	10	9	216
ODS N° 6	Dol inf	120	41,65	0,2	11,68	0,85	23,38	20,2	0,25	0,19	0,02	24	51	1935	2	6	9	11	380
ODS N° 7	Dol inf	140	42,46	0,33	8,6	0,75	24,93	20,63	0,3	0,19	0,01	20	60	5021	2	6	9	14	1577
ODS N° 8	Dol int	155	42,26	0,31	7,72	0,86	24,93	20,23	0,71	0,19	0,06	19	52	4562	2,1	6	8	13	2544
ODS N° 9	Dol sup	175	44,32	0,15	5,05	0,61	26,49	21,52	0,28	0,15	0,01	17	58	272	2	6	7	8	899
ODS N° 10	Dol sup	195	46,22	0,25	0,89	1	27,51	22,03	0,25	0,28	0,01	14	60	1755	1,9	6	7	7	783
ODS N° 11	Dol sup	215	44,15	0,42	3,04	0,9	28,72	20,83	0,33	0,3	0,01	18	39	1830	2	6	8	7	489
ODS N° 12	Dol sup	235	46,16	0,2	0,94	1,02	28,4	21,15	0,36	0,27	0,02	15	115	637	2	6	7	8	837
ODS N° 13	Dol sup	255	45,62	0,46	1,4	0,86	28,29	21,8	0,31	0,26	0,01	15	116	449	1,9	6	8	8	128
ODS N° 14	Dol sup	275	45,2	0,3	2,64	1,12	28,01	20,66	0,31	0,28	0,01	17	85	1994	2	6	7	9	183
ODS N° 15	Dol sup	295	45,08	0,28	2,8	1,4	27,63	20,34	0,35	0,31	0,02	12	90	773	1,9	6	7	8	4654
ODS N° 16	Dol sup	315	44,46	0,6	4,1	1,04	26,91	20,6	0,34	0,29	0,02	13	103	2428	2	6	7	8	3593
ODS N° 17	Dol sup	335	38,5	0,35	16,77	1,1	22,91	18,25	0,34	0,29	0,02	16	105	208	2	6	7	13	1930
ODS N° 18	Dol sup	355	41,72	0,5	10,84	1,32	25,6	18,28	0,37	0,26	0,02	17	64	323	2	6	8	13	517
Nom	Lithologie	puissance cumulé	Nb	Sr	Zn	Ge	Na	Sc	V	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
ODS N° 1	Bre base	20	7	320	21	23	710	6	38	71	4,03	5,52	10,47	1,25	4,81	0,96	0,77	1,05	0,13
ODS N° 2	Dol inf	40	6	126	18	21	600	4	16	36	3,82	3,59	9,06	1,15	4,60	1,05	0,67	1,11	0,15
ODS N° 3	Dol inf	60	6	231	15	18	720	4	9	31	2,33	2,85	6,47	0,81	3,25	0,73	1,12	0,83	0,10
ODS N° 4	Dol inf	80	6	268	17	18	559	3	8	32	1,74	2,51	5,24	0,66	2,66	0,59	1,70	0,73	0,07
ODS N° 5	Dol inf	100	4	270	17	20	658	3	9	31	1,78	2,56	5,34	0,68	2,72	0,62	1,67	0,76	0,08
ODS N° 6	Dol inf	120	6	197	16	11	713	4	8	34	2,14	2,82	6,09	0,75	3,06	0,69	0,72	0,75	0,09
ODS N° 7	Dol inf	140	5	277	16	11	723	3	9	33	1,92	2,34	4,80	0,59	2,44	0,61	1,60	0,74	0,08
ODS N° 8	Dol int	155	6	289	16	10	644	5	23	46	4,18	2,84	6,37	0,85	3,62	0,98	1,45	1,13	0,16
ODS N° 9	Dol sup	175	5	136	17	1	805	4	12	32	1,73	2,43	5,18	0,63	2,52	0,54	0,19	0,57	0,07
ODS N° 10	Dol sup	195	5	157	16	8	940	3	15	34	2,85	2,17	5,12	0,68	2,89	0,80	0,69	0,87	0,12
ODS N° 11	Dol sup	215	5	128	17	3	732	3	18	31	0,02	1,00	1,00	0,10	0,10	0,10	0,42	0,04	0,01
ODS N° 12	Dol sup	235	6	148	16	11	905	4	21	34	3,66	2,32	5,73	0,80	3,53	1,01	0,40	1,08	0,16
ODS N° 13	Dol sup	255	5	117	16	14	935	3	11	31	2,94	2,43	6,20	0,79	3,37	0,85	0,32	0,91	0,13
ODS N° 14	Dol sup	275	5	157	16	11	742	4	15	34	3,33	2,71	6,80	0,90	3,83	0,98	0,76	1,09	0,14
ODS N° 15	Dol sup	295	6	168	19	16	860	4	15	33	3,34	2,44	6,17	0,84	3,59	0,97	0,43	1,04	0,15
ODS N° 16	Dol sup	315	5	224	16	10	1100	4	15	33	3,16	2,39	5,78	0,77	3,25	0,87	0,84	0,99	0,13
ODS N° 17	Dol sup	335	5	167	16	28	1000	4	14	34	3,18	2,41	5,86	0,78	3,35	0,89	0,25	0,93	0,14
ODS N° 18	Dol sup	355	4	172	19	22	424	4	19	36	3,33	2,97	6,93	0,97	4,15	1,03	0,30	1,04	0,15
Nom	Lithologie	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	d	CuOx	Ag								
ODS N° 1	Bre base	0,75	0,15	0,48	0,07	0,48	0,08	1,80	2,6	80,00	4,30								
ODS N° 2	Dol inf	0,79	0,14	0,40	0,05	0,32	0,05	0,22	2,8	89,00	4,41								
ODS N° 3	Dol inf	0,47	0,08	0,22	0,03	0,18	0,03	0,23	2,77	91,00	4,40								
ODS N° 4	Dol inf	0,35	0,06	0,16	0,02	0,13	0,03	0,11	2,74	197,00	3,74								
ODS N° 5	Dol inf	0,37	0,06	0,16	0,02	0,14	0,03	0,11	2,79	134,00	3,94								
ODS N° 6	Dol inf	0,45	0,08	0,20	0,02	0,14	0,02	0,18	2,55	197,00	3,92								
ODS N° 7	Dol inf	0,40	0,07	0,18	0,02	0,15	0,03	0,16	2,66	797,00	3,97								
ODS N° 8	Dol int	0,83	0,15	0,40	0,05	0,35	0,06	0,77	2,62	1643,00	3,92								
ODS N° 9	Dol sup	0,35	0,06	0,16	0,02	0,12	0,02	0,20	2,81	544,00	3,85								
ODS N° 10	Dol sup	0,62	0,10	0,26	0,03	0,19	0,03	0,13	2,79	510,00	4,34								
ODS N° 11	Dol sup	0,01	0,01	0,01	0,001	0,02	0,01	0,009	2,75	293,00	4,43								
ODS N° 12	Dol sup	0,80	0,13	0,34	0,04	0,24	0,03	0,21	2,69	495,00	4,27								
ODS N° 13	Dol sup	0,61	0,11	0,27	0,03	0,18	0,02	0,24	2,65	71,00	4,26								
ODS N° 14	Dol sup	0,73	0,13	0,31	0,04	0,22	0,03	0,12	2,79	93,00	4,09								
ODS N° 15	Dol sup	0,76	0,13	0,32	0,04	0,21	0,03	0,16	2,73	5138,00	3,85								
ODS N° 16	Dol sup	0,69	0,12	0,29	0,03	0,22	0,03	0,20	2,69	1541,00	4,20								
ODS N° 17	Dol sup	0,69	0,12	0,31	0,04	0,21	0,03	0,27	2,77	847,00	3,78								
ODS N° 18	Dol sup	0,73	0,13	0,33	0,04	0,24	0,03	0,22	2,81	258,00	3,90								

Base de données de l'indice de Chaa'b Lhamrat :

ID	PF (%)	S (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K2O (%)	MnO (%)	TiO2 (%)	P2O5 (%)	Na2O (%)	As (ppm)	B (ppm)	Ba (ppm)	Be (ppm)	Bi (ppm)	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Li (ppm)	Mo (ppm)	Nb (ppm)	Ne (ppm)	Pb (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)	Sn (ppm)
CHL 1	36,7	0,28	17,21	1,42	1,36	24	16,73	0,5	0,16	0,08	0,03	0,02	48	35	67	2,3	<20	6	15	15	2469	<15	<8	5	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 2	33,5	0,3	26,25	<0,10	1,34	20,21	16,4	<0,01	0,23	0,02	<0,01	0,02	25	40	30	2,2	<20	6	15	16	5323	<15	<8	3	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 3	32,32	0,37	27,6	0,91	1,31	19,09	16,05	0,23	0,16	0,06	<0,01	0,02	20	66	39	2,3	<20	6	16	16	7049	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 4	41,85	0,33	8,27	0,22	1,11	27,01	19,09	0,06	0,21	0,03	0,01	0,02	27	56	1600	2,2	<20	6	29	9	4052	<15	<8	5	17	<26	<32	<40	<20
CHL 5	33,05	0,23	25,11	1,66	1,47	18,98	17,07	0,49	0,14	0,08	0,01	0,01	17	64	67	2,3	<20	6	10	15	4702	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 6	35,21	0,27	21,65	1,39	1,53	20,32	17,28	0,4	0,22	0,07	<0,01	0,01	31	95	51	2,3	<20	6	13	16	3037	<15	<8	4	17	<26	<32	<40	<20
CHL 7	39,17	0,24	12,29	0,98	1,44	24,1	19,76	0,25	0,12	0,06	0,01	0,01	21	54	34	2,2	<20	6	9	10	3090	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 8	23,36	0,26	46,88	0,46	0,54	14,37	11,63	0,11	0,08	0,04	<0,01	0,02	77	115	46	2,2	<20	6	14	29	9282	<15	<8	3	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 9	37,42	0,29	18,95	0,41	1,11	21,09	19,12	0,08	0,11	0,04	<0,01	0,01	29	53	34	2,2	<20	6	8	13	1523	<15	<8	3	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 10	37,33	0,28	17,78	0,8	1,03	21,61	19,22	0,29	0,12	0,05	<0,01	0,01	26	75	33	2,2	<20	6	7	13	2235	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 11	37,23	0,27	18,03	1,47	0,62	20,57	19,67	0,45	0,1	0,07	<0,01	0,01	31	105	29	2,2	<20	6	11	12	2297	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 12	33	0,24	27,78	0,28	0,6	19,57	16,73	0,12	0,1	0,03	<0,01	0,02	182	73	27	2,1	<20	6	12	19	2675	<15	<8	3	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 13	40,66	0,31	11,91	0,77	0,93	22,56	20,7	0,25	0,12	0,05	0,01	0,02	25	55	39	2,2	<20	6	16	11	4496	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 14	43,32	0,25	7,44	<0,10	0,75	24,72	21,71	<0,01	0,14	0,01	<0,01	0,02	18	60	24	2,1	<20	6	12	7	3362	<15	<8	3	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 15	44,87	0,26	4,01	<0,10	1,09	25,01	23,08	<0,01	0,21	0,01	<0,01	0,03	11	73	24	2,1	<20	6	15	7	1292	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 16	43,15	0,28	7,51	<0,10	0,84	24,07	22,43	0,04	0,17	0,02	<0,01	0,02	12	45	19	2,1	<20	6	14	8	1002	<15	<8	3	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 17	38,96	0,23	16,56	0,19	0,81	22,21	19,43	0,07	0,14	0,03	<0,01	0,02	12	54	24	2,1	<20	6	12	12	485	<15	<8	3	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 18	27,35	0,2	40,79	<0,10	0,72	16,3	12,97	<0,01	0,11	0,01	<0,01	0,03	12	65	28	2,2	<20	6	9	21	1059	<15	<8	2	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 19	35,46	0,24	22,28	<0,10	2,15	20,07	18,07	<0,01	0,14	0,02	<0,01	0,01	22	50	34	2,2	<20	6	19	17	2772	<15	11	3	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 20	33,11	0,34	27,65	0,96	0,77	18,15	16,56	0,29	0,15	0,05	<0,01	0,02	12	62	76	2,1	<20	6	24	15	7742	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 21	33,15	0,068	27,25	<0,10	0,84	21,11	15,71	<0,01	0,18	0,01	0,04	0,03	14	71	32	2,1	<20	6	19	13	1063	<15	<8	4	17	<26	<32	<40	<20
CHL 22	39,85	0,074	13,11	0,29	0,95	25,32	18,17	0,1	0,23	0,04	0,05	0,02	12	101	33	2,2	<20	6	8	9	3244	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 23	36,75	0,072	17,82	1,58	1,58	22,07	17,52	0,65	0,2	0,09	0,07	0,02	17	175	40	2,3	<20	6	19	10	1538	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 24	42,5	0,25	9,13	<0,10	1,2	23,97	21,26	<0,01	0,18	0,01	<0,01	0,03	16	84	23	2,1	<20	6	16	7	1002	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 25	44,4	0,26	4,37	0,4	1,38	24,92	22,45	0,14	0,16	0,03	<0,01	0,02	14	72	34	2,1	<20	6	30	7	1385	<15	<8	4	<17	<26	<32	<40	<20
CHL 26	44,43	0,27	5,46	0,18	0,81	24,31	22,86	<0,01	0,18	0,02	<0,01	0,04	19	81	22	2,2	<20	6	29	7	2534	<15	<8	3	<17	<26	<32	<40	<20
ID	Sr (ppm)	Zn (ppm)	Ca (ppm)	Ge (ppm)	In (ppm)	Sc (ppm)	Te (ppm)	V (ppm)	W (ppm)	Zr (ppm)	Y (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Th (ppm)	Dreel e (SI)	Au (ppb)	
CHL 1	57	23	7	27	<1	11	<50	19	5	35	4,13	4,80	10,77	1,28	5,19	1,13	0,27	1,15	0,15	0,79	0,15	0,43	0,06	0,36	0,05	0,97	2,5	<1	
CHL 2	52	23	3	38	<1	9	<50	16	1	18	2,38	3,32	7,33	0,91	3,83	0,86	0,19	0,84	0,11	0,49	0,08	0,21	0,03	0,15	0,02	0,24	2,64	<1	
CHL 3	55	21	11	30	<1	10	<50	25	<1	30	3,52	4,13	9,24	1,12	4,51	0,98	0,22	0,98	0,13	0,67	0,13	0,35	0,05	0,29	0,04	0,81	2,61	<1	
CHL 4	85	19	5	11	<1	10	<50	18	<1	20	1,85	3,09	6,22	0,76	3,07	0,66	0,73	0,70	0,08	0,35	0,06	0,17	0,02	0,15	0,02	0,43	2,85	<1	
CHL 5	42	20	8	32	<1	11	<50	22	<1	36	3,99	4,17	9,10	1,11	4,48	1,05	0,24	1,09	0,14	0,73	0,14	0,40	0,05	0,35	0,05	1,04	2,8	2	
CHL 6	48	20	7	20	<1	11	<50	26	1	32	4,43	5,40	11,31	1,37	5,48	1,22	0,27	1,26	0,16	0,85	0,16	0,44	0,06	0,36	0,05	1,02	2,74	1	
CHL 7	49	19	10	22	<1	10	<50	18	<1	29	3,94	4,47	9,90	1,18	4,76	1,09	0,25	1,11	0,15	0,76	0,14	0,40	0,05	0,34	0,05	0,98	2,55	<1	
CHL 8	39	24	4	25	<1	10	<50	18	1	24	2,28	3,03	6,72	0,82	3,31	0,72	0,16	0,71	0,09	0,44	0,08	0,24	0,03	0,19	0,03	0,57	2,45	<1	
CHL 9	46	20	8	25	<1	10	<50	15	1	23	3,12	4,86	8,84	1,08	4,42	0,96	0,20	0,97	0,12	0,60	0,11	0,31	0,04	0,25	0,04	0,55	2,44	<1	
CHL 10	49	18	6	21	<1	10	<50	18	<1	29	3,24	3,99	8,92	1,12	4,49	0,98	0,20	0,97	0,12	0,61	0,11	0,33	0,04	0,27	0,04	0,72	2,6	<1	
CHL 11	50	17	7	18	<1	10	<50	16	<1	31	3,63	4,16	9,31	1,12	4,49	0,98	0,21	1,01	0,13	0,68	0,13	0,38	0,05	0,33	0,05	1,01	2,86	<1	
CHL 12	44	22	8	24	<1	10	<50	20	<1	20	2,50	3,32	7,43	0,91	3,76	0,82	0,16	0,81	0,10	0,49	0,09	0,24	0,03	0,19	0,03	0,44	2,69	<1	
CHL 13	54	18	6	16	<1	10	<50	19	<1	25	3,27	3,78	8,39	1,04	4,28	0,98	0,21	0,97	0,13	0,61	0,11	0,33	0,04	0,27	0,04	0,70	2,71	1	
CHL 14	47	16	6	8	<1	9	<50	9	1	18	1,66	2,45	5,37	0,68	2,84	0,63	0,13	0,62	0,07	0,32	0,06	0,15	0,02	0,11	0,01	0,19	2,6	1	
CHL 15	58	20	6	8	<1	9	<50	8	<1	15	1,49	2,77	6,02	0,75	3,04	0,62	0,13	0,62	0,07	0,31	0,05	0,14	0,02	0,09	0,01	0,15	2,57	<1	
CHL 16	45	16	5	17	<1	10	<50	7	2	18	1,56	2,80	5,94	0,78	3,00	0,60	0,16	0,59	0,10	0,34	0,08	0,19	0,04	0,14	0,04	1,09	2,56	<1	
CHL 17	48	15	8	24	8	9	<50	13	<1	20	1,54	2,50	5,47	0,67	2,65	0,53	0,12	0,51	0,07	0,30	0,06	0,16	0,02	0,13	0,02	0,32	2,68	1	
CHL 18	41	15	4	50	<1	9	<50	10	<1	16	1,22	2,68	5,70	0,68	2,67	0,50	0,11	0,48	0,05	0,26	0,04	0,12	0,01	0,08	0,01	0,22	2,67	<1	
CHL 19	49	19	6	34	<1	9	<50	16	3	19	1,79	2,70	6,25	0,76	3,10	0,65	0,15	0,64	0,08	0,38	0,07	0,19	0,02	0,14	0,02	0,23	2,81	1	
CHL 20	53	16	8	30	<1	10	<50	13	<1	28	2,83	3,75	8,40	1,06	4,21	0,85	0,20	0,82	0,11	0,54	0,10	0,29	0,04	0,24	0,04	0,57	2,47	<1	
CHL 21	54</																												

Base de données du gisement de Jbel Laassel :

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	P2O5	As	B	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Ge
ECHT RCJL90 59 60	car	37,91	7,91	3,54	12,34	11,18	3,34	0,15	0,46	0,15	24	36	285	1,1	0	0	76	474	0
ECHT RCJL90 60 61	car	20,51	3,75	1,95	20,29	16,1	1,43	0,2	0,23	0,07	148	8	101	1,2	0	0	22	45	0
ECHT RCJL90 61 62	car	21,02	4,08	2,5	19,84	15,54	1,64	0,15	0,28	0,08	9	17	83	1,1	0	0	28	196	0
ECHT RCJL90 62 63	car	11,56	1,43	1,44	23,97	18,43	0,74	0,18	0,11	0,02	30	8	47	1,1	0	0	12	47	0
ECHT RCJL90 63 64	car	24,56	5,74	1,96	17	14,5	2,33	0,15	0,32	0,12	56	16	167	1,1	0	0	16	39	0
ECHT RCJL90 64 65	car	29,26	6,41	1,82	15,89	13,69	2,72	0,13	0,38	0,11	11	18	210	1,2	0	0	41	64	0
ECHT RCJL90 65 66	car	22,8	1,19	0,99	21,74	15,27	1,06	0,16	0,08	0,01	22	7	59	1	0	0	10	82	0
ECHT RCJL90 66 67	car	17,88	4,73	2,57	18,97	17,05	2,02	0,16	0,29	0,08	16	18	425	1,2	0	0	17	51	0
ECHT RCJL90 67 68	car	35,88	7,87	2,28	13,69	11,51	3,46	0,17	0,45	0,13	77	52	398	1,2	0	0	21	50	0
ECHT RCJL91 3 4	car	24,46	5,55	1,88	18,44	13,89	2,31	0,36	0,3	0,07	25	22	303	1,3	0	0	21	54	0
ECHT RCJL91 4 5	car	22,64	2,06	1,66	21,54	14,65	1,35	0,33	0,14	0,05	8	5	171	1,2	0	0	22	53	0
ECHT RCJL91 5 6	car	18,17	1,48	1,57	23,78	15,3	1,03	0,37	0,11	0,02	35	0	175	1,2	0	0	23	25	0
ECHT RCJL91 6 7	car	9,63	0	1,66	25,78	19,03	0,24	0,42	0,05	0,02	28	8	7909	1,2	0	0	35	145	0
ECHT RCJL91 7 8	car	18,06	1,47	1,61	24,28	14,63	1,13	0,34	0,11	0,05	0	10	533	1,2	0	0	42	17	0
ECHT RCJL91 8 9	car	56,65	10,09	1,97	7,26	5,67	3,21	0,21	0,56	0,15	61	36	396	1,2	0	0	63	53	0
ECHT RCJL91 9 10	car	56,27	11,33	2,69	7,99	3,27	4,32	0,17	0,75	0,18	244	47	566	1,1	0	0	64	69	0
ECHT RCJL91 10 11	car	27,82	7,34	2,42	17,21	12,51	2,76	0,36	0,41	0,11	43	33	258	1,2	0	0	39	53	0
ECHT RCJL91 11 12	car	34,89	4,14	4,05	15,46	11,57	2,15	0,29	0,22	0,05	10	27	108	1,3	0	0	28	52	0
ECHT RCJL91 12 13	car	17,1	0,67	2,19	22,79	17,05	0,71	0,33	0,08	0,03	58	0	81	1,2	0	0	17	16	0
ECHT RCJL91 13 14	car	36,28	7,76	2,13	14,3	10,54	3,54	0,21	0,44	0,1	75	32	256	1,2	0	0	39	89	0
ECHT RCJL91 14 15	car	35,22	6,03	4,64	14,52	10,93	3,06	0,24	0,32	0,09	12	32	232	1,7	0	0	30	47	0
ECHT RCJL91 15 16	car	12,37	0,67	2,32	23,72	18,6	0,67	0,34	0,08	0,03	10	0	94	1,4	0	0	20	16	0
ECHT RCJL91 16 17	lave	34,14	14,16	8,66	6,86	10,18	0,81	0,19	5,67	1,21	15	36	30	1,9	0	0	117	32	0
ECHT RCJL91 17 18	lave	33,74	13,41	9,75	5,87	10,95	0,59	0,15	5,75	2,15	16	55	49	1,3	0	0	130	24	0
ECHT RCJL91 18 19	lave	34,03	13,99	9,2	5,49	11,62	0,48	0,14	5,03	1,85	10	45	71	1,8	0	0	106	19	0
ECHT RCJL91 19 20	car	28,27	12,03	8	10,37	12,44	0,45	0,25	3,89	1,57	26	36	68	1,8	0	0	89	35	0
RCJL 86 23 24	carb	38,53	8,31	1,77	11,01	12,87	2,94	0,18	0,30	0,12	62	58	3731	0,4	0	0	42	37	0
RCJL 86 27 28	carb	39,6	8,81	2,21	10,13	11,79	3,33	0,2	0,44	0,14	27	69	2737	0,5	0	0	27	45	0
RCJL 86 16 17	carb	23,31	4,22	2,19	19,54	14,87	1,9	0,28	0,2	0,06	0	40	3345	0,4	0	0	18	28	0
RCJL 86 11 12	sil	26,07	5,29	2,28	17,51	14,39	2,47	0,26	0,26	0,08	0	54	3027	0	0	0	22	33	0
RCJL 86 9 10	sil	30,07	7,42	2,14	14,65	13,81	3,22	0,3	0,32	0,1	15	55	1849	0	0	0	19	55	0
RCJL 86 19 20	carb	35,95	7,57	2,38	12,96	12,1	2,96	0,2	0,36	0,11	0	59	5526	0,4	0	0	21	43	0
RCJL 86 24 25	carb	39,23	7,88	1,76	11,72	11,92	2,9	0,27	0,39	0,12	0	53	7139	0,6	0	0	21	43	0
RCJL 86 12 13	sil	53,49	12,74	3,37	3,88	8,38	5,08	0,1	0,61	0,22	18	92	1134	0	0	0	35	112	0
RCJL 86 21 22	carb	11,35	1,45	1,49	25,79	17,37	0,79	0,32	0,07	0,02	0	31	4274	1,3	0	0	13	264	0
RCJL 86 10 11	sil	9,43	1,97	1,72	25,7	17,26	1,15	0,35	0,09	0,02	0	32	3774	1,1	0	0	12	18	0
RCJL 86 29 30	carb	30,98	6,44	2,32	14,47	13,28	2,39	0,27	0,32	0,09	0	55	5232	0,7	0	0	21	36	0
RCJL 86 25 26	carb	13,54	2,57	1,82	22,5	18,29	1,15	0,3	0,13	0,03	0	31	3884	1,1	0	0	13	23	0
RCJL 86 17 18	sil	52,01	11,86	2,97	5,3	9,01	4,33	0,11	0,57	0,18	0	86	2946	0	0	0	25	55	0
RCJL 86 20 21	carb	16,3	2,59	1,76	23,26	15,75	1,18	0,32	0,12	0,03	27	35	4500	1	0	0	13	132	0
RCJL 86 26 27	carb	17,81	2,52	2,01	21,68	16,19	1,26	0,34	0,13	0,04	14	32	2287	1,5	0	0	21	21	0
RCJL 86 13 14	p	53,18	11,93	4,29	4,05	9,16	4,52	0,1	0,57	0,19	0	103	861	0,6	0	0	37	51	0
RCJL 86 28 29	carb	53,35	11,21	2,18	4,54	9,14	4,38	0,16	0,53	0,18	0	80	12494	0,3	0	0	24	99	0
RCJL 86 14 15	p	53,49	11,16	4,23	4,24	9,5	4,49	0,11	0,56	0,2	0	91	1432	0,7	0	0	35	49	0
RCJL 86 22 23	carb	17,25	3,65	1,39	22,19	15,96	1,67	0,25	0,21	0,05	0	35	4265	0,8	0	0	11	22	0
RCJL 86 18 19	sil	58,9	11,92	2,85	3,46	6,73	4,97	0,09	0,55	0,18	27	78	2581	0	0	0	19	61	0
RCJL 45 35 36	sil	40,86	9,56	3,48	10,58	9	4,42	0,24	0,56	0,14	63	67	691	0	0	0	86	66	0
RCJL 45 31 32	carb	19,57	3,54	4,03	21,04	13,56	1,83	0,61	0,21	0,05	47	101	211	0,6	0	0	68	66	0
RCJL 45 14 15	carb	36,42	9,24	2,77	12,49	11,09	4,32	0,23	0,56	0,13	24	65	757	0,9	0	0	47	66	0
RCJL 45 12 13	carb	16,16	3,01	2,3	24,17	13,32	1,95	0,32	0,15	0,03	12	20	103	0	0	0	44	25	0
RCJL 45 13 14	sil	20,89	4,47	2,88	21,61	12,99	2,38	0,31	0,28	0,08	40	36	327	0	0	0	54	95	0
RCJL 45 17 18	sil	43,61	10,01	2,88	10,03	7,6	5,24	0,35	0,6	0,12	56	64	399	0,2	0	0	41	70	0
RCJL 45 38 39	carb	14,09	1,58	2,56	23,31	14,57	0,84	0,28	0,28	0,07	34	10	37	0	0	0	30	15	0
RCJL 45 11 12	carb	32,55	6,76	2,44	13,33	11,97	3,05	0,21	0,32	0,08	13	40	1048	0,5	0	0	25	38	0
RCJL 45 34 35	carb	10,94	0,86	2,89	27,18	16,33	0,72	0,42	0,05	0,03	28	18	37	0	0	0	36	16	0
RCJL 45 32 33	carb	16,74	3,38	3,53	22,48	14,34	1,77	0,54	0,18	0,05	37	35	184	0,2	0	0	51	39	0
RCJL 45 33 34	carb	13,9	2,82	3,22	23,93	15,59	1,53	0,42	0,15	0,04	12	29	72	0	0	0	40	25	0
RCJL 45 7 8	sil	54,87	12,45	4,05	3,48	6,97	5,3	0,11	0,7	0,15	23	102	590	1,2	0	0	48	82	0
RCJL 45 9 10	carb	49,96	10,3	3,65	5,91	7,68	5,67	0,11	0,61	0,13	43	71	585	0,5	0	0	36	57	0
RCJL 45 41 42	carb	25,5	4,77	3,17	17,81	12,13	3	0,5	0,28	0,06	32	35	162	0,3	0	0	40	32	0
RCJL 46 29 31	carb	14,89	1,26	2,83	24,38	14,75	0,95	0,58	0,06	0,03	12	17	14215	0	0	0	45	15	0
RCJL 46 24 25	sil	13,06	3,7	3,44	24,78	14,89	1,23	0,62	0,24	0,04	17	30	1819	0,3	0	0	44	32	0
RCJL 46 19 20	carb	12,64	0,76	2,69	26,62	15,33	0,72	0,54	0,04	0,02	0	22	8505	0,4	0	0	32	74	0
RCJL 46 22 23	sil	57,19	10,15	2,84	4,27	5,94	4,43	0,2	0,53	0,13	8	65	1754	0,8	0	0	47	71	0
RCJL 46 23 24	sil	40,24	9,57	3,43	10,92	10,16	3,24	0,33	0,49	0,13	44	63	1960	0,9	0	0	61	134	0
RCJL 46 27 28	sil	53,46	10,46	3,96	4,42	7,62	3,47	0,2	0,58	0,12	12	71	2327	0,3	0	0	52	68	0
RCJL 46 25 26	carb	16,09	2,04	3,87	22,94	14,8	0,77	0,62	0,11	0,03	25	28	1604	0,4	0	0	58	117	0
RCJL 46 21 22	carb	12,87	1,13	2,66	24,58	15,04	0,92	0,45	0,06	0,02	30	11	4609	0,4	0	0	62	30	0
RCJL 46 26 27	carb	15,86	3,37	4,39	22,3	16,17	1,08	0,58	0,19	0,04	0	33	544	0,2	0	0	65	26	0
RCJL 46 29 30	sil	53,55	11,04	4,67	4,65	7,73	4,51	0,22	0,64	0,15	0	88	727	0	0	0	63	68	0
RCJ																			

	Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	Sr	W	Y	Zn	Cu (%)	CuOx (%)
ECHT RCJL90 59 60	73	102	0	914	97	0	49	162	59	0	12	349	0,04	0,02
ECHT RCJL90 60 61	32	102	0	138	55	0	0	80	101	0	6	511	0,12	0,07
ECHT RCJL90 61 62	46	106	0	261	59	0	0	130	51	0	9	513	0,47	0,25
ECHT RCJL90 62 63	5	104	0	61	36	0	0	82	114	0	3	495	1,09	0,70
ECHT RCJL90 63 64	39	84	0	58	62	0	0	86	76	0	9	443	1,68	0,85
ECHT RCJL90 64 65	53	108	0	48	64	0	0	112	49	0	11	520	0,78	0,64
ECHT RCJL90 65 66	5	102	0	59	54	0	0	106	141	0	4	485	0,77	0,48
ECHT RCJL90 66 67	31	92	0	32	52	0	0	89	67	0	9	513	1,09	0,25
ECHT RCJL90 67 68	48	75	0	35	85	0	44	112	36	0	12	483	0,14	0,07
ECHT RCJL91 3 4	17	112	0	38	75	0	0	112	88	0	13	476	1,52	0,75
ECHT RCJL91 4 5	5	111	0	41	47	0	0	103	122	0	6	533	0,64	0,50
ECHT RCJL91 5 6	5	105	0	38	43	0	0	92	133	0	4	529	1,06	0,79
ECHT RCJL91 6 7	5	35	0	42	36	0	0	121	310	0	10	535	0,54	0,54
ECHT RCJL91 7 8	5	38	0	50	47	0	0	76	103	0	14	547	0,40	0,41
ECHT RCJL91 8 9	20	87	0	197	96	0	52	128	33	0	14	505	0,94	0,74
ECHT RCJL91 9 10	17	103	0	186	109	0	65	120	93	0	18	500	0,50	0,39
ECHT RCJL91 10 11	17	86	0	67	75	0	0	108	54	0	14	524	0,39	0,45
ECHT RCJL91 11 12	5	99	0	45	43	0	0	111	97	0	9	543	0,32	0,21
ECHT RCJL91 12 13	5	105	0	31	30	0	0	46	72	0	6	539	0,32	0,24
ECHT RCJL91 13 14	24	105	0	78	76	0	45	103	35	0	14	524	0,58	0,47
ECHT RCJL91 14 15	5	75	0	31	72	0	0	64	44	0	9	529	0,16	0,10
ECHT RCJL91 15 16	5	91	0	22	41	0	0	137	112	0	6	546	0,17	0,10
ECHT RCJL91 16 17	21	105	0	178	96	0	69	104	163	0	29	463	0,19	0,09
ECHT RCJL91 17 18	23	119	0	117	137	0	0	178	182	0	28	351	0,13	0,06
ECHT RCJL91 18 19	22	112	0	75	102	0	71	132	245	0	21	436	0,12	NA
ECHT RCJL91 19 20	22	118	0	70	87	0	63	121	210	0	21	465	0,10	NA
RCJL 86 23 24	35	0	5	0	0	0	0	93	65	0	17	22	1,01	0,80
RCJL 86 27 28	40	0	5	0	0	0	0	84	73	0	17	29	1,79	1,19
RCJL 86 16 17	20	0	5	0	0	0	0	60	48	0	14	10	0,35	0,32
RCJL 86 11 12	27	0	4	0	0	0	0	72	60	0	14	19	1,63	1,14
RCJL 86 9 10	31	0	4	0	0	0	0	57	45	0	19	14	0,72	0,53
RCJL 86 19 20	38	0	5	0	0	0	0	62	82	0	15	15	0,52	0,51
RCJL 86 24 25	31	0	3	21	0	0	0	100	96	0	19	14	0,61	0,56
RCJL 86 12 13	63	0	7	21	26	0	0	80	43	0	25	25	0,32	0,30
RCJL 86 21 22	5	0	4	0	0	0	0	90	99	0	8	9	0,42	0,37
RCJL 86 10 11	5	0	3	0	0	0	0	105	84	0	11	21	1,01	0,94
RCJL 86 29 30	34	0	4	0	0	0	0	103	63	0	19	22	1,80	1,14
RCJL 86 25 26	18	0	4	0	0	0	0	95	89	0	14	13	1,49	0,87
RCJL 86 17 18	55	0	6	0	0	0	0	80	33	0	20	12	0,35	0,34
RCJL 86 20 21	15	0	2	0	0	0	0	92	72	0	12	2	0,56	0,53
RCJL 86 26 27	17	0	3	0	0	0	0	121	46	0	15	16	1,08	0,76
RCJL 86 13 14	57	0	5	27	26	0	0	123	18	0	23	24	0,09	0,02
RCJL 86 28 29	47	0	6	20	28	0	0	83	39	0	20	57	0,70	0,52
RCJL 86 14 15	55	0	5	0	26	0	0	136	27	0	22	13	0,09	0,00
RCJL 86 22 23	18	0	5	0	0	0	0	86	71	0	14	23	1,15	0,91
RCJL 86 18 19	60	0	5	0	0	0	0	101	28	0	16	19	0,22	0,17
RCJ L 45 35 36	5	0	0	408	83	0	0	198	46	0	0	93	2,14	0,55
RCJ L 45 31 32	5	30	0	110	54	0	0	148	57	0	6	58	1,93	1,51
RCJ L 45 14 15	5	0	0	25	53	0	0	143	43	0	2	54	1,37	0,86
RCJ L 45 12 13	5	0	0	24	42	0	0	172	53	0	0	51	1,91	1,11
RCJ L 45 13 14	5	0	0	87	74	0	0	242	63	0	0	75	2,14	1,30
RCJ L 45 17 18	5	0	0	34	61	0	0	154	47	0	3	46	0,88	0,40
RCJ L 45 38 39	5	0	0	0	41	0	0	170	72	0	0	39	1,31	0,34
RCJ L 45 11 12	5	0	0	18	37	0	0	151	45	0	0	38	2,37	1,76
RCJ L 45 34 35	5	0	0	0	32	0	0	166	58	0	0	20	0,79	0,33
RCJ L 45 32 33	5	0	0	0	34	0	0	221	52	0	0	23	0,82	0,80
RCJ L 45 33 34	5	0	0	0	32	0	0	207	47	0	0	14	1,44	0,86
RCJ L 45 7 8	5	0	0	23	73	0	0	134	21	0	3	52	0,72	0,65
RCJ L 45 9 10	5	0	0	0	44	0	0	91	53	0	0	36	0,51	0,32
RCJ L 45 41 42	5	0	0	0	39	0	0	159	41	0	2	50	0,99	0,56
RCJ L 46 20 21	5	0	0	20	44	0	0	207	246	0	3	19	0,49	0,33
RCJ L 46 24 25	5	0	0	0	37	0	0	134	90	0	2	25	0,79	0,58
RCJ L 46 19 20	5	0	0	0	30	0	0	136	219	0	0	8	0,60	0,38
RCJ L 46 22 23	5	0	0	26	46	0	0	213	42	0	0	46	1,37	0,76
RCJ L 46 23 24	5	0	0	31	47	0	0	210	57	0	2	59	0,47	0,35
RCJ L 46 27 28	5	0	0	0	50	0	0	95	43	0	0	116	3,92	1,74
RCJ L 46 25 26	5	0	0	88	49	0	0	152	82	0	2	77	1,76	0,76
RCJ L 46 21 22	5	0	0	0	39	0	0	74	110	0	0	39	0,39	0,29
RCJ L 46 26 27	5	0	0	20	37	0	0	76	51	0	0	43	1,37	0,56
RCJ L 46 29 30	44	0	0	0	48	0	0	89	22	0	2	51	0,34	0,29
RCJ L 46 28 29	28	0	0	21	47	0	0	104	18	0	2	83	0,49	0,39
RCJLS 1 79 - 80	0	0	36	0	0	0	0	45	0	16	0	NA	0,07	0,0001

Base de données de l'indice d'AmeKssa :

	Lithologie	PF	S	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	P2O5	Na2O	Ba	Cr	Cu	Pb	Sr	Zn	Ge
AMS 1	Dol	33.10	0.28	18.24	2.2	1.42	25.97	15.98	0.48	0.19	0.11	0.08	0.68	77	8	83	39	97	18	29
AMS 2	Dol	40.15	0.22	9.52	1.23	2.78	26.68	16.82	0.53	0.5	0.07	0.05	0.22	10	5	36	40	54	20	26
AMS 3	PeI	28.70	0.22	23.28	6.38	1.73	29.57	6.13	2.05	0.15	0.4	0.13	0.18	195	22	50	50	198	22	37
AMS 4	Dol	32.32	0.19	16.56	2.81	1.88	27.25	16.32	1.05	0.12	0.13	0.07	0.2	53	10	34	44	121	15	33
AMS 5	Dol	36.50	0.18	14.17	2.57	2.23	24.02	16.05	0.84	0.13	0.1	0.07	1.41	51	6	23	39	121	14	24
AMS 6	Dol	34.15	0.2	17.1	3.6	2.36	27.56	11.14	1.63	0.27	0.21	0.12	0.41	274	13	947	46	146	24	38
AMS 7	Dol	31.16	0.19	21.48	4.23	2.66	27.42	8.84	2.08	0.28	0.27	0.13	0.36	309	15	1181	44	139	27	4
AMS 8	Dol	21.73	0.17	35.19	8.84	2.19	17.25	7.4	3.82	0.29	0.61	0.15	0.14	322	31	11045	64	142	29	34
AMS 9	Dol	39.18	0.21	11.63	1.65	1.57	26.81	16.71	0.61	0.22	0.09	0.07	0.11	56	6	2050	28	100	18	20
AMS 10	SV	17.94	0.14	39.55	11.17	2.32	14.06	6.55	4.2	0.18	0.76	0.19	0.21	598	40	16495	60	139	36	42
AMS 11	Dol	37.78	0.22	13.96	2.2	1.75	26.25	15.36	0.83	0.24	0.11	0.05	0.28	205	7	7747	33	145	22	1
AMS 12	Gres	13.31	0.18	55.76	8.47	1.02	12.01	3.05	3.73	0.09	0.43	0.16	0.03	191	9	5184	60	184	23	10
AMS 13	SV	9.10	0.14	51.64	15.53	1.56	6.18	2.18	6.06	0.07	1.56	0.2	0.04	2747	43	44707	68	175	38	44
AMS 14	Dol	38.69	0.22	11.61	2	1.62	27.37	15.77	0.72	0.18	0.12	0.05	0.17	472	7	4195	36	109	30	1
AMS 15	SV	21.35	0.14	36.07	9.37	1.73	19.88	5.04	2.87	0.2	0.52	0.16	0.13	342	31	13569	46	194	29	39
AMS 16	PeI	25.11	0.18	28.54	8.06	1.63	28.47	2.74	3.27	0.09	0.49	0.16	0.06	273	30	2314	58	188	14	10
AMS 17	SV	11.76	0.13	48.8	13.8	2.03	8.94	4.58	5.4	0.09	0.84	0.19	0.01	317	54	20940	42	106	27	12
AMS 18	Dol	23.08	0.18	29.12	8.94	2.94	25.54	3.03	3.39	0.13	0.54	0.18	1.23	278	32	2196	85	148	26	1
AMS 19	PeI	37.89	0.21	12.45	2.15	2.41	27.97	13.42	0.94	0.25	0.12	0.07	0.73	187	9	1313	47	179	15	1
AMS 20	SV	19.08	0.12	39.59	10.32	1.17	14.23	8.32	4.49	0.1	1.08	0.11	0.21	269	44	6	51	123	186	54
AMS 21	Dol	27.75	0.15	30.42	6.95	1.49	18.05	10.02	2.88	0.13	0.69	0.08	0.17	217	36	4	35	141	199	30
AMS 22	PeI	36.14	0.25	13.84	1.49	3.21	35.14	7.71	0.6	0.22	0.08	0.12	0.15	374	26	1755	36	168	79	149
AMS 23	Dol	41.82	0.23	7.69	0.9	1.83	27.54	18.05	0.39	0.23	0.05	0.04	0.16	75	23	2968	35	94	44	85
AMS 24	Dol	20.47	0.2473	29.65	3.94	1.62	27.88	12.94	1.57	0.24	0.18	0.04	0.12	173	30	2	33	105	40	65
AMS 25	Dol	36.75	0.26	15.9	1.33	2.33	27.73	13.5	0.45	0.39	0.06	0.06	0.19	493	24	2771	31	126	39	64
AMS 26	PeI	31.73	0.2	19.22	5.2	1.93	31.28	6.74	1.85	0.26	0.26	0.12	0.25	435	34	1566	38	178	31	32
AMS 27	SV	12.34	0.0912	53.84	12.37	1.73	9.38	3.63	4.07	0.19	0.7	0.19	0.16	380	56	4	30	89	39	56
AMS 28	Dol	35.07	0.23	14.81	4.16	2.57	25.87	13.73	1.68	0.45	0.17	0.09	0.13	388	31	2574	26	135	27	39
AMS 29	Bre	30.75	0.27	23.35	4.05	2.1	27.62	8.56	1.39	0.36	0.24	0.11	0.12	448	31	1176	28	202	22	35
AMS 30	PeI	24.63	0.18	25.3	4.72	1.79	22.99	16.36	1.94	0.49	0.21	0.1	0.16	299	23	195	36	130	22	36
AMS 31	Dol	49.72	0.2	6.76	1.58	1.84	23.11	13.88	0.64	0.61	0.09	0.06	0.18	141	25	84	29	116	39	78
AMS 32	Dol	38.23	0.2	11.05	3.18	1.92	27.37	14.93	1.08	0.46	0.14	0.08	0.16	175	29	97	30	114	30	36
AMS 33	Dol	9.36	0.11	64.92	7.72	1.43	10.17	1.33	3.1	0.1	0.28	0.15	0.17	288	36	70	40	53	49	58
AMS 34	Gres	37.69	0.2	13.22	2.28	2.4	25.6	15.98	0.85	0.4	0.08	0.07	0.16	106	27	63	34	104	37	39
AMS 35	Dol	40.8	0.19	7.88	1.48	3.01	27.33	16.55	0.66	0.62	0.07	0.06	0.17	121	24	81	29	115	43	41
AMS 36	Dol	33.32	0.16	19.19	5.04	2.5	22.16	13.78	1.75	0.47	0.25	0.1	0.12	360	32	101	40	134	38	42
AMS 37	PeI	25.47	0.2	31.62	5.94	1.68	27.89	3.51	1.64	0.22	0.28	0.14	0.21	1326	34	645	27	120	27	34
AMS 38	Dol	35.49	0.19	15.91	2.95	2.06	26.38	13.65	1.3	0.41	0.15	0.08	0.12	393	27	1927	34	108	41	21
AMS 39	SV	12.44	0.093	52.1	12.05	1.98	8.87	5.43	4.86	0.12	0.63	0.17	0.17	320	53	4	27	81	39	56
AMS 40	Dol	33.6	0.0042	24.5	0.54	1.92	21.73	14.86	0.26	0.33	0.03	0.01	0.43	78	11	3263	26	83	13	49
AMS 41	SV	7.06	0.0001	53.11	16.04	1.55	4.7	2.76	6.92	0.06	0.86	0.15	0.72	314	45	45284	50	142	24	116
AMS 42	Dol	44.27	0.054	1.69	0.27	2.93	30.05	18.05	0.18	0.44	0.02	0.02	0.37	142	5	1472	26	95	20	8
AMS 43	SV	6.64	0.0001	50.4	18.9	1.56	3.51	2.6	8.6	0.05	1.47	0.19	0.95	372	48	36281	40	95	20	91
AMS 44	Dol	35.29	0.19	17.95	2.91	1.68	23.1	15.51	0.82	0.27	0.21	0.08	0.29	3601	12	219	26	221	8	42
AMS 45	Dol	40.39	0.0001	9.29	1.13	1.96	25.74	18.37	0.58	0.33	0.06	0.02	0.53	123	5	1324	26	90	13	40
AMS 46	SV	17.5	0.0001	39.08	11.14	2.09	12.07	7.38	4.36	0.17	0.63	0.09	0.51	213	30	34752	32	130	19	88
AMS 47	Dol	41.12	0.13	8.27	1.04	1.59	26.29	18.82	0.5	0.4	0.05	0.03	0.3	145	5	942	26	107	13	30
AMS 48	Bre	19.98	0.042	34.35	9.93	4.47	22.04	1.8	4.66	0.13	0.49	0.11	0.33	243	18	53	45	53	13	80
AMS 49	Gres	2.54	0.0001	79.24	7.21	1.02	2.81	0.88	4.13	0.05	0.12	0.1	0.45	266	25	64	26	35	4	216
AMS 50	Gres	7.71	0.071	65.4	8.42	2.69	8.06	1.28	3.74	0.15	0.46	0.14	0.41	341	25	518	37	50	14	102
AMS 51	SV	11.8	0.0001	51.91	12.6	2.42	9.16	3.83	4.56	0.15	0.53	0.12	0.43	225	29	9795	30	58	12	86
AMS 52	Dol	35.93	0.14	13.29	4.08	2.33	24.9	14.91	1.92	0.5	0.15	0.06	0.31	159	9	1223	26	94	6	36
AMS 53	PeI	7.64	0.0504	64.8	9.45	2.6	6.36	2.5	4.12	0.15	0.44	0.14	0.34	206	21	261	46	43	17	81
AMS 54	SV	8.71	0.0001	57.93	12.51	3.28	6.38	3.05	4.93	0.13	0.52	0.14	0.38	223	26	5835	32	60	14	113
AMS 55	Dol	33.99	0.0059	16.91	4.45	2.59	24.28	13.52	1.8	0.46	0.17	0.09	0.2	135	8	499	40	76	10	39
AMS 56	PeI	6.99	0.0001	65.33	10.08	2.5	5.79	2.48	4.19	0.11	0.47	0.16	0.36	252	20	93	42	49	13	95
AMS 57	SV	7.13	0.0051	63.04	10.99	3.18	3.69	4.7	4.4	0.15	0.46	0.13	0.48	201	24	1811	32	62	10	73
AMS 58	Dol	7.19	0.0762	11.18	3.04	2.7	25.94	15.76	1.45	0.51	0.13	0.04	0.22	95	7	97	30	90	6	38
AMS 59	SV	19.36	0.0999	41.94	8.41	2.88	14.49	7.22	2.89	0.23	0.33	0.11	0.56	168	13	485	59	62	12	364
AMS 60	Dol	36.97	0.22	12.92	2.7	2.3	26.61	15.29	0.56	0.45	0.1	0.03	0.53	218	20	77	55	132	26	166
AMS 61	Gres	4.65	0.18	77.49	6.84	1.06	4.41	0.9	2.61	0.13	0.11	0.07	0.15	540	39	176	71	52	8	159
AMS 62	Bre	21.78	0.37	36.9	8.21	1.56	25.44	1.42	1.92	0.18	0.35	0.1	0.49	585	42	933	70	207	11	121
AMS 63	Dol	40.23	0.34	8.99	1.42	1.49	28.07	17.02	0.09	0.31	0.07	0.02	0.55	791	17	1031	26	206	11	72
AMS 64	Dol	35.72	0.31	15.98	3.18	1.56	24.44	15.01	0.51	0.25	0.14	0.02	0.62	120	21	10618	55	138	14	79
AMS 65	PeI	24.79	0.22	30.25	7.8	1.22	29.99	1.42	1.68	0.1	0.34	0.1	0.69	332	39	1726	47	122	14	73
AMS 66	Bre	35.69	0.26	11.44	3.38	1.06	44.12	1.09	0.57	0.1	0.13	0.08	0.64	229	21	1623	28	111	10	101
AMS 67	Dol	38.26	0.22	14.29	0.84	1.71	27.35	15.15	0.06	0.24	0.04	0.02	0.5	129						

	Lithologie	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	d
AMS 1	Dol	56	5.01	5.11	11.24	1.36	5.27	1.05	0.25	1.04	0.14	0.74	0.14	0.39	0.05	0.36	0.05	0.62	2.66
AMS 2	Dol	48	1.27	1.24	3.17	0.35	1.33	0.27	0.08	0.28	0.04	0.23	0.04	0.12	0.02	0.11	0.02	0.19	2.87
AMS 3	Pel	59	1.25	2.13	4.47	0.53	1.85	0.32	0.12	0.31	0.04	0.21	0.04	0.14	0.02	0.16	0.02	0.43	2.75
AMS 4	Dol	73	2.01	2.23	5.17	0.55	2.11	0.41	0.11	0.43	0.06	0.33	0.07	0.21	0.03	0.21	0.03	0.26	2.69
AMS 5	Dol	31	4.41	4.31	44.14	1.10	4.26	0.88	0.21	1.14	0.13	0.69	0.13	0.37	0.05	0.33	0.05	0.42	2.81
AMS 6	Dol	94	8.48	8.09	16.77	2.12	8.46	1.89	0.52	1.98	0.29	1.66	0.31	0.89	0.13	0.88	0.13	1.46	2.76
AMS 7	Dol	45	7.83	8.65	18.35	2.23	8.90	1.98	0.54	2.05	0.30	1.69	0.31	0.89	0.12	0.84	0.12	1.52	2.62
AMS 8	Dol	108	13.67	14.32	28.44	3.41	13.24	2.71	0.66	2.80	0.41	2.42	0.48	1.50	0.22	1.54	0.23	3.87	2.62
AMS 9	Dol	58	6.90	7.37	16.43	1.95	7.72	1.66	0.419	1.72	0.2345	1.292	0.2320	0.6499	0.0849	0.5641	0.0802	0.86	2.68
AMS 10	SV	133	13.54	15.58	32.38	4.01	15.56	3.23	0.80	3.15	0.45	2.65	0.53	1.61	0.23	1.61	0.24	3.86	2.66
AMS 11	Dol	40	5.57	7.07	14.98	1.82	7.11	1.49	0.41	1.59	0.21	1.06	0.19	0.51	0.07	0.42	0.06	0.90	2.66
AMS 12	Gres	76	8.70	10.19	20.13	2.52	9.73	1.92	0.95	2.07	0.27	1.60	0.32	1.01	0.15	1.05	0.16	2.84	2.48
AMS 13	SV	163	14.530	13.50	26.62	3.34	12.76	2.497	0.94	2.61	0.3811	2.576	0.5729	1.923	0.2944	2.0710	0.3041	4.661	2.58
AMS 14	Dol	61	3.72	6.03	12.33	1.52	5.91	1.16	0.38	1.17	0.145	0.753	0.135	0.378	0.0494	0.3255	0.0481	0.35	2.69
AMS 15	SV	78	13.36	15.79	39.96	3.99	15.48	3.103	0.74	3.16	0.4340	2.488	0.4779	1.442	0.2016	1.3600	0.1953	3.64	2.54
AMS 16	Pel	79	10.59	13.08	26.30	3.16	12.11	2.36	0.55	2.37	0.33	1.92	0.38	1.21	0.18	1.21	0.18	3.01	2.5
AMS 17	SV	81	14.05	14.77	31.34	3.98	15.54	3.13	0.70	3.02	0.434	2.65	0.54	1.70	0.252	1.761	0.259	4.23	2.62
AMS 18	Dol	85	12.10	13.40	27.40	3.29	12.75	2.56	0.59	2.53	0.36	2.16	0.43	1.34	0.20	1.36	0.20	3.37	2.46
AMS 19	Pel	51	7.78	7.63	16.79	2.04	8.14	1.83	0.49	2.00	0.280	1.50	0.263	0.713	0.0912	0.585	0.0816	0.87	2.55
AMS 20	SV	204	14.07	12.11	25.08	3.01	12.12	2.54	0.59	2.57	0.38	2.41	0.50	1.57	0.23	1.61	0.23	3.00	2.65
AMS 21	Dol	122	10.03	8.94	18.89	2.26	9.21	1.97	0.50	2.10	0.30	1.84	0.36	1.10	0.16	1.06	0.15	1.78	2.75
AMS 22	Pel	67	9.03	9.48	27.32	2.43	9.66	2.10	0.55	2.17	0.30	1.72	0.31	0.89	0.12	0.86	0.13	1.53	2.62
AMS 23	Dol	120	1.61	5.57	6.64	14.65	1.61	6.41	1.30	0.32	1.29	0.17	0.97	0.17	0.49	0.07	0.46	0.07	2.75
AMS 24	Dol	188	6.92	7.74	16.44	1.99	7.91	1.65	0.42	1.70	0.24	1.32	0.23	0.67	0.09	0.65	0.09	1.73	2.78
AMS 25	Dol	198	7.22	5.57	12.60	1.54	6.49	1.59	0.50	1.75	0.25	1.41	0.24	0.66	0.09	0.59	0.09	0.70	2.67
AMS 26	Pel	62	8.22	9.25	32.35	2.23	8.74	1.84	0.52	2.11	0.28	1.55	0.28	0.83	0.12	0.81	0.11	1.94	2.78
AMS 27	SV	185	10.40	11.21	26.38	3.13	12.22	2.47	0.61	2.40	0.34	2.07	0.40	1.30	0.20	1.46	0.21	4.14	2.67
AMS 28	Dol	68	11.17	10.67	22.36	2.55	10.18	2.34	0.651	2.67	0.3809	2.093	0.3580	0.9865	0.1297	0.8932	0.1206	1.81	2.68
AMS 29	Bre	158	9.75	8.38	16.96	1.97	7.95	1.87	0.57	2.14	0.32	1.83	0.32	0.92	0.13	0.87	0.12	1.79	2.52
AMS 30	Pel	169	14.71	11.42	25.53	2.75	11.19	2.50	0.65	2.79	0.42	2.50	0.46	1.31	0.18	1.13	0.16	1.76	2.68
AMS 31	Dol	221	9.87	7.54	16.27	1.75	7.18	1.69	0.44	1.88	0.29	1.74	0.32	0.88	0.11	0.75	0.11	0.89	2.77
AMS 32	Dol	59	20.020	17.11	41.77	4.47	18.41	3.921	1.03	4.21	0.5845	3.356	0.6176	1.739	0.2213	1.4410	0.2019	2.717	2.79
AMS 33	Dol	87	6.32	6.53	15.74	1.92	7.80	1.54	0.38	1.48	0.200	1.168	0.230	0.699	0.0990	0.6824	0.0985	1.69	2.77
AMS 34	Gres	77	11.34	9.20	21.57	2.29	9.39	2.132	0.56	2.45	0.3526	2.002	0.3497	0.927	0.1119	0.7084	0.0968	0.50	2.49
AMS 35	Dol	68	9.97	6.63	14.68	1.62	6.83	1.74	0.49	2.09	0.32	1.86	0.32	0.85	0.11	0.70	0.09	0.57	2.66
AMS 36	Dol	85	13.86	10.16	28.53	2.55	10.53	2.41	0.64	2.80	0.404	2.38	0.43	1.21	0.156	1.010	0.138	1.75	2.6
AMS 37	Pel	86	9.16	10.14	20.57	2.32	9.28	1.97	0.76	2.13	0.28	1.64	0.30	0.87	0.12	0.80	0.11	1.86	2.83
AMS 38	Dol	63	7.45	12.20	14.54	1.70	7.04	1.69	0.50	1.87	0.264	1.47	0.253	0.704	0.0932	0.634	0.0885	1.05	2.63
AMS 39	SV	168	12.82	12.01	26.70	3.26	13.03	2.60	0.57	2.57	0.37	2.32	0.48	1.53	0.23	1.60	0.23	3.71	2.67
AMS 40	Dol	56	4.36	3.79	9.28	1.08	4.49	1.03	0.30	1.12	0.16	0.82	0.15	0.39	0.06	0.32	0.05	0.43	2.69
AMS 41	SV	177	10.61	16.34	29.10	3.63	13.69	2.46	0.54	2.40	0.33	1.99	0.43	1.45	0.22	1.59	0.24	5.92	2.64
AMS 42	Dol	28	6.86	3.32	8.43	1.10	4.91	1.44	0.44	1.73	0.26	1.40	0.23	0.59	0.07	0.45	0.06	0.18	2.65
AMS 43	SV	255	3.38	4.10	11.04	1.34	5.03	1.04	0.30	0.99	0.14	0.92	0.21	0.74	0.12	0.90	0.14	1.94	3.02
AMS 44	Dol	57	11.29	8.48	27.69	2.13	8.98	2.23	1.55	2.84	0.37	2.06	0.37	1.05	0.14	0.93	0.14	1.46	2.4
AMS 45	Dol	61	9.94	7.18	17.14	2.09	8.83	2.21	0.62	2.48	0.36	1.97	0.35	0.95	0.12	0.79	0.11	0.67	2.78
AMS 46	SV	114	12.62	16.74	33.60	3.81	14.74	2.85	0.61	2.89	0.39	2.28	0.45	1.44	0.21	1.43	0.21	5.13	2.73
AMS 47	Dol	31	13.29	7.44	19.97	2.39	10.36	2.69	0.77	3.15	0.45	2.41	0.42	1.10	0.13	0.83	0.11	0.71	2.75
AMS 48	Bre	173	25.39	21.14	46.57	5.56	22.50	4.54	1.047	4.68	0.6856	4.203	0.8753	2.7730	0.3978	2.6960	0.3945	4.44	2.74
AMS 49	Gres	84	4.16	3.35	7.70	1.07	4.08	0.85	0.28	0.91	0.15	0.94	0.19	0.58	0.08	0.58	0.08	1.22	2.67
AMS 50	Gres	97	13.63	12.36	31.89	3.75	14.89	3.04	0.72	3.05	0.45	2.58	0.52	1.56	0.24	1.51	0.24	4.21	2.67
AMS 51	SV	126	13.31	0.62	36.11	4.00	15.77	3.11	0.69	3.05	0.42	2.46	0.49	1.53	0.22	1.50	0.22	4.79	2.6
AMS 52	Dol	75	11.840	10.97	24.56	2.55	10.40	2.287	0.61	2.71	0.3706	2.007	0.3582	0.955	0.1158	0.7216	0.1004	1.078	2.74
AMS 53	Pel	87	8.85	9.82	25.04	2.54	10.18	2.08	0.48	2.06	0.283	1.641	0.328	0.985	0.1380	0.9313	0.1361	2.89	2.41
AMS 54	SV	125	10.33	13.73	30.46	3.37	13.26	2.583	0.57	2.46	0.3325	1.928	0.3827	1.192	0.1697	1.1720	0.1726	3.89	2.56
AMS 55	Dol	54	12.58	9.07	19.69	2.15	8.89	2.13	0.59	2.53	0.38	2.14	0.39	1.05	0.13	0.80	0.11	1.22	2.63
AMS 56	Pel	112	10.46	11.08	25.52	2.97	11.90	2.45	0.58	2.38	0.336	2.00	0.40	1.22	0.174	1.188	0.174	3.48	2.6
AMS 57	SV	101	8.12	8.94	21.53	2.49	10.02	2.07	0.48	2.00	0.28	1.68	0.33	1.03	0.14	0.99	0.15	2.43	2.59
AMS 58	Dol	56	20.95	15.20	34.11	3.60	14.88	3.49	0.98	4.30	0.6366	3.57	0.636	1.659	0.1951	1.184	0.1607	1.30	2.79
AMS 59	SV	260	13.88	15.56	38.09	3.75	14.76	2.99	0.67	3.00	0.43	2.51	0.49	1.48	0.21	1.39	0.21	3.71	2.62
AMS 60	Dol	207	12.93	10.73	25.81	2.67	10.53	2.39	0.63	2.65	0.42	2.30	0.44	1.18	0.15	0.91	0.14	1.55	2.65
AMS 61	Gres	211	7.84	8.11	17.16	2.27	8.89	1.82	0.51	1.69	0.24	1.36	0.28	0.89	0.13	0.92	0.14	2.30	2.63
AMS 62	Bre	372	14.38	17.17	33.37	3.73	13.93	2.74	0.71	2.80	0.42	2.50	0.53	1.66	0.24	1.61	0.25	4.27	2.71
AMS 63	Dol	82	10.65	6.80	103.40	1.79	7.34	1.94	0.67	2.69	0.36	1.95	0.36	0.99	0.13	0.79	0.12	1.12	2.74
AMS 64	Dol	191	10.58	7.91	17.69	2.10	8.52	2.13	0.53	2.29	0.36	1.97	0.37	1.02	0.14	0.86	0.13	1.74	2.7
AMS 65	Pel	158	12.33	16.46	31.99	3.72	13.78	2.60	0.56	2.56	0.36	2.08	0.43	1.38	0.20	1.32	0.20	4.82	2.52
AMS 66	Bre	338	7.36	9.08	19.02	2.13	8.10	1.66	0.41	1.66	0.24	1.37	0.28	0.88	0.13	0.86	0.14	1.78	

Base de données de l'indice d'Assif N'Zaïd :

	Lithologie	PF	S	SiO2	A2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	MnO	TiO2	Na2O	B	Ba	Cr	Cu	Sr	Zn	Ga	Ge
ANZ 100	SV	9.61	0.15	57.32	12.06	3.21	6.05	4.39	2.74	0.1	0.36	2.21	1002	427	43	4049	98	3961	8	201
ANZ 101	SV	33.71	0.23	19.29	3.53	2.07	23.8	13.86	0.68	0.27	0.13	0.83	1426	240	21	3367	150	599	5	379
ANZ 102	SV	17.71	0.25	38.85	12.69	4.17	9.74	8.76	3.74	0.15	0.49	0.87	1345	276	54	13773	66	191	14	138
ANZ 103	Dol	23.24	0.22	32.3	9.22	3.5	13.03	12.29	2.43	0.17	0.37	1.18	2354	208	39	7428	74	325	11	133
ANZ 104	Dol	30.38	0.23	27.01	3.51	1.56	19.92	13.35	1.03	0.22	0.14	1.17	2014	165	19	1197	94	229	2	80
ANZ 105	Dol	32.45	0.27	19.86	5.14	2.43	19.34	16.27	1.28	0.2	0.18	0.98	2464	544	22	2114	95	110	5	49
ANZ 106	SV stériles	16.83	0.23	46.58	9.57	1.89	10.26	8.62	2.39	0.09	0.27	1.96	1001	804	31	140	99	246	8	92
ANZ 107	Dol stériles	38.39	0.22	14.04	2.14	1.47	25.55	15.8	0.39	0.19	0.08	0.43	1511	147	13	54	104	70	4	88
ANZ 108	SV	14.51	0.29	47.69	10.76	3.02	9.63	6.63	2.71	0.15	0.4	1.48	863	953	45	16680	88	126	10	52
ANZ 109	SV	10.26	0.29	55.73	9.7	2.23	8.43	3.07	1.9	0.2	0.33	2.21	868	31067	38	13435	967	103	7	168
ANZ 110	Dol	29.72	0.32	25.31	3.39	2.24	23.31	12.22	0.35	0.63	0.13	1.06	1503	1054	18	417	156	82	3	161
ANZ 111	SV	18.5	0.16	37.98	12.3	3.04	10.95	8.83	3.07	0.21	0.51	0.8	1395	309	52	22665	74	112	12	62
ANZ 112	Dol	29.18	0.37	24.99	4.55	0.72	31.01	4.44	0.65	0.26	0.19	1.83	1439	868	21	6605	228	180	2	33
ANZ 113	SV	15.89	0.21	46.76	10.55	2.89	12.89	4.47	2.43	0.2	0.37	1.69	585	265	39	4817	92	98	8	91
ANZ 114	SV	7.62	0.26	54.41	17.31	4.19	3.59	4.63	4.11	0.1	0.67	1.13	854	951	66	7731	75	98	15	27
ANZ 115	SV	25.69	0.33	31.81	6.14	2.46	19.21	9.2	0.96	0.41	0.2	1.55	2002	3932	24	3710	222	85	5	87
ANZ 116	SV	16.44	0.19	43.74	11.74	3.36	9.25	8.54	2.95	0.25	0.44	1.01	746	748	49	7660	74	99	10	103
ANZ 117	PN stériles	3.34	0.17	64.4	15	3.43	1.54	4.07	5.75	0.02	0.54	0.26	579	1002	60	117	140	25	13	139
ANZ 118	SB	34.57	0.27	18.12	3.09	2.38	25.5	13.01	0.01	0.59	0.12	0.51	2389	1270	14	3246	108	13	2	41
ANZ 119	Dol	35.7	0.26	14.7	2.21	3.68	28.41	12.22	0.01	0.71	0.09	0.45	2020	276	13	2128	105	51	2	33
ANZ 120	PN stériles	3.68	0.17	59.09	16.1	2.81	1.72	6.01	7.85	0.02	0.58	0.55	5	469	65	1206	94	334	18	7
ANZ 121	PN	4.32	0.2	63.23	12.44	2.43	2.47	4.13	7	0.03	0.43	5	1009	53	10625	109	288	15	7	
ANZ 122	Dol	32.73	0.29	18.76	3.54	1.47	25.89	14.39	0.01	0.34	0.13	0.59	49	213	15	5496	135	595	4	17
ANZ 123	PN stériles	3.61	0.21	68.96	11.64	2.25	1.56	4.08	5.31	0.01	0.38	0.37	23	1669	52	248	151	233	15	3
ANZ 124	PN	3.07	0.2	66.63	13.09	2.38	1.3	4.19	5.98	0.02	0.45	0.62	22	660	54	5792	87	284	15	8
ANZ 125	Dol	42.26	0.31	3.76	0.42	0.44	39.32	11.27	0.01	0.44	0.03	0.45	5	209	5	663	95	272	1	17
ANZ 126	PN stériles	4.34	0.18	63.51	13.75	2.82	2.03	4.92	5.72	0.02	0.48	0.56	43	519	57	147	84	348	17	8
ANZ 127	SB	4.28	0.19	63.27	14.03	1.46	1.43	5.05	5.06	0.02	0.56	1.3	51	1469	49	11111	130	393	16	12
ANZ 128	Dol	32.89	0.4	18.41	2.39	1.38	26.44	15.08	0.01	0.37	0.09	0.48	51	1540	9	7335	410	293	3	13
ANZ 129	PN stériles	5.75	0.17	63.34	13.92	1.97	1.89	3.94	3.71	0.05	0.45	1.15	33	611	54	21743	58	241	15	6
ANZ 130	SV	3.35	0.18	64.52	15.04	2.38	1.34	4.36	5.46	0.02	0.55	1.19	76	1598	51	188	147	213	17	7
ANZ 131	Dol	30.19	0.25	17.01	2.24	1.19	20.23	17.9	0.44	0.42	0.09	0.55	5	171	12	1362	70	140	3	13
ANZ 132	Dol	5.92	0.19	62.39	14.49	2.76	2.34	4.75	3.6	0.06	0.46	1.34	46	520	50	2573	67	232	14	7
ANZ 133	Dol	34.65	0.25	22.41	2.68	1.84	17.98	17.04	0.42	0.36	0.1	0.64	5	368	12	2141	76	163	3	11
ANZ 134	PN	4.87	0.2	62.13	13.4	2.05	1.34	4.82	4.97	0.03	0.45	0.9	6	704	64	32741	64	198	16	7
ANZ 135	Dol	33.11	0.3	24.08	2.23	1.3	18.28	17.13	0.33	0.36	0.08	0.6	5	391	14	7051	101	266	2	20
ANZ 136	Dol stériles	31.17	0.28	25.21	1.43	2.72	20.88	16.07	0.01	0.5	0.05	0.44	5	233	6	98	78	151	2	14
ANZ 137	PN	4.31	0.21	69.3	10.44	3.96	1.49	4.05	4.21	0.02	0.3	0.29	17	557	40	116	68	160	13	7
ANZ 138	Dol	42.92	0.27	8.54	1.76	1.56	26.51	16.2	0.16	0.34	0.06	0.41	5	228	8	134	77	101	2	11
ANZ 139	Dol stériles	31.61	0.28	25.56	2.2	0.93	22.33	14.7	0.2	0.34	0.07	0.39	5	645	10	394	94	102	3	9
ANZ 140	Dol stériles	41.3	0.26	9.48	2.01	1.81	27.79	17.69	0.63	0.35	0.04	0.26	33	1166	12	334	129	43	5	18
ANZ 141	Dol	30.2	1.54	33.47	0.59	0.96	20.66	12.66	0.12	0.48	0.01	0.15	63	18377	8	1451	1745	15	1	2
ANZ 142	Bre	34.7	0.32	16.63	3.94	1.33	29.71	10.28	1.26	0.27	0.12	0.22	84	3356	17	8023	141	34	9	33
ANZ 143	Dol	38.0	1.57	13.85	1.26	1.16	22.66	18.34	0.49	0.4	0.02	0.14	76	48621	9	4490	1321	19	3	16
ANZ 144	Dol	41.2	0.23	10.8	2.41	1.48	23.36	20.76	0.69	0.34	0.06	0.16	98	599	12	2030	103	41	5	13
ANZ 145	Dol	41.0	0.24	10.22	2.59	1.69	25.1	19.37	0.66	0.3	0.06	0.21	131	790	9	1838	100	34	7	27
ANZ 146	Dol	38.0	0.24	14.05	2.78	1.54	27.14	15.18	0.71	0.23	0.06	0.12	77	272	19	196	96	36	7	12
ANZ 147	Dol stériles	41.0	0.24	9.9	1.6	1.44	27.99	17.3	0.42	0.17	0.04	0.14	114	141	10	65	103	33	4	14
ANZ 148	Dol stériles	38.9	0.27	9.52	1.9	1.54	32.25	12.37	0.7	0.18	0.05	0.17	68	96	11	101	95	124	6	17
ANZ 149	Dol	35.8	0.25	15.84	2.67	2	22.66	16.33	1.12	0.23	0.07	0.13	65	104	14	13078	75	59	3	35
ANZ 150	Dol	34.8	0.26	16.77	3.56	2.56	23.12	15.11	1.28	0.29	0.09	0.1	111	202	15	8272	80	37	7	9
ANZ 151	Dol	38.7	0.27	15.19	1.64	1.5	24.46	17.74	0.58	0.3	0.03	0.08	68	208	11	2763	115	27	3	21
ANZ 152	Bre	8.9	0.23	65.78	7.41	1.45	7.01	3.04	3.22	0.09	0.14	0.12	132	306	22	1726	54	49	7	76
ANZ 153	Dol	25.7	1.8	33.05	3.59	2.03	18.61	10.11	1.36	0.25	0.08	0.08	150	25390	15	1439	1058	47	7	11
ANZ 154	Bre	9.0	0.25	66.57	6.32	1.83	7.98	2.45	2.66	0.08	0.15	0.12	134	361	27	3287	51	41	7	43
ANZ 155	Dol stériles	35.9	0.3	15.71	2.75	2.45	24.49	15.15	1.23	0.22	0.06	0.1	78	108	14	813	86	38	7	23
ANZ 156	Dol stériles	43.3	0.27	4.54	0.56	1.69	27.91	19.47	0.25	0.18	0.01	0.09	76	66	7	265	100	23	4	1
ANZ 157	Dol	35.5	0.28	17.02	1.82	2.12	22.94	15.91	0.69	0.42	0.04	0.09	53	442	10	5516	98	35	3	28
ANZ 158	SV	4.7	0.19	64.75	12.98	2.43	1.24	3.41	6.39	0.03	0.38	0.12	159	353	43	4949	38	44	17	88
ANZ 159	Dol	34.2	0.32	17.49	4	1.35	20.96	16.14	1.79	0.37	0.09	0.09	105	192	17	7647	90	32	6	36
ANZ 160	Dol	35.37	0.21	16.3	0.97	1.11	27.59	15.54	0.81	0.45	0.06	0.01	53	198	21	2610	106	47	4	23
ANZ 161	Dol	33.24	0.18	14.52	7.51	1.53	29.74	7.56	3.39	0.34	0.29	0.01	41	1142	9	997	125	39	1	8
ANZ 162	SB stériles	29.88	0.23	28.03	1.36	1.8	24	11.44	0.89	0.63	0.07	0.01	199	342	29	3323	128	48	9	20
ANZ 163	Dol	10.99	0.0484	49.47	14.03	2.57	7.56	5.28	6.95	0.22	0.54	0.01	53	2805	11	4423	137	43	2	23
ANZ 164	SV	37.81	0.21	11.72	2.62	1.71	24.16	16.64	1.54	0.47	0.12	0.05	181	402	47	16779	55	64	14	42
ANZ 165	Dol	38.33	0.17	10.16	1.94	1.16	26.07	17.77	1.18	0.54	0.1	0.01	86	1654	12	11469	167	54	1	12
ANZ 166	Dol	38.68	0.11	12.47	1.75	1.45	24.													

	Lithologie	Sc	V	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	d
ANZ 100	SV	4	1	137	11.10	13.12	28.85	3.30	14.25	2.90	0.66	2.91	0.36	2.05	0.39	1.14	0.15	1.04	0.15	3.25	2.51
ANZ 101	Dol	2	1	222	17.04	14.24	43.13	3.29	17.88	3.96	0.94	4.19	0.54	2.95	0.52	1.37	0.17	1.05	0.15	1.88	2.48
ANZ 102	SV	9	1	123	12.84	18.33	39.61	4.35	18.14	3.39	0.67	3.25	0.38	2.19	0.43	1.31	0.18	1.25	0.18	4.52	2.34
ANZ 103	Dol	6	53	148	9.60	14.39	31.28	3.45	14.58	2.72	0.54	2.66	0.31	1.70	0.32	0.96	0.13	0.91	0.13	2.75	2.58
ANZ 104	Dol	1	19	125	7.77	8.92	20.09	2.24	9.74	1.96	0.43	2.00	0.24	1.37	0.25	0.74	0.10	0.66	0.10	1.66	2.5
ANZ 105	Dol	2	26	67	8.52	12.77	54.12	2.89	12.16	2.36	0.56	2.58	0.28	1.51	0.28	0.83	0.11	0.75	0.11	2.13	2.56
ANZ 106	SV stériles	4	40	101	8.07	11.78	25.28	2.79	11.71	2.24	0.57	2.20	0.26	1.48	0.28	0.87	0.12	0.86	0.13	2.62	2.58
ANZ 107	Dol stériles	1	13	83	8.60	11.42	26.24	2.87	12.38	2.42	0.49	2.46	0.28	1.50	0.27	0.77	0.10	0.61	0.09	1.56	2.58
ANZ 108	SV	6	62	88	13.13	15.84	35.32	3.74	16.07	3.28	0.794	3.36	0.41	2.31	0.43	1.27	0.17	1.17	0.17	3.64	2.51
ANZ 109	SV	4	28	139	12.02	11.05	23.66	2.86	12.87	3.09	5.03	4.49	0.43	2.46	0.43	1.19	0.16	1.21	0.21	2.80	2.65
ANZ 110	Dol	2	3	140	22.99	12.14	29.10	3.36	15.54	4.19	1.13	5.13	0.76	4.27	0.71	1.80	0.22	1.33	0.18	1.32	2.5
ANZ 111	SV	6	69	96	10.32	10.31	23.28	2.85	12.38	2.50	0.53	2.51	0.33	1.95	0.38	1.18	0.17	1.17	0.17	2.46	2.47
ANZ 112	Dol	2	21	95	9.80	11.61	23.78	2.80	12.22	2.543	0.71	2.83	0.32	1.66	0.29	0.82	0.11	0.70	0.10	1.79	2.52
ANZ 113	SV	4	48	79	10.09	9.78	24.39	3.07	13.70	2.88	0.61	2.85	0.261	2.08	0.39	1.12	0.15	1.02	0.14	1.66	2.69
ANZ 114	SV	10	95	95	12.28	33.03	67.39	6.32	25.91	4.494	0.95	4.19	0.4286	2.24	0.42	1.29	0.18	1.21	0.17	5.47	2.43
ANZ 115	SV	3	37	61	17.04	14.68	38.86	3.63	16.41	3.68	1.61	4.36	0.52	2.86	0.51	1.37	0.17	1.07	0.15	1.99	2.6
ANZ 116	SV	7	68	94	13.85	17.14	42.87	4.56	19.37	3.80	0.84	3.78	0.446	2.50	0.47	1.39	0.187	1.270	0.183	4.25	2.42
ANZ 117	PN stériles	9	88	129	12.62	15.62	45.40	4.52	20.43	4.12	0.92	3.57	0.42	2.40	0.47	1.47	0.21	1.45	0.21	5.29	2.47
ANZ 118	SB	1	26	68	17.36	11.86	25.25	2.89	14.15	3.71	0.88	4.30	0.539	2.90	0.490	1.232	0.1393	0.842	0.1183	1.09	2.56
ANZ 119	Dol	1	20	63	19.21	14.81	29.83	3.44	16.87	4.19	0.83	4.83	0.59	3.10	0.52	1.32	0.15	0.92	0.13	0.91	2.47
ANZ 120	PN stériles	4	107	131	14.38	21.07	56.82	5.51	25.65	4.93	1.12	4.15	0.46	2.93	0.51	1.59	0.24	1.91	0.24	5.97	2.42
ANZ 121	PN	4	85	106	8.00	11.06	24.70	3.06	14.21	2.73	0.63	2.26	0.26	1.63	0.29	0.89	0.13	1.08	0.13	4.08	2.45
ANZ 122	Dol	1	27	36	11.96	9.42	20.56	2.19	10.61	2.45	0.61	2.73	0.34	2.18	0.35	0.91	0.11	0.80	0.09	1.12	2.44
ANZ 123	PN stériles	3	82	103	10.71	15.36	32.04	3.92	17.88	3.51	0.99	3.09	0.35	2.27	0.39	1.21	0.18	1.45	0.18	4.26	2.52
ANZ 124	PN	4	89	117	8.69	11.46	26.24	3.24	14.82	2.93	0.73	2.55	0.29	1.94	0.35	1.09	0.16	1.34	0.16	3.56	2.47
ANZ 125	Dol	1	8	57	7.71	5.08	11.36	1.18	5.75	1.44	0.39	1.79	0.23	1.45	0.22	0.55	0.06	0.42	0.05	0.32	2.55
ANZ 126	PN stériles	4	99	116	12.25	17.40	48.18	4.67	21.04	4.14	1.08	3.78	0.43	2.69	0.46	1.43	0.21	1.72	0.21	5.05	2.51
ANZ 127	SB	5	100	257	27.20	9.86	28.26	3.59	17.69	4.18	1.37	4.30	0.64	5.16	1.02	3.29	0.47	3.73	0.43	4.14	2.54
ANZ 128	Dol	1	19	26	15.42	7.40	17.11	2.10	10.99	3.34	1.158	3.96	0.52	3.19	0.48	1.18	0.14	1.00	0.12	0.90	2.52
ANZ 129	PN stériles	6	87	132	8.86	14.37	31.00	3.68	16.33	3.06	0.68	2.76	0.30	1.88	0.32	1.00	0.14	1.18	0.14	4.07	2.61
ANZ 130	SV	5	89	236	11.83	9.80	26.76	3.60	17.73	3.86	1.26	3.28	0.42	2.80	0.54	1.69	0.28	2.02	0.25	2.19	2.54
ANZ 131	Dol	1	20	49	7.27	6.90	14.18	1.58	7.31	1.61	0.43	1.79	0.23	1.44	0.24	0.64	0.08	0.59	0.07	0.86	2.58
ANZ 132	Dol	6	76	99	10.70	18.17	49.70	4.85	21.72	4.008	0.96	3.52	0.38	2.36	0.41	1.25	0.18	1.48	0.18	4.56	2.5
ANZ 133	Dol	1	20	48	9.88	7.97	18.36	1.97	9.29	2.13	0.59	2.42	0.307	1.94	0.31	0.82	0.10	0.75	0.09	1.06	2.62
ANZ 134	PN	5	97	114	10.18	7.88	14.36	1.93	8.96	1.921	0.64	2.01	0.2658	1.88	0.35	1.10	0.17	1.42	0.18	5.64	2.44
ANZ 135	Dol	1	15	22	6.54	6.42	18.21	1.46	6.84	1.54	0.47	1.79	0.22	1.34	0.21	0.55	0.07	0.50	0.06	0.83	2.54
ANZ 136	Dol stériles	1	11	23	13.50	7.21	19.17	2.40	11.94	3.06	0.87	3.39	0.433	2.69	0.42	1.09	0.130	0.974	0.110	0.69	2.65
ANZ 137	PN	3	65	85	7.95	8.74	21.33	2.65	12.22	2.45	0.66	2.26	0.26	1.64	0.28	0.90	0.13	1.11	0.14	3.62	2.46
ANZ 138	Dol	1	22	22	13.03	6.91	15.63	1.90	9.65	2.56	0.75	3.07	0.401	2.50	0.386	0.964	0.1113	0.796	0.0909	0.69	2.46
ANZ 139	Dol stériles	1	23	22	14.14	8.21	19.33	2.36	11.77	2.99	1.00	3.49	0.45	2.80	0.43	1.09	0.13	0.94	0.11	0.95	2.48
ANZ 140	Dol stériles	4	21	24	12.45	6.83	16.78	2.05	10.46	2.75	1.01	3.28	0.42	2.52	0.38	0.95	0.11	0.75	0.09	0.51	2.31
ANZ 141	Dol	4	16	12	10.46	4.26	9.43	1.31	7.16	2.44	5.65	3.68	0.39	2.35	0.34	0.81	0.10	0.81	0.12	0.14	2.68
ANZ 142	Bre	6	38	42	10.30	8.13	17.40	2.17	10.76	2.82	1.28	3.08	0.37	2.20	0.34	0.91	0.12	0.91	0.11	1.50	2.39
ANZ 143	Dol	4	12	15	12.48	5.88	12.99	1.75	9.46	3.12	9.24	5.09	0.45	2.73	0.39	1.01	0.13	1.14	0.18	0.39	2.48
ANZ 144	Dol	4	20	25	9.06	6.93	17.02	1.83	8.88	2.11	0.63	2.41	0.29	1.77	0.27	0.71	0.08	0.62	0.07	0.82	2.4
ANZ 145	Dol	4	19	24	9.19	5.12	13.50	1.52	7.65	2.00	0.62	2.36	0.29	1.75	0.27	0.70	0.08	0.63	0.08	0.76	2.46
ANZ 146	Dol	5	25	25	11.80	10.33	24.34	2.76	13.24	3.03	0.81	3.39	0.40	2.34	0.37	0.95	0.11	0.81	0.09	0.76	2.43
ANZ 147	Dol stériles	4	13	21	5.58	5.62	12.08	1.43	6.90	1.59	0.39	1.76	0.20	1.17	0.18	0.46	0.06	0.42	0.05	0.66	2.33
ANZ 148	Dol stériles	4	10	23	5.41	5.80	11.76	1.47	7.10	1.58	0.364	1.68	0.19	1.10	0.17	0.45	0.05	0.41	0.05	0.69	2.71
ANZ 149	Dol	5	20	30	8.46	7.75	16.64	1.94	9.31	2.08	0.51	2.20	0.28	1.71	0.26	0.69	0.08	0.61	0.07	0.88	2.75
ANZ 150	Dol	6	29	47	12.38	7.59	17.76	2.26	11.11	2.79	0.72	3.01	0.40	2.50	0.38	1.01	0.13	0.93	0.11	1.36	2.48
ANZ 151	Dol	4	24	14	7.60	5.89	13.33	1.65	8.10	2.03	0.53	2.19	0.29	1.68	0.24	0.80	0.07	0.49	0.06	0.41	2.74
ANZ 152	Bre	6	19	59	7.43	7.91	17.37	2.10	9.76	2.041	0.54	1.96	0.25	1.59	0.27	0.80	0.11	0.88	0.11	1.96	2.58
ANZ 153	Dol	5	29	31	12.98	10.65	24.55	2.81	13.42	3.19	5.80	4.57	0.437	2.66	0.40	1.04	0.13	1.10	0.16	0.98	2.52
ANZ 154	Bre	6	20	60	7.83	7.98	17.41	2.09	9.84	2.071	0.51	2.05	0.2592	1.66	0.28	0.79	0.11	0.87	0.10	1.98	2.61
ANZ 155	Dol stériles	5	17	29	8.99	6.57	14.70	1.85	8.99	2.18	0.58	2.32	0.30	1.86	0.29	0.78	0.10	0.71	0.08	0.81	2.46
ANZ 156	Dol stériles	3	6	10	5.03	4.09	7.95	0.94	4.60	1.12	0.28	1.31	0.161	0.95	0.15	0.37	0.041	0.299	0.034	0.19	2.52
ANZ 157	Dol	5	22	20	9.44	4.68	11.06	1.51	8.37	2.79	0.74	2.93	0.38	2.24	0.32	0.78	0.09	0.65	0.07	0.45	2.48
ANZ 158	SV	11	78	121	7.94	8.92	21.47	2.77	13.29	2.84	0.64	2.53	0.287	1.84	0.324	0.990	0.1411	1.174	0.1422	2.90	2.5
ANZ 159	Dol	5	17	34	8.89	7.73	16.48	2.02	9.94	2.41	0.56	2.42	0.30	1.80	0.29	0.77	0.09	0.71	0.08	1.18	2.67
ANZ 160	Dol	3	16	41	10.66	7.78	16.69	1.91	9.10	2.26	0.49	2.54	0.34	2.23	0.34	0.90	0.11	0.80	0.10	1.03	2.58
ANZ 161	Dol	1	1	20	6.47	4.37															

Base de données de Jbel N’Zourk :

	PF (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K2O (%)	MnO (%)	TiO2 (%)	Na2O (%)	B (ppm)	Ba (ppm)	Bi (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Sr (ppm)	Ga (ppm)	Ge (ppm)	Sc (ppm)
JZ 1	41,61	4,55	0,57	2,2	24,74	18,83	0,12	0,23	0,01	0,03	59	31	471	6	56403	39	5	9	3
JZ 2	32,67	20,43	4,96	0,94	23,54	13,01	2,51	0,16	0,23	0,02	95	143	30	13	892	39	8	19	5
JZ 3	36,87	14,71	4,28	0,59	21,8	17,85	2,14	0,11	0,18	0,11	64	115	25	12	126	77	10	26	5
JZ 7	24,25	27,45	8,52	2,33	14,71	14,62	1,52	0,22	0,44	0,02	70	118	307	29	43067	24	16	38	7
	V (ppm)	Zr (ppm)	Y (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Th (ppm)	Dréelle (SI)
JZ 1	10	20	2,94	3,49	6,30	0,87	3,37	0,88	0,18	1,02	0,16	0,73	0,12	0,29	0,03	0,19	0,03	0,19	2,77
JZ 2	24	91	10,01	11,71	24,80	2,71	9,53	1,88	0,35	2,13	0,33	1,81	0,40	1,23	0,17	1,07	0,17	2,78	2,49
JZ 3	26	65	7,73	8,50	18,15	2,04	7,23	1,47	0,30	1,69	0,26	1,43	0,31	0,97	0,14	0,85	0,13	2,29	2,5
JZ 7	72	124	12,42	14,20	27,69	3,01	10,61	2,230	0,39	2,62	0,43	2,34	0,51	1,59	0,23	1,45	0,23	4,87	2,7

Annexe 2 : Données Inclusions fluides

Type de minéralisation	Echantillons	Minéral	Taille (µm)	Type	Th	Tm,h	TE	Tm,hh	Tm,ice	wt%NaCl	Wt%CaCl ₂	%mol NaCl	%mol CaCl ₂
S t r a t a b o u n d	ORT veine 2a	Quartz	30	S	205,1	201,5	-49,1	-13,5	-28,0	21,84	12,09	0,0900	0,0262
	ORT veine 2a	Quartz	<5	L _{<5µm}	238,9								
	ORT veine 2a	Quartz	<5	L _{<5µm}	239,2								
	ORT veine 2a	Quartz	<5	L _{<5µm}	282,6								
	ORT veine 2a	Quartz	<5	L _{<5µm}	261,9								
	ORT veine 2a	Quartz	<5	L _{<5µm}	288,2								
	ORT veine 2a	Quartz	<5	L _{<5µm}	295,9								
	ORT veine 2a	Quartz	<5	L _{<5µm}	286,7								
	ORT veine 2a	Quartz	<5	L _{<5µm}	249,4								
	ORT veine 2a	Quartz	10	L	242,8		-50,8	-26,3	-17,6	9,67	10,23	0,0352	0,0196
	ORT veine 2a	Quartz	14	L	243,7		-50,2	-26,5	-17,9	9,51	10,55	0,0346	0,0203
	ORT veine 2a	Quartz	8	L	245,1		-53,9	-26,8	-16,7	8,67	10,56	0,0314	0,0201
	ORT veine 2a	Quartz	5	L	243,8		-51,6	-25,9	-17,1	10,03	9,58	0,0363	0,0183
	ORT veine 2a	Quartz	7	L	246,7		-52,0	-26,1	-18,8	10,32	10,38	0,0378	0,0200
	ORT géode 2b	Quartz	20	S	97,2	110,9	-46,6	-13,2	-32,8	13,70	18,15	0,0561	0,0391
	ORT géode 2b	Quartz	6	L	228,8		-50,4	-33,7	-12,6	3,24	13,01	0,0115	0,0243
	ORT géode 2b	Quartz	25	S	218,0	195,0	-51,9	-16,1	-28,4	21,09	12,68	0,0869	0,0275
	ORT géode 2b	Quartz	10	S	230,1	193,8	-47,0	-15,7	-27,9	21,37	12,12	0,0877	0,0262
	ORT géode 2b	Quartz	20	L	220,3		-51,2	-26,2	-16,9	9,58	9,88	0,0347	0,0189
	ORT géode 2b	Quartz	20	S	234,8	192,7	-51,4	-13,2	-27,2	21,78	11,39	0,0890	0,0245
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	204,3								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	230,3								
	ORT géode 2b	Quartz	12	L	210,4		-54,2	-38,1	-14,0	2,25	15,00	0,0081	0,0284
	ORT géode 2b	Quartz	8	L	217,1		-54,3	-37,5	-12,8	2,25	14,13	0,0080	0,0265
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	214,5								
	ORT géode 2b	Quartz	10	L	195,7		-49,4	-27,4	-13,2	7,00	9,72	0,0248	0,0181
	ORT géode 2b	Quartz	10	S	209,5	193,4	-50,3	-15,0	-27,4	21,68	11,60	0,0888	0,0250
	ORT géode 2b	Quartz	10	S	206,2	138,8	-48,9	-13,3	-27,3	18,61	12,39	0,0748	0,0262
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	234,0								
	ORT géode 2b	Quartz	10	S	110,1	162,2	-47,2	-12,3	-31,7	17,17	16,27	0,0710	0,0355
	ORT géode 2b	Quartz	10	S	203,6	192,6	-50,5	-14,6	-27,7	21,42	11,94	0,0878	0,0258
	ORT géode 2b	Quartz	8	S	178,4	154,6	-48,9	-13,1	-28,8	18,23	13,89	0,0742	0,0298
	ORT géode 2b	Quartz	12	S	246,9	173,4	-51,4	-13,3	-26,7	20,96	11,14	0,0848	0,0237
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	199,9								
	ORT géode 2b	Quartz	6	S	217,7	171,4	-50,0	-13,1	-28,6	19,38	13,37	0,0792	0,0288
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	272,5								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	248,9								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	240,8								
	ORT géode 2b	Quartz	9	S	222,0	203,3	-51,1	-13,4	-27,1	22,58	11,07	0,0927	0,0239
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	226,9								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	214,1								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	223,1								
	ORT géode 2b	Quartz	13,0	S	224,7	214,3	-49,5	-13,3	-26,6	23,84	10,16	0,0980	0,0220
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	224,4								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	215,6								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	228,8								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	205,8								
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	229,4								
	ORT géode 2b	Quartz	8	S	225,7	192,9	-49,1	-13,4	-26,9	22,02	11,04	0,0899	0,0237
	ORT géode 2b	Quartz	10	S	219,2	195,1	-49,8	-13,5	-26,9	22,16	11,00	0,0905	0,0237
	ORT géode 2b	Quartz	<5	L _{<5µm}	190,5								
	ORT géode 2b	Quartz	6	S	229,4	199,6	-50,8	-13,7	-28,3	21,48	12,48	0,0887	0,0271
	ORT géode 2b	Quartz	11	S	217,6	196,5	-49,3	-13,4	-26,8	22,34	10,86	0,0912	0,0234
	ORT géode 2b	Quartz	9	L	172,4		-48,5	-27,2	-13,0	7,11	9,46	0,0252	0,0176
	ORT géode 2b	Quartz	20	S	226,0	211,8	-47,5	-11,7	-31,7	20,91	14,91	0,0883	0,0331
	ORT géode 2b	Quartz	6	L	230,9		-48,1	-32,5	-14,7	4,04	13,70	0,0145	0,0259

Type de minéralisation	Echantillons	Minéral	Taille (µm)	Type	Th	Tm,h	TE	Tm,hh	Tm,ice	wt%NaCl	Wt%CaCl ₂	%mol NaCl	%mol CaCl ₂
S t r a t a b o u n d	ORT géode 2b	Dolomite	8	L	248,8		-50,5	-26,2	-17,1	9,64	9,95	0,0350	0,0190
	ORT géode 2b	Dolomite	9	L	247,1		-51,1	-26,5	-15,7	8,82	9,79	0,0317	0,0185
	ORT géode 2b	Dolomite	12	L	255,6		-52,8	-25,8	-15,1	9,45	8,79	0,0338	0,0166
	ORT géode 2b	Dolomite	10	L	254,7		-50,6	-25,8	-15,6	9,62	8,96	0,0345	0,0169
	ORT géode 2b	Dolomite	18	L	269,0		-51,4	-26,6	-14,6	8,33	9,47	0,0297	0,0178
	ORT géode 2b	Dolomite	17	L	250,5		-52,2	-26,7	-14,8	8,21	9,78	0,0294	0,0184
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	241,2								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	241,2								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	241,2								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	270,1								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	256,7								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	240,7								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	242,4								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	245,9								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	242,6								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	261,0								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	269,8								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	256,1								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	269,6								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	274,6								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	276,6								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	251,0								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	270,9								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	254,0								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	247,9								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	246,2								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	252,2								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	272,8								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	248,2								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	259,1								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	259,3								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	261,0								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	259,6								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	256,1								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	260,4								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	247,3								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	259,9								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	251,5								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	246,6								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	258,5								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	251,0								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	247,1								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	249,9								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	257,2								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	248,9								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	257,5								
	ORT géode 2b	Dolomite	<5	L<5µm	261,1								

Type de minéralisation	Echantillons	Minéral	Taille (µm)	Type	Th	Tm,h	TE	Tm,hh	Tm,ice	wt%NaCl	Wt%CaCl ₂	%mol NaCl	%mol CaCl ₂
F o l d e d b a n d	JBL51A-3	Quartz	5	L	136,7		-50,1	-26,2	-12,6	8,02	8,27	0,0282	0,0153
	JBL51A-3	Quartz	5	L	145,3		-50,2	-27,1	-12,5	7,04	9,16	0,0248	0,0170
	JBL51A-3	Quartz	5	L	169,5		-48,3	-30,1	-10,0	4,19	9,84	0,0145	0,0180
	JBL51A-3	Quartz	<5	L<5µm	149,2								
	JBL51A-3	Quartz	<5	L<5µm	140,8								
	JBL51A-3	Quartz	20	S	157,2	248,3	-49,2	-14,5	-27,7	25,90	10,61	0,1091	0,0235
	JBL51A-3	Quartz	5	L	125,3		-50,2	-27,9	-15,6	7,29	11,20	0,0262	0,0212
	JBL51A-3	Quartz	5	L	123,4		-47,9	-25,9	-13,7	8,79	8,40	0,0312	0,0157
	JBL51A-3	Quartz	6	L	137,6		-49,3	-32,1	-16,4	4,48	14,37	0,0163	0,0275
	JBL51A-3	Quartz	5	L	110,1		-49,5	-31,8	-16,5	4,64	14,28	0,0169	0,0273
	JBL51A-3	Quartz	5	L	123,4		-48,5	-29,8	-14,8	5,57	12,27	0,0200	0,0232
	JBL51A-3	Quartz	8	L	154,9		-46,4	-25,7	-12,7	8,59	7,78	0,0302	0,0144
	JBL51A-3	Quartz	5	L	132,7		-46,6	-27,1	-14,2	7,60	9,90	0,0271	0,0186
	JBL51A-3	Quartz	<5	L<5µm	172,3								
	JBL51A-3	Quartz	<5	L<5µm	132,6								
	JBL51A-3	Quartz	<5	L<5µm	124,1								
	JBL51A-3	Quartz	9	L	156,3		-50,1	-30,7	-12,8	4,58	11,82	0,0162	0,0221
	JBL51A-3	Quartz	8	L	160,2		-48,9	-31,8	-15,8	4,54	13,96	0,0164	0,0266
	JBL51A-3	Quartz	5	L	143,8		-50,2	-24,0	-14,1	11,66	5,89	0,0413	0,0110
	JBL51A-3	Quartz	5	L	145,4		-49,2	-24,8	-16,4	11,46	7,72	0,0413	0,0146
	JBL51A-3	Quartz	5	L	119,0		-50,8	-28,2	-16,5	7,24	11,80	0,0262	0,0225
	JBL51A-3	Quartz	5	L	126,2		-49,8	-26,7	-15,7	8,49	10,11	0,0305	0,0192
	JBL51A-3	Quartz	5	L	118,9		-47,4	-30,6	-13,0	4,67	11,87	0,0166	0,0222
	JBL51A-3	Quartz	5	L	118,3		-47,9	-30,3	-14,3	5,11	12,40	0,0183	0,0234
	JBL51A-3	Quartz	5	L	118,2		-48,3	-26,5	-14,5	8,40	9,33	0,0300	0,0175
	JBL51A-3	Quartz	7	L	132,5		-50,1	-28,9	-15,5	6,36	12,02	0,0229	0,0228
	JBL51A-3	Quartz	8	L	144,5		-48,7	-31,4	-13,7	4,42	12,67	0,0158	0,0238

Hugo BOURQUE

Le cuivre de l'Anti Atlas, un problème complexe: synthèse des occurrences cuprifères de la boutonnière de Bou Azzer El Graara et nouvelles données (Anti-Atlas, Maroc)

Résumé :

L'Anti-Atlas marocain est une vaste province géologique composée d'un socle précambrien et d'une couverture sédimentaire tardi-néoprotérozoïque à paléozoïque. Plus de 200 occurrences cuprifères sont répertoriées dans cette couverture. Avec l'augmentation de la demande mondiale en cuivre depuis les années 2000, ces minéralisations, considérées non rentables dans les années 1980, sont désormais d'intérêt économique majeur pour les compagnies minières. Outre cet intérêt économique, ces occurrences restent un mystère scientifique du point de vue de leur genèse. En effet, les quelques études existantes sur ces objets ne permettent pas d'établir un modèle métallogénique clair expliquant la formation de ces concentrations à cuivre. Notre étude est centrée sur la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (Anti-Atlas central). Elle propose de réaliser une synthèse des minéralisations de ce secteur basée sur quatre axes : (1) une étude de terrain à l'échelle des objets minéralisés, (2) une caractérisation minéralogique et texturale des minéralisations, (3) une approche statistique appliquée aux bases de données roche totale de ces occurrences, (4) une étude des inclusions fluides des minéraux de gangue associés au cuivre. Les résultats ont montré que l'ensemble des minéralisations de la couverture avait une texture en stockwork et une minéralogie identique auto-similaire à toutes les échelles d'observation, et ce indépendamment de la morphologie des corps. Ce stockwork est contemporain de zones plissées et faillées. Il est contemporain du mouvement de failles du socle Précambrien jouant au Varisque et induisant la circulation de saumures profondes minéralisant le socle précambrien comme la couverture néoprotérozoïque à cambrienne de cette boutonnière.

Mots clés : terrain, minéralisations cuprifères, textures, minéralogie, déformation, saumures

The Anti-Atlas copper, a complex problem: synthesis of copper occurrences in the Bou Azzer-El Graara inlier and new data (Anti-Atlas, Morocco)

Abstract :

The Anti-Atlas belt is a large geological province. It is composed by a Precambrian basement and a Neoproterozoic to Paleozoic sedimentary cover. More than 200 copper occurrences are localized in this cover. Since the 2000s, with the increase of global copper demand, these mineralizations have a great economic interest for mining company. Besides economic interests, the scientific understanding of these mineralizations in this area are not clear. It does not exist a global model to explain the formation of these deposits. Our study is focus on the Bou Azzer-El Graara inlier (central Anti-Atlas). We proposed to realize a synthesis of copper deposits in this area based on four axes: (1) a field study at the ore bodies' scale, (2) a mineralogical and textural characterization of these mineralizations, (3) a statistical approach applied to rock total data bases of these deposits, (4) a study of fluid inclusions associated to the ore gangue minerals. Results showed that the whole of mineralizations in the Neoproterozoic to Cambrian cover have a same stockwork texture and a same mineralogy at all scales of observations and that, independently of the ore bodies morphology. This stockwork is synchronous of folded and faulted zones. It is too synchronous of Precambrian basement faults movements during the Variscan compression. These movements are link to deep brines circulations responsible of copper mineralizations localized in the Precambrian basement and in the Neoproterozoic to Cambrian cover of this inlier.

Keywords: field, copper mineralization, texture, mineralogy, deformation, brines



Institut des Sciences de la Terre d'Orléans
Campus Géosciences
1A rue de la Férolierie
45071 ORLEANS Cedex 2

