

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE**

**PAR
JIALING WANG**

**MINÉRALISATION ET ALTÉRATIONS DU GISEMENT
DE PORPHYRE CUPRIFÈRE DE YANDONG,
RÉGION AUTONOME DU XINJIANG, CHINE**

FÉVRIER 2006



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Les porphyres cuprifères constituent un type de gisement de cuivre majeur. La minéralisation contient principalement du cuivre et du Mo. Le gisement de Yandong qui est un gisement de ce type est situé en Chine, à 150 km au sud de la ville de Hami.

Cette étude vise principalement à étudier et établir les relations entre les types de minéralisation et les types d'altération dans le gisement de Yandong. Nous mettons ici en évidence deux types de minéralisation dans le gisement de Yandong : le type de foliation dans lequel les sulfures sont disséminés, et les types stockwerk dans lequel les sulfures apparaissent dans les veinules. Les principaux sulfures associés à ces minéralisations sont la chalcopryrite, la pyrite et la molybdénite et la minéralisation est contenue à la fois dans les porphyres plagiogranitique et les volcanites encaissantes.

L'altération se présente sous plusieurs formes qui se distribuent de façon zonale autour du minéral et qui sont typiques des porphyres cuprifères en général. Du cœur vers l'extérieur du corps minéralisé, se succèdent l'altération potassique (biotisation), l'altération phyllique, la silicification, l'altération argilique, et l'altération propylitique. L'altération phyllique est la plus répandue dans ce gisement.

Toutefois, on note quelques particularités par rapport à certains gisements de ce type considérés comme des modèles. En effet, même si la minéralisation est étroitement liée à l'altération, on observe que le degré d'enrichissement est plus élevé lorsque se superposent l'altération potassique, la silicification et l'altération phyllique, ce qui n'est pas toujours le cas dans la plupart des gisements connus.

Le modèle métallogénique du gisement de porphyre cuprifère de Yandong peut être décrit comme suit : le gisement s'est mis en place dans la zone orogénique Jueluotage au Paléozoïque supérieur; la minéralisation est liée à la mise en place des roches calco-alcalines volcano-hypogènes durant la période de raccourcissement au début du Carbonifère supérieur. Les roches porteuses

de la minéralisation sont les porphyres plagiogranitiques et leurs encaissants (les roches volcanique basaltique et volcanoclastique). La mise en place de l'intrusion et de la minéralisation fut contrôlée par des structures linéaires ayant favorisé la disposition du corps minéralisé sous forme d'une plaque épaisse.

REMERCIEMENTS

Je voudrais bien remercier aux membres du comité de supervision de mémoire, Professeur Huan-zhang Lu, Jayanta Guha, Jacques Carignan et Damien Gaboury à l'Université du Québec à Chicoutimi, pour leurs supervisions et aides dans mes études et recherches. Je remercie aussi à Professeur Denis-W Roy, le directeur du programme de maîtrise en géologie à UQAC.

La gratitude spéciale est prolongée à la mine de Yandong et au Bureau géologique de Xinjiang, Chine, à M. Lifeng Jiang, M. Futong Wang, pour être permettre d'accéder dans ce mine, d'étudier et d'obtenir les informations géologiques générales.

En outre, je bénéficiais considérablement de la suggestion et de l'aide de beaucoup de professeurs et collègues à UQAC, ils sont inclus : Professeur Réral Daigneault, M. Denis Coté, Dr. Benjamin Allou, Dr. Moussa Kéita, Mme. Candide Girard, leurs suggestions et aides générosités ont été considérablement appréciées.

Enfin, le remerciement pour ma famille, je remercie pour leurs compréhensions et soutiens durant mes études.

TABLEAU DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	I
REMERCIEMENTS.....	III
TABLE DES MATIÈRES.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
CHAPITE I: INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE.....	1
1.1. Études antérieures et problématique.....	1
1.1.1. Les classifications des gisements de porphyre cuprifère.....	3
1.1.2. La zonalité de la minéralisation et de l'altération.....	4
1.1.3. Les minéralisations en cuivre de la région de Tuo-Yandong.....	7
1.2. Objectifs.....	8
1.3. Méthodologie.....	10
1.4. Appareillage utilisé.....	11
CHAPITE II: GÉOLOGIE RÉGIONALE ET LOCALE.....	15
2.1 Cadre géologique régional.....	15
2.2 Roches sédimentaires.....	17
2.3 Roches intrusives.....	18
2.4 Structures.....	19
2.5 Les minéralisations de la région.....	20
2.6 La mine de Tuo-Yandong.....	21
CHAPITE III.: GÉOLOGIE DU GISEMENT YANDONG.....	27
3.1 Résumé de la géologie du gisement Yandong.....	27
3.1.1 Roches encaissant.....	27
3.1.2 Intrusions-prophyres.....	28
3.1.3 Structures.....	28
3.2 Caractérisation du gisement.....	29
3.2.1 Forme et envergure du gîte.....	29
3.2.2 Teneur et composition minéralogique du gîte.....	29
3.3 Les porphyres et leurs encaissants.....	30
3.4 Mineralisation de cuivre.....	31
3.5 Altération.....	34

3.5.1	Les types d'alteration.....	34
3.5.2	La zonalité des altérations.....	37
CHAPITE IV. DISCUSSION		63
4.1.	Les caractéristique de la minéralisation et de l'altération du gisement de Yandong.....	63
4.2.	Relations entre altération et minéralisation.....	65
4.3.	Comparaison entre le gisement de Yandong et les autres gisements de porphyre cuprifère classique.....	71
4.3.1.	Contrôle de la minéralisation.....	71
4.3.2.	Distribution de la minéralisation.....	74
4.3.3.	L'altération.....	76
CHAPITRE V : CONCLUSION.....		85
RÉFÉRENCES.....		90
APPENDICE.....		95

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1	Modèle des zonations d'altération et de minéralisation d'un gisement de porphyre cuprifère basé sur le gisement San Manuel-Kalamazoo	13
Fig. 2.1	Localisation du district cuprifère Tuo-Yandong en Chine.....	25
Fig. 2.2	Carte géologique du district cuprifère de Tuo-Yandong.....	26
Fig. 3.1	Carte géologique de la mine Yandong.....	42
Fig. 3.2	Coupe géologique montrant les différents types d'altération dans la mine Yandong	43
Fig. 3.3	Classification dans le diagramme QAP de strekeisen (1974) des roches porphyriques du gisement de Yandong	44
Fig. 3.4	Classification des roches encaissantes du gisement de Yandong dans le diagramme SiO_2 vs $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	45
Fig. 3.5	Distribution des éléments de terres rares dans les roches porphyriques et leurs encaissants dans le gisement de Yandong	46
Fig. 3.6. a.	Carottes de forage sont brisées montre des veinules minéralisées en forme stockwerk	47
Fig. 3.6. b.	Veinules minéralisées en forme stockwerk.....	47
Fig. 3.7. a.	Minéralisation disséminés associée à l'altération de biotisation et phyllique	48
Fig. 3.7. b.	Minéralisation disséminés associée l'altération phyllique et à la chloritisation	48
Fig. 3.8. a.	Veinule à quartz-sulfure dans le porpyre pyllique..... L'altération à quartz-séricite pronocée sur les épnates de la veinule	49
Fig. 3.8. b.	Veinule à quartz-séricite-feldspath-sulfure dans..... le porpyre pyllique	49
Fig. 3.9. a.	Veinule à biotite-chalcopryrite-pyrite-quartz dans l'encaissant altéré,.....	50
Fig. 3.9. b.	Veinules à biotite-sulfure avec minéralisation disséminée est dans stockwerk	50
Fig. 3.10. a.	Veinuele à quartz-séricite-biotite-sulfure.....	51

Fig. 3.10. b.	Veinule à quartz-carbonate dans une zone à altération Phyllique et la à faible minéralisation	51
Fig. 3.11. a.	Chalcopyrites dans une veinule à quartz-séricite-sulfure	52
Fig. 3.11. b.	Chalcopyrite dans une veinule à biotite-quartz-sulfure	52
Fig. 3.12. a.	Chalcopyrite entre les grains de pyrite. (Reflexion, X 50)	53
Fig. 3.12. b.	Chalcopyrites entourant un grain de pyrite et contenue dans Ses microfracture	53
Fig. 3.13. a.	Chalcopyrites entourent un grain de pyrite et disséminées dans l'encaissant	54
Fig. 3.13. b.	Folations de cisaillement dans les zone minéralisées	54
Fig. 3.14.	Teneur en Cu le long des forage ZK001 et ZK002 de la mine Yandong	55
Fig. 3.15. a.	Altération phyllique en foliation dans la roche porphyrique minéralisée	56
Fig. 3.15. b.	Veinule à séricite+quartz+sulfures	56
Fig. 3.16. a.	Altération phyllique faciale dans la roche prophyrique minéralisée : agrégat fin de quartz avec séricites et pyrites	57
Fig. 3.16. b.	Altération phyllique faciale dans la roche encaissante	57
Fig. 3.17. a.	Deux veinules de biotite-chalcopyrite bordées par une altération phyllique intensive	58
Fig. 3.17. b.	Minéralisation disséminée dans une zone où l'altération potassique facile se superpose à l'altération phylliques intensives	58
Fig. 3.18. a. b.	Altération de biotisation en veinule superposée à l'altération phylliques intensives (a et b) accompagnée d'une forte proportion de sulfure (b)	59
Fig. 3.19. a. b.	Silicification intensive faciale avec veinule à quartz-sérite-sulfure	60
Fig. 3.20. a.	Altération argillique faciale à chlorites et pyrites fines disséminée	61
Fig. 3.20. b.	Altération propylitique faciale à chlorite+quartz+ Épidote+carbonate	61

Fig. 3.21. a. Veinule de carbonate (-quartz-pyrite) dépourvue62	62
de Minéralisation	
Fig. 3.21. b. Altération potassique superposée à une silification.....62	62
Intensive associée à des sulfure	
Fig. 4.1. Relations entre minéraux d'altération, de minéralisation et.....83	83
des altérations dans le gisement Yandong	
Fig. 4.2. Modèle en trois dimension du gisement de porphyre.....84	84
cuprifère Yandong	

LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 1.1.	Les caracteristiques des trois types de gisement de12 porphyrecuprifere
Tabl. 2.1.	Composition chimique des rochs granitique de Carboniférieur.....24 au North de la zone tectonique Jueluotage, Xinjiang
Tabl. 3.1.	Composition en éléments majeurs (% en poids) des du39 roches gisement Yandong
Tabl. 3.2.	Comparaison de la composition chimique entre les granites du gisement de Yandong et ceux de la région Jueluotage.....40
Tabl. 3.3.	Composition en élément traces (ppm) des roches du.....41 gisement Yandong
Tabl. 5.1.	Comparaison sur l'altération entre le gisements Yandong et d'autres gisement dans le monde.....89

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Études antérieures et problématique

Les porphyres cuprifères constituent un type majeur de gisement de cuivre. Les minéralisations contiennent principalement du Cu et du Mo. Le W (Yukon) et le Sn (Bolivie) peuvent aussi être des métaux principaux dans ce type de gisement. Enfin, l'association Pb-Zn, l'Au et l'Ag peuvent s'y rencontrer. Dans un gisement de porphyre donné, la minéralisation comprend un métal majeur qui est souvent associé à d'autres métaux secondaires. Ainsi, dans les gisements de porphyres cuprifères, le cuivre est le métal majeur, et ce dernier est parfois associé au molybdène ou à l'or. De même, les gisements de porphyre à molybdène contiennent communément du W.

Cette particularité des gisements de porphyre représente un gros avantage au plan économique comparativement aux autres types de minéralisation. Ainsi,

certaines porphyres cuprifères détiennent leur viabilité de l'exploitation de l'or comme sous-produit.

Les premières études se rapportant aux gisements de porphyre, connus alors sous le nom de gisements de "Cu disséminé", ont été conduites au Sud-Ouest des États-Unis. Tous les gisements dans cette région sont marqués par divers degrés d'altération supergène et d'enrichissement secondaire.

Les gisements de porphyre de Cu (Mo, Au), connus à l'échelle mondiale, sont encaissés par des roches porphyriques d'épaisseur variant entre 100 m et plusieurs kilomètres, et constituant des coupoles au-dessus de plutons de composition intermédiaire à felsique plus profonds (Sillitoe, 1996). Les roches encaissantes peuvent renfermer également de la minéralisation même si les intrusions hôtes possèdent elles-mêmes en moyenne 70% du minerai dans les gisements de porphyre (Lowell et Guibert 1970).

Les caractères principaux de ce type de gisement sont les suivants. Il s'agit d'un dépôt de sulfures de Cu et Mo, soit disséminés, soit sous forme de stockwerk, ou en veinules. Il est associé à une intrusion de composition intermédiaire qui

montre presque invariablement une texture porphyrique à un certain degré. La minéralisation et l'altération sont distribuées dans les roches intrusives de porphyre ou dans les roches encaissantes (Brown et *al.*, 1971). La teneur est faible mais le volume est important. Il contient les minéraux métalliques suivants: pyrite, chalcopryrite, molybdénite et d'autres minéraux secondaires de W, Sn, Pb, Zn, Au et Ag, en plus des minéraux d'altération et de gangue. La définition inclut des dépôts de natures très diverses et cette diversité s'étend à (1) la série magmatique du pluton génétiquement lié, (2) l'emplacement tectonique, (3) l'âge et (4) la morphologie (Brown, 1976).

Ce type de gisement est bien représenté dans le monde : Ouest américain, Caraïbe, Iran, Bougainville, Bulgarie, Grèce, etc., et de bonnes descriptions ont été données par R.H. Sillitoe notamment (Nicola, 1991).

1.1.1. Les classifications des gisements de porphyre cuprifère

Titley a classifié (Brown, 1976) les gisements de porphyre cuprifère du sud-ouest de l'Amérique du Nord en des types simples ou complexes selon que la minéralisation est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'intrusion. Brown (1969) a utilisé

pour la première fois la profondeur et d'autres caractéristiques pour sa classification. Lowell et Guilbert (1970) ont défini les gisements de porphyres cuprifère de type classique et Cheney (1975) a décrit le type batholitique connu aussi sous le nom de porphyre plutonique, ainsi que le troisième type sous le nom de volcanique (McMillon et al., 1985).

Ainsi, trois types de gisement de porphyre cuprifères sont distingués: classique (ou phyllique), plutonique et volcanique (Tabl.1).

Cette classification des gisements de porphyre est basée principalement sur la morphologie et les caractéristiques spécifiques. Une qualification est seulement donnée pour la composition du magma. La forme et la structure des gisements porphyriques et des plutons associés sont dépendantes de beaucoup de facteurs (Brown, 1976). La répartition de chaque type de gisement montre des régularités dans le temps et dans l'espace. Tous ces porphyres cuprifères se situent dans un environnement géotectonique particulier : limites de plaques continentales, dans la partie chevauchante et dans un stade tardi-orogénique.

1.1.2. La zonalité de la minéralisation et de l'altération

Les gisements de porphyres de Cu (Mo, Au) dans le monde sont rencontrés dans des roches porphyriques d'épaisseur comprise entre 100 m et plusieurs kilomètres se présentant sous forme de coupoles au-dessus de plutons de composition intermédiaire à felsique plus profonds (Sillitoe, 1996). Les minerais de Cu-Fe-sulfures se concentrent dans les veines et stockwerks de quartz associés à l'altération potassique (silicates-K) initiale (Meyer et Hemley, 1967) avec biotite, magnétite, et feldspath-K en quantités variables. Dans certains gisements, une partie du minerai est formée pendant la cristallisation des veines à quartz-sericite-pyrite liée à l'altération séricitique (phyllique) tardive. Certains auteurs pensent que ce type de minéralisation peut simplement résulter d'une remobilisation de métaux (p. ex., Brimhall, 1980). L'altération argilique produit, à l'extérieur des veines, des halos de séricite. La kaolinite et la smectite peuvent être accompagnées de la séricite et la chlorite. Des assemblages hypogènes d'altération argillique à quartz, kaolinite, pyrophyllite, et diaspore, parfois avec andalousite ou alunite (Meyer et le Hemley, 1967) se développent jusqu'aux stades relativement tardifs des modèles fondamentaux d'altération (Sillitoe, 1993).

L'altération propylitique, caractérisée par le développement de l'épidote, la chlorite et la calcite, forme un halo, généralement de plusieurs kilomètres d'épaisseur.

En général, la minéralisation et l'altération manifestent une zonalité évidente et ont une relation étroite dans l'espace.

La figure 1.1 illustre la répartition des différentes zones dans le dépôt de San Manuel-Kalamazoo (Guibert et Park, 1986).

Du centre vers la périphérie, il est observé: 1) un cœur stérile ou faiblement minéralisé à magnétite, pyrite, chalcopryrite et molybdénite, et plus rarement bornite; 2) des enveloppes minéralisées en Cu et Mo (chalcopryrite, pyrite, molybdénite); 3) une zone à pyrite (la pyrite occupe 10-15%, un peu de chalcopryrite et de molybdénite); et 4) une enveloppe faiblement pyritisée (Fig.1.1.a). La molybdénite est relativement plus riche vers l'intérieur; par contre, la chalcopryrite et la pyrite le sont vers l'extérieur.

La zonalité des altérations se développe dans et autour des intrusions et du gîte de porphyre cuprifère. Il y a quatre types d'altération: potassique (muscovite, biotite, orthose, quartz, plagioclases, séricite et anhydrite), phyllique (séricite, quartz et

pyrite), argillique (kaolinite, montmorillonite, chlorite, quartz), propylitique (épidote, chlorite, calcite). La zone potassiques est formée en premier, et liées aux activités fluides précoces, suivie de la zone phillique; par contre, les altérations argileuse et propylitique sont des altérations supergènes tardives (Fig. 1.1. c).

L'occurrence des sulfures montre aussi une zonalité des structures, du centre vers la périphérie: microveinules disséminées, veinules disséminées, veinules et veines disséminées (Fig. 1.1.c).

Ces zonalités d'altération et de minéralisation sont basées sur les gisements de type classique. Pour les autres types de gisements, les particularités de l'altération, la minéralisation et les brèches se manifestent de façons différentes (Tab.1.1).

1.1.3. Les minéralisations en cuivre de la région de Tuo-Yandong

En 1994, le gisement Tuo est découvert par Jiang et al. (Wang, 2000) au cours de travaux de prospection à l'échelle de 1:50000. En 1997, deux lignes anomaliques et un segment métallifère ont été identifiés à partir de l'examen de forages. À partir de ces travaux, il a été confirmé que le gisement cuprifère Tuo est un large dépôt de cuivre. Par la suite, les chercheurs découvriront successivement

d'autres gîtes de cuivre ou des zones de minéralisation de cuivre dans cette région, comme le gisement Yandong, le gisement Tuo-Est, le gisement Chihu, le gisement Ninglong, ainsi que le gisement Weiquan lié à un skarn. Les réserves totales de cuivre des gisements Tuo, Yandong et Tuo-Est sont estimées à 7,6MT (Wang, 2000).

Des travaux de recherches ont déjà été effectués sur le gisement de Tuo et Tuo-Est. Ces travaux ont permis de caractériser ces deux gisements comme étant des porphyres cuprifères.

Le gisement Yandong n'a été découvert que récemment (1998) et aucune étude n'y a été encore effectuée. Il faut donc vérifier s'il s'agit d'un gisement de porphyre cuprifère ou non à partir d'une analyse lithologique plus détaillée. Si c'est le cas, il deviendra nécessaire d'identifier les types d'altérations qui se sont développés dans ce gisement, puis, de vérifier si les zonalités de minéralisation et d'altération sont comparables à celles identifiées sur les modèles connus de porphyre cuprifère. Il faudra aussi établir les relations entre les zonalités d'altération et les minéralisations.

Les réponses à ces questions devraient permettre de proposer des guides efficaces pour l'exploration d'autres zones de minéralisation en cuivre dans cette région.

1.2. Objectifs

Les recherches proposées visent principalement trois objectifs:

- l'étude des types de minéralisation et d'altération dans le gisement Yandong;
- l'étude de la relation entre les zones d'altération et la minéralisation, afin de diriger l'exploration selon les modèles connus des porphyres cuprifères;
- l'analyse des éléments-traces des diorites, porphyres, volcanites et veines métallifères, afin d'identifier la source d'apports métalliques.

Ces objectifs auront des retombées certaines tant au point de vue académique qu'au point de vue économique.

Sur le plan académique, cette étude devrait permettre de connaître le gisement de porphyre cuprifère Yandong, entre autres les types d'altération, la

nature de la minéralisation, la source de la minéralisation.

Sur le plan économique, en permettant la réalisation de ce projet, l'atteinte des objectifs devrait permettre:

- de diriger l'exploration autour du gisement Yandong;
- de proposer un modèle en associant les caractérisations des gisements Tuo et Tuo-Est pour l'exploration des autres zones minéralisées en cuivre de cette région;
- d'après les réserves de confirmées totales de cuivre de 7,6MT tonnes, d'augmenter la possibilité d'un grand gisement de cuivre dans cette région

1.3. Méthodologie

Cette étude a débuté par des travaux de terrain qui ont permis d'observer la géologie du gisement et de prélever des échantillons. Ces travaux ont concerné, 1) la cartographie géologique (observations de terrain, mise en carte au 1 :50000, prélèvement d'échantillons pour études microscopiques et analyses chimiques); 2) l'étude des gîtes (géologie, cartes de répartition des teneurs en cuivre), et 3)

l'étude des carottes de forage et le prélèvement d'échantillons de carottes. 76 échantillons ont été prélevés par intervalles de 5-10 m sur le forage ZK001 de la Ligne 0, 39 échantillons pour le frage 1502 et 23 pour le frage 1503 pour un total de 138.

On a choisi des échantillons pour la confection de 88 lames minces et les analyses chimiques, analyses chimiques des éléments traces (44 échantillons) et majeurs des roches (19 échantillons) par ICP-MS (Institut de Géochimie à Guiyang, Chine).

Les données recueillies sur le terrain ont été par la suite, étudiées en détail au laboratoire par les étapes suivantes : 1) traitement des données de terrain (sélection des échantillons pour la confection des lames minces et les analyses chimiques); 2) études pétrographiques et minéralogiques de lames minces au microscope optique; analyses chimiques des éléments traces et majeurs des roches et des minerais par ICP-MS (Institut de Géochimie à Guiyang), afin d'identifier la source des éléments métalloïdiques et de mettre en évidence le comportement géochimique des éléments au cours des différents processus qui ont conduit à la mise en place de la minéralisation primaire puis de la minéralisation secondaire.

1.4. Appareillage utilisé

- Microscope optique au laboratoire de l'UQAC
- ICP-MS et analyses chimiques, à Guiyang, Institut de géochimie de la Chine.

Tabl. 1.1. Caractéristiques des trois types de gisement de porphyre cuprifère
(D'après McMillan et Panteleyev 1985)

	Classique	Volcanique		Plutonique
		Calca-alkalin	Alcalin	
Pluton	petit (0.5-2Km)	petit (0.2-10km)	petit	grand (>100Km)
Brèches	abondantes, et caractéristiques, argiliques communes, peuvent être minéralisées.	communes et diverses, pseudo-brèches d'altération; caractéristique de brèche minéralisée.	brèches intrusives et volcaniques communes et minéralisées.	communes et associées avec dykes porphyriques, brèches pré-, inter- et post-minéralisation.
Altération	potassique, phyllique, propylitique sont communes, argiliques parfois, zonalité	potassique restreinte mais peut être intense, propylitique faible, les zones visibles.	potassique locale et intense, propylitique commune.	phyllique, argilique et propylitique communes et faibles, potassique locale mais peut-être intense.
Corps minéralisé	à la marge et / ou adjacent à un porphyre, pyrite plus étendue, centre pour molybdénite, puis chalcopryrite, enveloppes de pyrite faible	lentille ou irrégularité, associé avec des brèches et des roches intensément altérées; métallisation de Cu-Mo, molybdénite, et bornite rare.	métallisation de Cu-Au dans les brèches intrusives ou les roches fracturées intensivement, cp.+mag., bornite-pyrite.	veines en stockwerk larges et diffuses, parfois contrôlées par les brèches, des failles minéralisées; de bornite-chalcopryrite-pyrite.

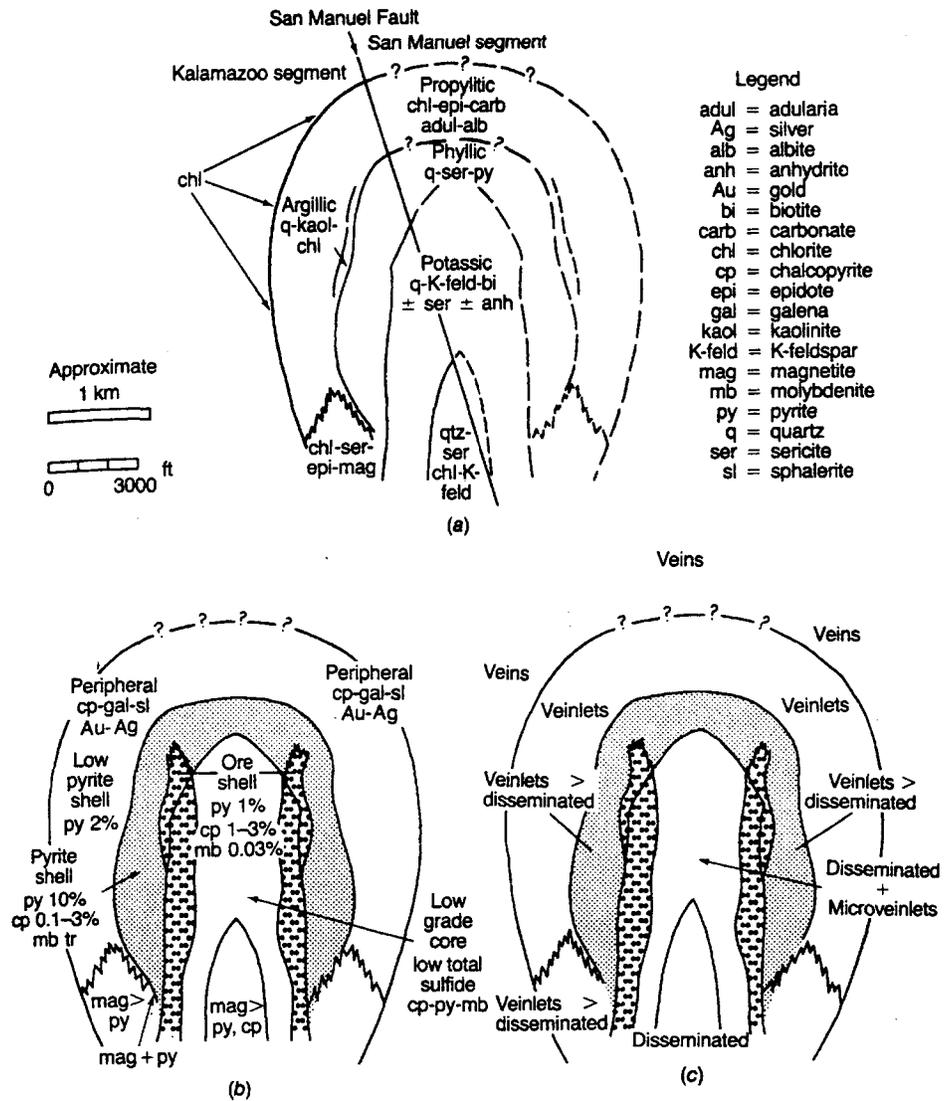


Fig. 1.1. Zonalités d'altération et de minéralisation d'un gisement de porphyre cuprifère basé sur le gisement San Manuel-Kalamazoo. (Guibert, et Park, 1986)

- (a). zones d'altération;
- (b). zones de minéralisation;
- (c). Occurrences des sulfures

CHAPITRE II

GÉOLOGIE RÉGIONALE ET LOCALE

2.1. Cadre géologique régional

La mine Tuo-Yandong comprend trois gisements : le gisement Tuo, le gisement Yandong et le gisement Tuo-Est. Le gisement Yandong est un gisement de porphyre cuprifère situé à 150 Km au sud de la ville de Hami, La Région Autonome Uygur du Xinjiang en Chine (Fig.2.1).

La mine Tuo-Yandong se situe dans un arc insulaire carbonifère localisé au Nord de la zone orogénique Jueluotage (Fig.2.1) à la limite entre les unités tectoniques IV et VII (Fig. 2.2) qui est considérée comme une limite de subduction (Liu et al., 2003). Cette zone tectonique se trouve à l'Est-Tianshan au Xinjiang et s'étend sur une superficie d'environ 28,000km². La zone faillée Dananhu-Dacaotan qui se trouve à 4.6 Km au Nord constitue la limite entre la zone orogénique Jueluotage et la zone orogénique Haerlik. Des deux cotés de cette limite, les orientations des structures tectoniques régionales, les caractéristiques des

formations sédimentaires et magmatiques présentent des différences évidentes. À 2 Km au sud de la zone orogénique Jueluotage se trouve la zone de faille Kanggueriage (Fig. 2.1).

La zone orogénique Jueluotage constituait la marge continentale du Nord de la Plaque Talimu à la fin du Dévonien. Au Carbonifère inférieur, cette région connaît une phase d'extension qui va occasionner la mise en place des formations clastiques volcano-terrigènes. Au Carbonifère supérieur, elle est soumise à une phase de raccourcissement suivie de la mise en place de flyschs et de formations volcaniques basiques, intermédiaires et acides en même temps que les intrusions granitiques calco-alkalines et les porphyres accompagnés de leur cortège de minéralisations porphyriques de Cu-Mo; au Carbonifère supérieur se mettent en place des granites à feldspath potassiques et des volcanites acides. C'est à la fin de cette période que s'est développé la zone de cisaillement Kangguerdage. Au Permien, cette région a subi un soulèvement pour donner le continent actuel (He et al. 1994, Liu et al. 2003).

2.2. Roches sédimentaires

Le Sud et le Nord de la limite entre la zone orogénique Jueluotage et la zone orogénique Haerlik, appartiennent à des régions paléobio-géographiques distinctes. Le Nord de la limite, qui appartient à la province biotique de Sibérie, renferme une communauté de plantes Angara, des coralliaires isolés et des *Paramuirwoodias* (brachiopodes). Le Sud de la limite comprend des *Gigonto productus* et des *Kuichowphyllum*. La biocénose est caractérisée par l'existence d'eau tiède. Cette partie sud est rattachée à la province biotique du Sud de la Chine. La limite représente un bassin fermé séparant les provinces biotiques. C'est là que se situe le paléo-ocean Nord-Tianshan.

Les strates affleurant dans la région de l'arc insulaire au Nord de la zone de cisaillement Kangguerdage comprennent le groupe Qieshan du Carbonifère, le Groupe Dananhu du Dévonien inférieur et le groupe Suquan du Dévonien moyen. Elles sont composées par des roches volcaniques calco-alcalines de type arc et des roches clastiques qui sont des produits d'accrétion de la marge sud de la Plaque Zhungeer. La minéralisation est associée au groupe Qieshan. Les strates affleurant dans la région de la fosse sous-marine au sud de la fracture

Kanggueriage appartiennent aux groupes Gandun et Wutongwozhi, tous deux du Carbonifère (Liu et al 2003).

2.3. Roches intrusives

Plusieurs intrusions se sont généralement développées dans cette région. Les types de roche varient des termes basiques aux termes acides, la majeure partie étant des intrusions hypogènes. Les porphyres plagiogranitiques et les diorites porphyriques hypergènes du Carbonifère supérieur au Permien inférieur, sont associées à la minéralisation cuprifère.

Les roches granitiques formées au cours de la période de raccourcissement du Nord de la zone Juelutage sont marquées par des caractères géochimiques calco-alcalins et alcalins (index : 1.4–2.3 ; moyenne: 1.9, A/NKC: 0.81-1.05, Sr: 0.705-0.7052, $\delta^{18}\text{O}$: 6.94-9.06‰ : Liu et al. 2003). Les caractères ci-dessus montrent que ces roches sont de la famille des granites du type-I (Tabl. 2.1).

Dans la région de la mine, on observe les formations du Groupe Qieshan du Carbonifère inférieur, constituées de volcanites basiques, de tufs et d'une petite quantité de roches clastiques tufacées et des carbonates. Sur les côtés sud et nord,

on observe les flyschs issus de la période de raccourcissement.

Les roches granitiques liées à la minéralisation constituent une partie de la chaîne de roches granitiques de la zone Nord Jueluotage. C'est le produit de la subduction qui s'est déroulée au cours de la période de raccourcissement du Jueluotage. La série des roches est comme suit : gabbro-diorite, diorite quartzique, diorite granitique, tonanite, granite monzonitique (Tabl. 2.1) (Liu et al. 2003). Le tableau 2.1 montre que les roches granitiques de la région de Tuo-Yandong et celles de la région de Chihu ne présentent pas de différences évidentes dans la composition avec celles de la zone nord Jueluotage. Cela montre aussi que le contexte métallogénique de la zone Nord Jueluotage correspond à celui des porphyres cuprifères.

2.4. Structures

Les déformations peuvent être classées en deux types : les déformations d'intensité moyenne dans la région de la fosse sous-marine qui sont dominées par des déformations ductiles et les déformations d'intensité plus faible dans la région de l'arc insulaire, dominées par des déformations fragiles. Les structures majeures

de la région minière sont des fractures secondaires E-W contrôlées par les deux grandes zones de fractures.

2.5. Les minéralisations de la région

À partir des informations ci-dessus, on peut dire que cette région résulte de processus d'extension, raccourcissement, collision, consolidation, accumulation continentale et relaxation, et enfin la période d'évolution continentale.

Les minéralisations poly-métalliques de cette région sont importantes. Après la consolidation de la zone orogénique Jueluotage au Carbonifère inférieur, à cause de la relaxation, se sont développées les zones de cisaillement Kangguetage, Yamansu et Weiya. Ces zones renferment des minéralisations en or (Kangguetage). Un peu plus tard, se sont développés la fracture de Huangshan et les gisements de sulfures de Cu-Ni (Huangshan, Hulu).

Les porphyres plagiogranitiques, liés à la genèse des gisements de porphyre cuprifère, se mettent en place durant la période de raccourcissement des plaques.

Le gisement Tuo fut découvert en 1994 par Jiang et al (Wang, 2000). Au cours

d'une prospection au 1:50000. Par la suite, les chercheurs découvriront successivement d'autres gîtes de cuivre ou des zones de minéralisation de cuivre dans cette région, parmi lesquels les gisements : Yandong, Tuo-Est, Chihu, Ninglong et Yamansu, ainsi que le gisement Weiwan qui est lié à des skarns.

En résumé, une zone de minéralisations cuprifères de type porphyre, de type skarn et de type hydrothermal hypergène se rencontrent dans la région de l'Est-Tianshan. Parmi ces minéralisations, seul le type porphyre va être décrit ci-dessous.

2.6. La mine de Tuo-Yandong

Depuis 1997, deux lignes anomaliques et un segment métallifère ont été identifiés lors de campagnes de forages. Ces différents travaux ont montré que le gisement cuprifère de Tuo-Yandong est un large dépôt de cuivre.

Dans la mine de Tuo-Yandong, la largeur de la zone d'altération est d'environ 250-530 m pour une longueur dépassant 15 km. La majeure partie de sa superficie est couverte par des roches jurassiques. Les zones minéralisées sont les porphyres plagiogranitiques altérés et leur encaissant altéré: les basaltes, les basaltes

andésitiques et les tufs du Groupe Qieshan du Carbonifère inférieur. Dans la mine, trois zones minéralisées ont été découvertes. D'est en ouest, on retrouve les zones Tuo-est, Tuo et Yandong (Fig 2.2). Tous les corps minéralisés ont une forme tabulaire épaisse avec une direction E-W et un pendage vers le Sud (Fig. 3.2).

Le gisement Tuo-Est est contenu essentiellement dans les porphyres plagiogranitiques. La teneur de coupure utilisée pour la délimitation du gisement est de 0.2 %. Il a une longueur de 1300 m, la largeur varie entre 8.0 et 87.1 m, pour une moyenne de 38.94 m; la teneur moyenne de Cu en surface est 0.3% et celle obtenue à partir des forages est de 0.35 %. Le gisement Tuo se trouve du côté sud du gisement Tuo-Est. Plus de la moitié de la partie minéralisée est contenue dans les encaissants, soit dans les basaltes et les tufs, et le reste se trouve dans les porphyres plagiogranitiques. En surface, la longueur du corps est 1400 m en prenant 0.2 % comme teneur de coupure. La largeur varie entre 7.6 et 125.0 m, et la moyenne est de 65.87 m. La teneur en cuivre est de 0.44 %. L'analyse des forages donne une épaisseur de la zone minéralisée de 6.94 à 319.95 m en profondeur pour une moyenne de 96.02 m. La teneur la plus élevée est de 2.87% et elle est en général entre 0.2 et 0.8 %. En prenant 0.5 % de Cu comme la teneur de

coupure, on obtient une longueur de 1100 m, et une largeur moyenne de 19.09 m, une teneur moyenne en cuivre de 1.03%. La longueur du corps minéralisé actuellement considérée est de 1000 m pour une profondeur de 400 à 600 m, une épaisseur de 4 à 104.5 m (la moyenne étant de 63.74 m) et une teneur moyenne en cuivre de 0.65 %.

Le gisement Yandong (Fig.2.2) se trouve à l'Ouest de la mine Tuo-Yandong et au Sud-Ouest du gisement Tuo. La distance qui les sépare est d'environ 8 km.

Les réserves totales des gisements Tuo, Yandong et Tuo-Est sont estimées à 7,6 MT de cuivre (Wang,2000).

Des travaux ont déjà été effectués sur le gisement de Tuo et Tuo-Est. Nous avons choisi le gisement Yandong pour nos recherches car il n'a été découvert que récemment (en 1998). De plus la nature et les caractéristiques métallogéniques, ainsi que les relations entre la minéralisation et l'altération demeurent mal connues et très peu documentées.

Tabl. 2.1. Composition chimique des roches granitiques du Carbonifère inférieur au Nord de la zone tectonique Jueluotage, Xinjiang

Roche	Local	Nombre d'analy.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	autre	Total
Diorite	Région	17	55.63	0.92	17.61	3.31	4.70	0.14	3.49	6.70	4.15	1.30	0.27	2.02	100.26
	Tuo	7	56.63	0.91	16.73	3.54	4.75	0.14	3.19	6.28	4.15	1.22	0.24	2.17	99.95
Diotite quartzique	Région	13	60.48	0.62	16.25	2.77	3.92	0.12	2.55	5.68	3.93	1.70	0.19	1.65	99.87
	Tuo	5	61.24	0.61	16.60	3.14	3.63	0.10	2.16	4.89	4.02	1.52	0.19	2.13	100.23
Diotite granitique	Région	27	64.95	0.61	15.46	2.12	2.99	0.10	2.10	4.26	3.77	2.24	0.14	1.02	99.74
	Tuo	2	65.17	0.30	16.51	1.43	2.24	0.06	1.79	4.51	4.37	1.05	0.08	1.52	99.03
Diotite quartzique	Région	46	68.91	0.34	14.76	1.57	1.89	0.07	1.14	3.00	4.20	2.60	0.12	1.29	99.88
	Tuo	7	68.85	0.41	14.28	1.78	1.91	0.09	1.28	2.79	4.49	1.95	0.16	1.30	99.29
Granite monzonitique	Région	14	72.07	0.29	13.59	1.43	1.33	0.06	0.88	1.64	4.32	3.14	0.08	0.94	99.77
	Tuo	5	70.51	0.37	14.12	1.73	1.32	0.07	1.01	1.65	4.49	3.03	0.09	1.39	99.78
Porphyre plagiogranitique	Tuo	1	70.56	0.35	15.38	2.57	0.37	0.02	0.93	0.76	3.83	2.22	0.12	2.84	99.95
Porphyre plagiogranitique	Champ de Mine	1	69.35	0.26	15.66	0.17	1.05	0.11	0.55	2.77	4.15	2.11	0.13	3.22	99.53

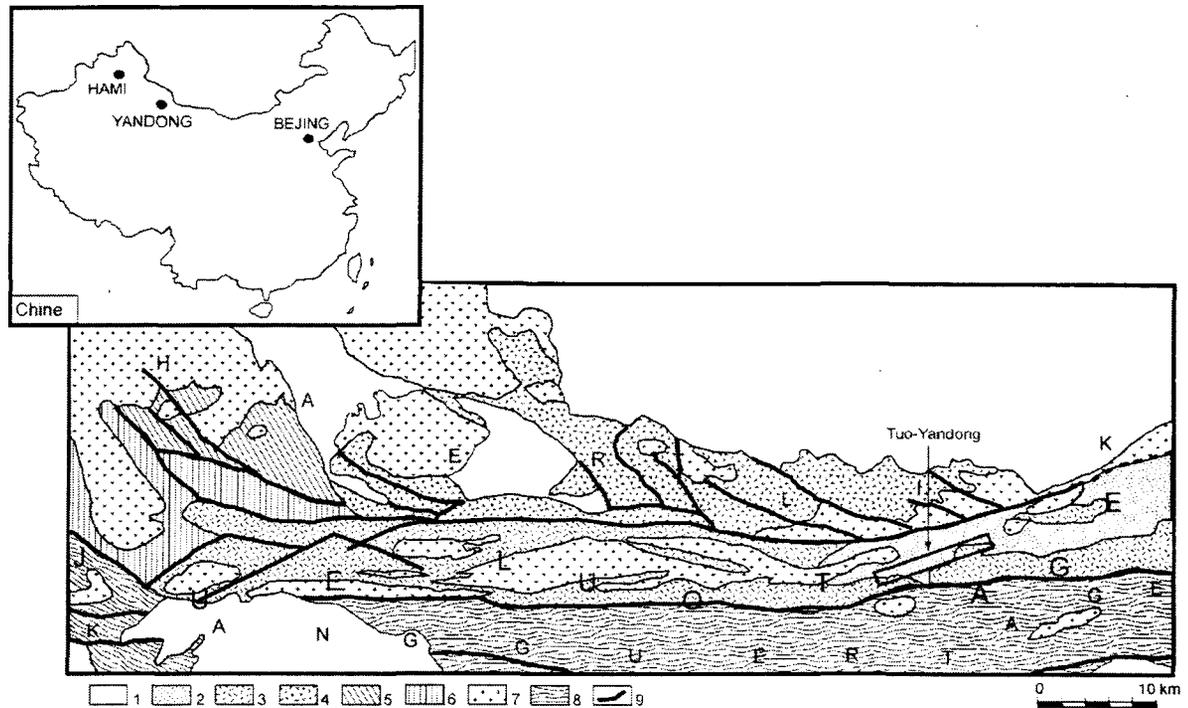


Fig. 2.1. Localisation du district cuprifère Tuo-Yandong en Chine (Modifiée de Liu et al., 2003).

1. Sédiments quaternaires, 2. Roches clastiques du jurassique, 3. Formations volcaniques du carbonifère inférieur et supérieur, 4. Formations du Dévonien, 5. Formations du Silurien, 6. Formations de l'Ordovicien, 7. Formations intrusives, 8. Zone de cisaillement, 9. Failles et zones de contact.

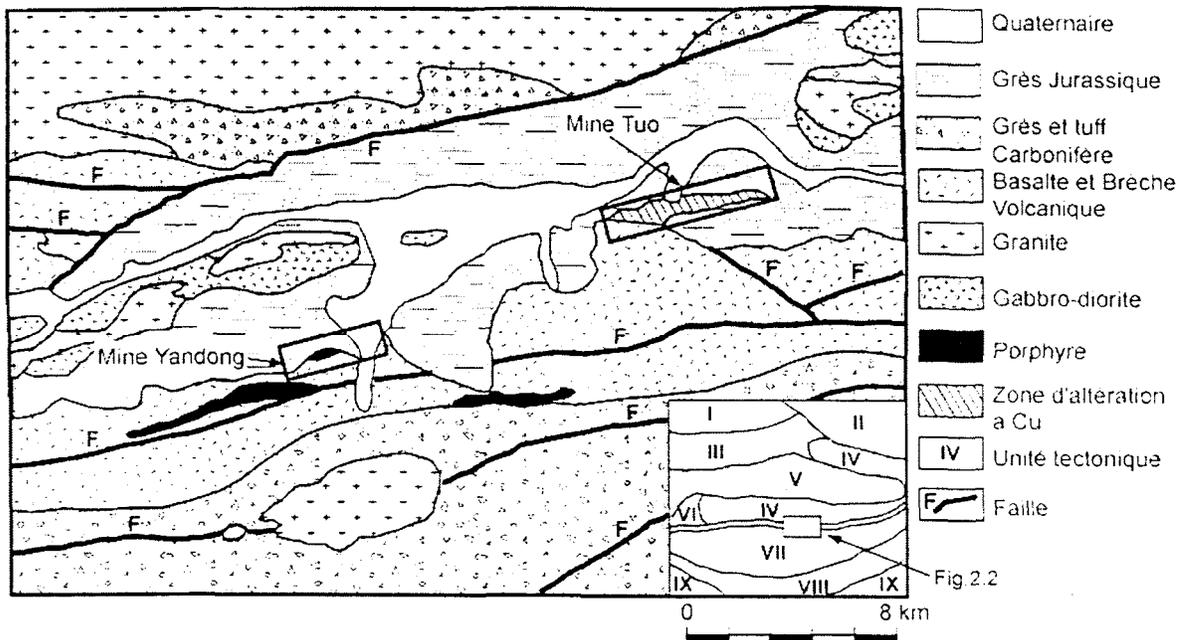


Fig. 2.2. Carte géologique du district cuprifère de Tuo-Yandong (Modifiée de Liu et al., 2003)

CHAPITRE III

GÉOLOGIE DU GISEMENT YANDONG

3.1. Résumé de la géologie du gisement Yandong

Le gisement Yandong se trouve à l'Ouest de la mine de Tuo-Yandong et au Sud-Ouest du gisement Tuo à 8 km de ce dernier. La minéralisation de cuivre est contenue dans les porphyres, les volcanites basaltiques et les tufs. La majeure partie du corps minéralisé est recouverte par les formations houilleuses du Jurassiques. La surface exposée est faible et l'orientation du corps est d'environ 80° (Fig. 3.1.).

3.1.1. Roches encaissantes

Les strates exposées dans le gisement Yandong appartiennent au groupe carbonifère Qieshan (Fig. 3.1) qui inclut trois sous-groupes. Le premier se compose des clasolites, des tufs et inclut localement quelques calcaires biogéniques et des roches aréniformes. Le deuxième comprend des basaltes tholéitiques, des andésites et des andésites basaltiques, ainsi que des dacites, des brèches volcaniques, des arénites et des conglomérats complexes. Le troisième comprend des arénites, des arénites graveleuses, des brèches volcaniques intermédiaires à

acides, des basaltes et quelques tufs, andésites et dacites. Les roches magmatiques minéralisées sont mises en place dans ces terrains. Les strates sont inclinées vers le sud avec des pendages variant entre 25° et 65°.

3.1.2. Intrusions porphyriques

Les intrusions hypergènes de porphyre plagiogranitique sont dispersées dans le gisement, mais la plupart sont recouvertes par les arénites et les conglomérats. Les affleurements sont rares et les surfaces d'exposition individuelles sont moins de 100 m². Les roches ont une texture porphyrique et une structure massive.

Les intrusions sont les porphyres granitiques et les porphyres plagiogranitiques formés entre le Carbonifère supérieur et le Permien inférieur. Les porphyres occupent une surface d'environ 3 Km², souvent sous la forme de filons pénétrant les volcanites. Les minéralisations de cuivre sont liées à ces intrusions. Certains segments des porphyres, dans lesquels l'altération est fortement développée, sont complètement minéralisés.

3.1.3. Structures

Les strates de la région présentent des structures monoclinales inclinées vers le sud. Les fractures, qui se sont développées principalement, comme les failles interstratifiées d'orientation E-W, sont les structures qui ont contrôlé la minéralisation et les lithologies.

3.2. Caractérisation du gisement

3.2.1. Forme et envergure du gîte

Le gîte minéralisé est principalement contenu dans la diorite porphyrique et les roches encaissantes. À la surface du sol, si l'on prend 0.2% comme la teneur de coupure pour déterminer le domaine minéralisé en cuivre, la longueur du corps minéralisé est alors de 900 m, la largeur est environ de 26 m et la direction est 80° (E-W). Il se présente sous forme d'une bande irrégulière. En section (Fig. 3.2), il se présente comme une lame épaisse fortement inclinée vers le sud avec un pendage d'environ 75-80°. L'épaisseur apparente varie de 1.93-182.98 m, à partir de l'analyse des forages, et la moyenne est de 59.91 m. Un des forages, dont la profondeur est jusqu'à 800m, n'a pas atteint la limite inférieure, ce qui montre que la profondeur du corps n'est pas encore nettement définie.

3.2.2. Teneur et composition minéralogique du gîte

À la surface, la teneur générale de Cu est 0.32% en moyenne. D'après les données de forages, la teneur varie de 0.2 à 2.20%, en général 0.2 à 0.55%, et la moyenne de Cu est 0.30% ; pour des teneurs moyennes de 0.020 à 0.031% Mo, 0.11 g/t Au et 2.96 g/t Ag.

La chalcopyrite est le minéral métallique majeur du minerai. Les autres minéraux métalliques sont : pyrite, molybdénite et magnétite. Ils se retrouvent principalement dans la diorite porphyrique située au toit du gîte, ou comme des

veines pyriteuses interpénétrantes dans les brèches. La molybdénite, la magnétite et la chalcopryrite sont étroitement associées dans l'espace et se développent dans l'intrusion de diorite porphyrique. Les minéraux de gangue sont : séricite, chlorite, épidote, biotite, feldspath, quartz et carbonates. Ces divers minéraux sont plus sous la forme de veinules que sous la forme disséminée ou sous forme massive. Les structures mylonitiques développées dans le minerai sont des lieux privilégiés d'emplacement (Fig. 3.13. b).

3.3. Les porphyres et leurs encaissants

Selon les études sur les échantillons recueillis et la documentation consultée, il a été mis en évidence que la roche mère de la minéralisation est un porphyre plagiogranitique. Les roches minéralisées sont principalement le porphyre plagiogranitique et les volcanites basaltiques et tufs encaissants (Tab.3.1, Fig. 3.3 et 3.4).

Le Tableau 3.1 montre les compositions en éléments majeurs des roches du gisement de Yandong. Etant donné que les échantillons que nous avons recueillis sont altérés à des degrés divers, ceux-ci ne présentent pas la composition des roches originelles. Cependant la physionomie de composition chimique des roches est encore évidente. La figure 3.3 donne la composition des intrusions granitiques et la figure 3.4 donne celle des roches encaissantes (volcanites basaltiques et tufs).

Les granites porphyriques de Yandong, comme les roches granitiques et les porphyres plagiogranitiques de la ceinture de Jueluotage, présentent des

caractères spécifiques : la quantité de Sr est plus élevée et celle de Y est plus basse (Tabl.3.2 et 3.3). Cette association des intrusions avec des volcanites acides à intermédiaires qui possèdent des particularités géochimiques avec Sr élevé et Y bas, est considérée comme étant le produit magmatique de la refonte de la plaque océanique (chevauchée) ou de la base de la croûte terrestre (Defant et *al.* 1990).

De plus, les résultats de l'analyse des éléments en trace montre une anomalie négative en Eu des porphyres, contrairement aux roches encaissantes qui ne présentent pas une telle anomalie (Fig. 3.5, tabl. 3.3), $(La/Yb)_N$ est-il plus faible dans les porphyres. Cela indique aussi que le magma de la roche-mère de la minéralisation a été généré par refonte. En fin, la période de la minéralisation des porphyres et leurs encaissants est située au Carbonifère (Liu et *al.* 2003).

3.4. Minéralisation de cuivre

La minéralisation apparaît sous forme disséminée et en veinules. Les minéralisations dans les veinules constituent des stockwerks (Fig. 3.6 a et b). Les principaux minéraux économiques observés dans les échantillons sont la chalcopryrite, la pyrite, la molybdénite. Les minéraux des filons majeurs sont le quartz, la séricite et le feldspath.

Il y a deux types de minéralisations importants dans le gisement : le type en forme de foliation dans lequel les sulfures sont disséminés et dispersés dans les roches altérées; et le type stockwerk dans lequel les sulfures apparaissent dans les veinules.

La minéralisation disséminée est commune dans ce gisement. Les grains fins des sulfures se dispersent surtout dans les roches d'altérations phyllique et chloritisée, soit dans la matrice microcristalline (Fig. 3.7 a), soit dans les phénocristaux complètement altérés (Fig. 3.7 b).

Les veinules peuvent être classées en plusieurs types selon la nature des minéraux observés :

- veinules à quartz-sulfures (Fig. 3.8 a);
- veinules à quartz-séricite-feldspath -sulfures (Fig. 3.8 b);
- veinules à biotite-quartz-sulfures (Fig. 3.9 a) ;
- veinules à biotite-sulfures (Fig. 3.9 b);
- veinules à quartz-biotite-sulfures (Fig. 3.10 a);
- veinules à quartz-carbonates (Fig. 3.10 b).

Dans certaines veinules, la quantité de sulfure est très élevée, localement les sulfures peuvent constituer jusqu'à 70% de la composition des veinules (Figs. 3.8 a, 3.9 b). Ces situations sont en rapport avec l'altération à biotite surtout et apparaissent dans les veinules à biotite-sulfures (Fig. 3.9 b) et les veinules à biotite-quartz-sulfures (Fig. 3.9 a). Le type de veinule à quartz-carbonate n'est pas fondamentalement minéralisé (Fig. 3.10 b).

La pyrite est le minéral le plus commun de ce gisement, suivi par la chalcopyrite. Parmi les échantillons, on n'a pas observé d'autres minéraux de cuivre. La pyrite et la chalcopyrite sont communément co-génétiques que se soit dans la forme

disséminée ou dans les veinules. La chalcopyrite s'observe dans les veinules à quartz-séricite-sulfure (surtout chalcopyrite) (Figs. 3.9 a, 3.11 a) et à biotite-quartz-sulfure (surtout chalcopyrite) (Figs. 3.9 b, 3.11 b). Elle apparaît entre les grains de pyrite dans les veinules (Fig.3.12.a), ou, très souvent elle entoure la pyrite (Fig. 3.12.b, Fig. 3.13.a) ou alors elle est contenue dans les microfractures de la pyrite (Fig. 3.12.b).

D'autre part, les foliations générées par le cisaillement sont aussi des espaces de remplissage des métaux (Fig. 3.13 b).

L'analyse des teneurs à travers le forage ZK001 (Fig. 3.2 et 3.14) montre que la zone où se superposent l'altération phyllique, l'altération potassique et la silicification sont les plus riches en Cu. Les zones à altération phyllique exclusivement peuvent être riches en Cu ou au contraire pauvres en Cu.

Du point de vue de l'âge de la minéralisation, Ruizongyao et *al.* (2001) ont déterminé l'âge isotopique au Re-Os sur les molybdénites du gisement de Tuo à 322.7 ± 2.3 Ma. Cette donnée reflète approximativement l'âge de la minéralisation des gisements de Tuo-Yandong.

3.5. Altération

Dans ce gisement, l'altération se développe généralement sur une grande distance et elle est en rapport étroit avec la minéralisation. Mais les types et les degrés d'altération sont variables. Les minéraux d'altération sont principalement la biotite, la séricite, le quartz, la chlorite, l'épidote, la calcite et la pyrite. Les minéralisations de cuivre apparaissent principalement dans les fractures, dans la pyrite et dans les veinules de quartz.

Ces minéraux d'altération affichent une certaine zonalité spatiale autour du minerai. Les assemblages des minéraux d'altération observés au microscope, montrent que, du cœur du minerai vers l'extérieur, se développent successivement la biotisation, l'altération phyllique, la silicification, l'altération argilique et l'altération propylitique. Parmi les zones d'altération, celles affectées par la biotisation, l'altération phyllique et la silicification sont les plus minéralisées.

3.5.1. Les types d'altération

- *Altération phyllique*

L'altération phyllique est le type d'altération le plus important dans ce gisement. Elle est marquée essentiellement par l'assemblage minéralogique : séricite + quartz + pyrite. On distingue l'altération phyllique en forme de foliation (Fig. 3.15 a) et l'altération phyllique en veinules (Fig. 3.15 b).

L'altération phyllique en forme de foliation est la plus commune dans le

gisement, mais les autres types d'altération s'y superposent souvent. Dans les roches à altération phyllique, les minéraux d'altération, comme la séricite, le quartz et la pyrite, remplacent généralement des phénocristaux et la matrice microcristalline. Ces minéraux remplissent les espaces entre les phénocristaux de quartz. Les phénocristaux de feldspath sont fondamentalement séricitisés (Fig. 3.16 a), ainsi que la matrice microcristalline (Fig. 3.16 b).

L'altération phyllique en veinules se présente sous forme de veinules à séricite-sulfures (Fig. 3.15 b), de veinules à séricite-quartz-sulfures (Fig. 3.8.b), ou de veinules à séricite-quartz-sulfures-biotite (Fig. 3.10 a). Aussi la séricite et le quartz apparaissent dans les épontes des veinules (Fig. 3.17 a).

Dans ce gisement, la biotisation et la silicification se superposent à l'altération phyllique qui se développe sur de plus larges surfaces. La minéralisation en Cu est plus intense dans les zones affectées par une forte altération phyllique, surtout là où cette altération se superpose à la biotisation et la silicification (Figs. 3.2, 3.14, 3.16.a, 3.18.b, 3.19.a).

- ***Altération potassique***

L'altération potassique se manifeste par l'apparition de biotite et la disparition des feldspaths potassiques. Ce type d'altération est très important dans ce gisement car l'apparition de la biotite s'accompagne souvent d'une abondance de chalcopryrite et une intensification de la minéralisation.

La biotisation se développe sur de grandes surfaces et se présente principalement sous forme de stockwerk ou parfois sous forme de foliation. Ce type d'altération est superposé à l'altération phyllique intensive (Fig. 3.2). L'assemblage minéralogique est marqué par l'association : biotite + quartz + pyrite.

La biotisation en forme de foliation apparaît souvent dans les roches à altération phyllique avec des minéralisations disséminées (Fig. 3.17.b). Celle en stockwerk se manifeste par l'existence de différents types de veinules dans les roches phylliques intensives : veinule à biotite, veinule à biotite-chalcopyrite (Fig. 3.19.a), veinule à biotite - chalcopyrite - pyrite (Fig. 3.18.b), veinule à biotite - quartz - chalcopyrite-pyrite.

- *Silicification*

La silicification se développe localement et se superpose aux zones affectées par la biotisation ou par l'altération phyllique (Fig. 3.2). La silicification intense est étroitement associée à la minéralisation (Fig. 3.18.b, 3.19.a et b).

- *Altération argilique*

L'altération argilique se développe plus loin du corps minéralisé (Fig. 3.2) et est caractérisée par l'apparition de la chlorite en plus du quartz et de la pyrite.

L'altération argilique se manifeste principalement sous forme faciale. La pyrite est fine et dispersée, la chalcopyrite est rarement observée et parfois il est observé des veinules à chlorite (Fig. 3.20.a).

- Altération propylitique

L'altération propylitique est très peu observée. Seulement quelques échantillons observés en lames minces ont montré ce type d'altération (Fig. 3.20.b). Elle apparaît encore plus loin du gîte et se caractérise par l'apparition simultanée de chlorite et des carbonates, ainsi que de faibles quantités d'épidote. Localement, les carbonates peuvent être très abondants. Dans ce cas, on observe de véritables veinules de carbonate (Fig. 3.21.a).

3.5.2. La zonalité des altérations

D'après nos observations, selon les assemblages et la distribution des minéraux d'altération dans le gisement de Yandong, il apparaît clairement une zonalité spatiale des altérations. Au cœur du gîte, ce sont la biotisation (altération potassique) et la silicification. Vers l'extérieur du gîte, c'est l'altération phyllique qui prédomine, surtout l'altération phyllique intensive qui se superpose à la biotisation et à la silicification. Ainsi, ces secteurs sont les zones les plus minéralisées (Fig.3.18 b et 3.21 b). À la suite de l'altération phyllique, viennent dans l'ordre, l'altération argilitique et l'altération propylitique (Fig. 3.2).

- Zone potassique

Cette zone apparaît au cœur du gîte et se caractérise par une abondance de biotite, l'association des minéraux comprend le quartz et la pyrite. Dans cette zone, la silicification se développe localement. Les deux types d'altération sont en rapport

étroit avec la minéralisation de cuivre.

- Zone phyllique

C'est la zone d'altération la plus large dans ce gisement. Elle se développe du cœur du gîte jusqu'à l'extérieur. L'assemblage minéralogique contient la séricite, le quartz et la pyrite. Une partie de cette zone se superpose à la zone de biotisation, surtout les zones localement altérées intensément. Ce sont également des secteurs à forte minéralisation.

- Zone argilique

La composition des minéraux de cette zone contient principalement de la chlorite et du quartz, ainsi que de la pyrite en très faible quantité. Elle est loin du gîte et la minéralisation y est très faible.

- Zone propylitique

Cette zone apparaît plus loin du gîte. Parmi les échantillons que nous avons collectionnés, seulement quelques-uns présentent l'altération propylitique. Les minéraux caractéristiques sont les carbonates, la chlorite et un peu d'épidote. Dans cette zone, l'altération carbonatée se développe localement.

Tabl. 3.1. Composition en éléments majeurs (% en poids) des roches du gisement Yandong

	Porphyres plagiogranitiques					Volcanites basaltiques et tufs													
	W-2	W3-1	W3-12	W3-19	W-69	W-7	W-11	W-38	W-49	W-58	W-75	W2-1	W2-3	W2-5	W2-7	W2-9	W2-12	W3-6	W3-23
SiO ₂	64,49	58,75	64,16	58,43	58,68	44,30	52,92	54,52	45,53	56,10	43,65	48,98	48,94	48,97	49,39	49,97	45,64	49,81	44,06
TiO ₂	0,00	0,34	0,06	0,21	0,54	0,22	0,21	0,11	0,57	0,55	1,00	0,80	0,58	0,31	0,28	0,52	0,68	0,40	0,89
Al ₂ O ₃	15,53	19,48	16,40	17,04	12,25	28,74	16,40	14,78	18,59	20,78	17,93	19,48	22,40	23,38	21,67	19,97	21,67	21,18	22,40
Fe ₂ O ₃	1,50	2,58	2,00	1,40	1,55	7,38	4,05	5,96	4,80	1,60	5,50	1,40	0,84	4,04	2,69	2,88	3,02	6,77	4,36
FeO	1,70	3,40	2,29	2,04	3,05	2,42	4,55	5,74	4,00	3,00	5,60	4,70	5,21	3,57	3,80	3,92	5,08	2,69	5,83
MnO	0,22	0,19	0,14	0,45	0,28	0,25	0,26	0,28	0,44	0,24	0,41	0,25	0,28	0,23	0,34	0,30	0,36	0,20	0,41
MgO	1,16	3,42	0,50	0,65	4,31	1,37	3,96	4,39	6,22	2,32	4,86	3,67	4,84	4,16	3,84	4,07	5,72	2,54	6,36
CaO	3,50	0,77	3,20	6,27	7,23	0,11	4,84	4,83	7,68	2,67	5,69	7,22	4,67	4,35	7,27	7,91	6,46	2,92	4,54
Na ₂ O	1,00	1,80	1,19	3,58	0,40	1,80	0,60	0,60	1,00	1,50	0,41	2,78	2,58	2,98	2,28	2,85	2,57	2,47	2,35
K ₂ O	2,70	1,59	2,55	1,95	2,40	4,50	2,00	1,10	1,30	2,50	2,41	1,35	1,35	1,07	1,12	0,60	1,32	1,77	1,09
H ₂ O	6,47	6,89	6,88	7,39	5,46	8,32	9,12	6,94	4,88	7,90	10,06	8,31	7,50	5,89	5,86	5,76	6,49	8,85	6,98
P ₂ O ₅	0,20	0,25	0,12	0,12	0,20	0,18	0,37	0,18	0,26	0,35	0,37	0,26	0,25	0,37	0,20	0,17	0,22	0,30	0,30
CO ₂	-	-	-	-	3,10	-	-	-	4,70		1,90	0,30	-	-	0,70	0,82	0,35	-	-
Total	99,47	99,46	99,49	99,53	99,45	99,59	99,28	99,43	99,97	99,51	99,79	99,50	99,44	99,32	99,44	99,74	99,58	99,90	99,57

Tabl. 3.2. Comparaison de la composition entre les granites du gisement de Yandong et ceux de la ceinture de Jialuotage

Porphyre	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Sr×10 ⁻⁶	Yb×10 ⁻⁶	Y×10 ⁻⁶	Sr/Y	Y/Yb	ΣREE×10 ⁻⁶	LREE/HREE	δEu	
Région	basse	56.03	13.36	0.58	300	0.89	11.3	21	7.7	71.07	5.43	0.79
	élevé	71.58	18.92	3.86	760	2.70	22.8	60	12.5	107.43	11.35	1.24
	moyen	64.55	15.53	1.83	416	1.53	14.6	30.1	9.6	85.30	7.4	1.00
Mine de Tuo-Yandong	70.56	15.38	0.93	330	1.34	11.7	28.2	8.7	76.32	8.18	1.12	
Yandong	60.64	15.75	2.96	392	1.46	14.9	26.3	10.2				

Tabl. 3.3. Composition en éléments traces (ppm) des roches du gisement Yandong

	Porphyres plagiogranitiques					Volcanites basaltiques et tufs														
	W-2	W3-1	W3-12	W3-19	W-69	W-7	W-11	W-38	W-49	W-58	W-75	W2-1	W2-3	W2-5	W2-7	W2-9	W2-12	W3-6	W3-23	
Ba	430	186	512	410	452	662	179	98	94	456	270	175	184	217	276	180	185	316	433	
Rb	62	40	54	45	67	75	55	28	36	22	63	33	33	25	29	16	37	39	24	
Sr	266	444	152	196	465	291	176	145	195	707	91	596	487	577	808	535	448	393	499	
Pb	-	7	12	28	-	-	-	-	-	-	-	6	11	25	18	19	11	11	13	
Th	-	2	8	7	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	2	1	
U	-	1	3	2	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	0	1	1	1	
Zr	72	144	311	288	88	219	141	85	83	463	111	64	67	63	63	60	124	150	128	
Nb	3	4	10	11	3	6	4	3	3	19	4	2	2	2	2	2	4	5	5	
Y	6	22	45	50	17	15	27	18	17	80	14	12	13	12	13	12	20	21	25	
Ce	30	39	62	58	37	14	51	21	21	87	16	15	17	15	16	15	26	45	34	
Sc	4	21	10	15	18	21	23	23	28	22	25	22	21	22	22	23	30	18	34	
V	47	182	31	58	139	278	160	137	224	90	192	190	158	193	207	192	238	146	252	
Ni	13	26	6	10	78	127	97	83	63	14	126	54	53	54	58	54	113	23	131	
Cu	696	1910	827	1575	863	1123	1308	6093	332	648	80	1882	840	1020	550	973	589	815	1183	
Zn	69	162	72	224	168	57	257	130	133	26	424	175	332	326	1882	1439	204	353	525	
Ga	16	22	20	22	18	25	22	18	20	28	20	22	19	20	23	21	21	22	24	
La	16	16	27	23	16	5	20	8	8	42	6	6	7	6	7	6	11	19	14	
Pr	3	5	7	8	4	2	8	3	3	13	2	2	2	2	2	2	4	6	4	
Sm	1	5	7	8	4	2	7	3	3	13	2	2	2	2	2	2	4	5	5	
Eu	0	1	1	2	1	1	2	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Gd	1	4	6	8	3	3	6	3	3	13	2	2	3	2	3	3	4	4	5	
Dy	1	4	7	9	3	3	4	3	3	14	3	2	2	2	3	2	4	4	5	
Ho	0	1	2	2	1	1	1	1	1	3	1	0	1	0	0	0	1	1	1	
Er	1	2	5	5	2	2	2	2	2	9	2	1	1	1	1	1	2	2	3	
Tm	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Yb	1	2	5	6	1	2	2	1	2	8	1	1	1	1	1	1	2	2	3	
Lu	-	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ta	-	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	
Nd	10	23	30	34	19	9	36	13	14	52	10	10	10	9	10	10	17	25	20	
Hf	-	4	9	9	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	2	3	4	4	
Tb	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	

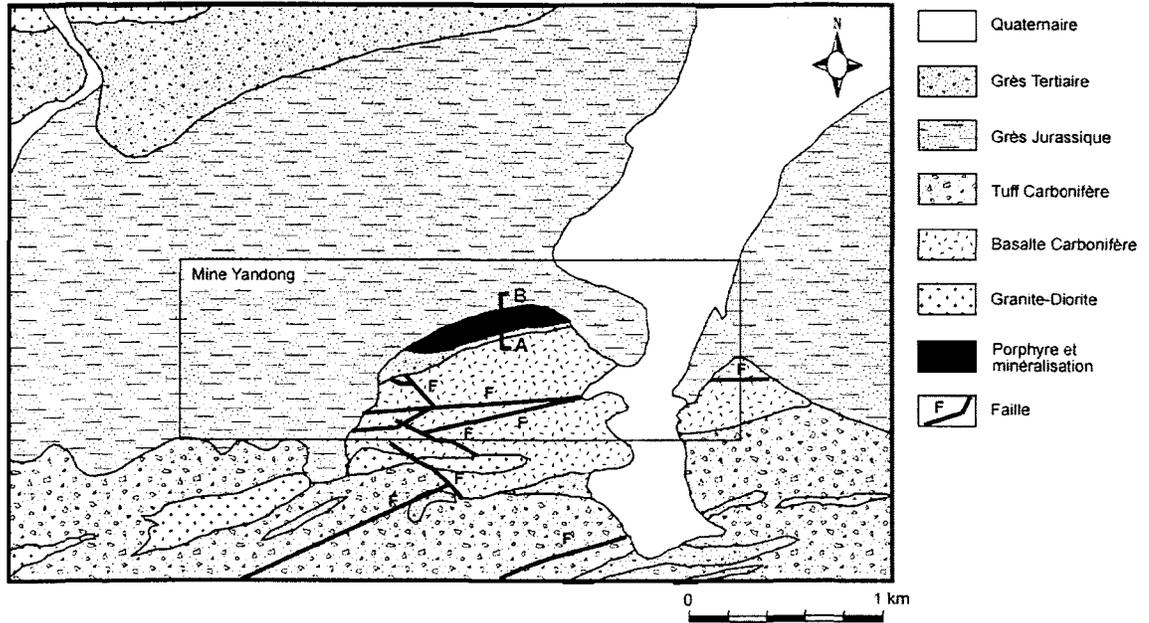


Fig.3.1. Carte géologique de la mine Yandong
(d'après Liu. et al. 2003)

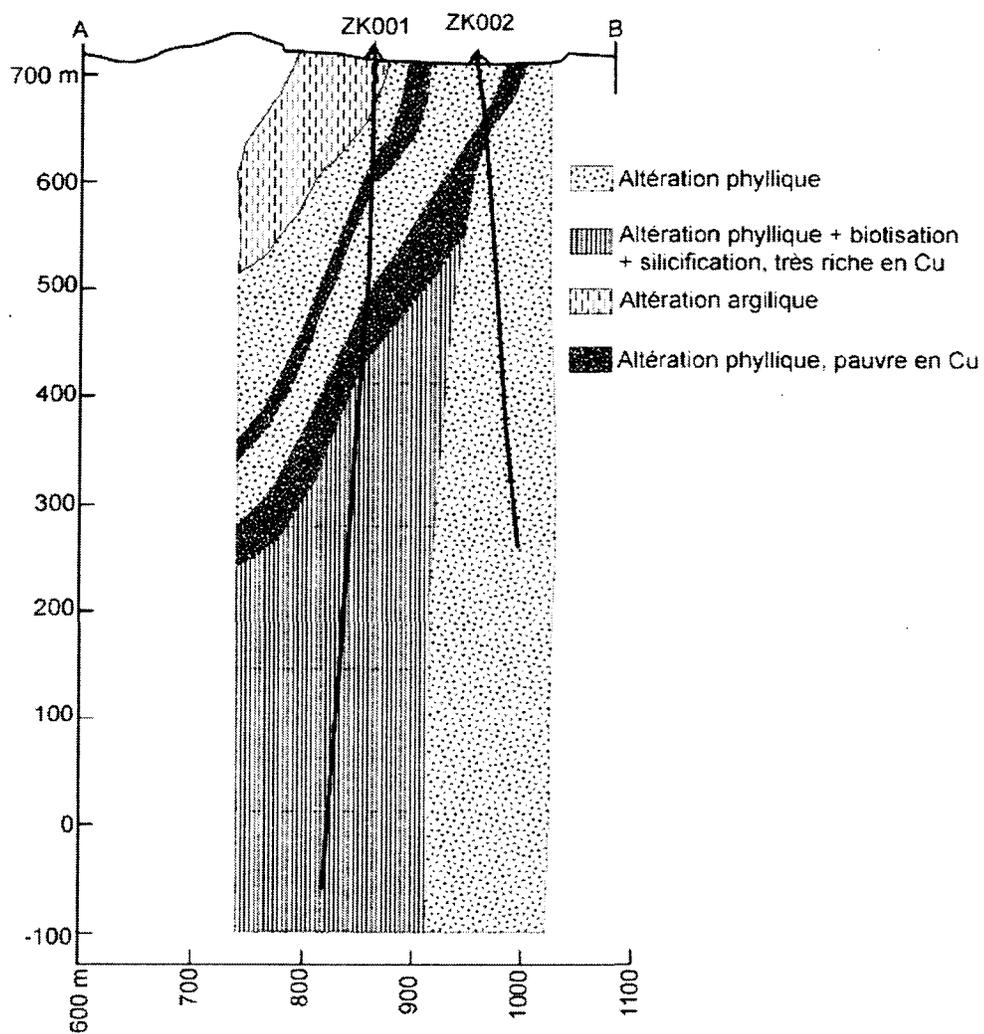


Fig. 3.2. Coupe géologique montrant les différents types d'altération dans la mine de Yandong

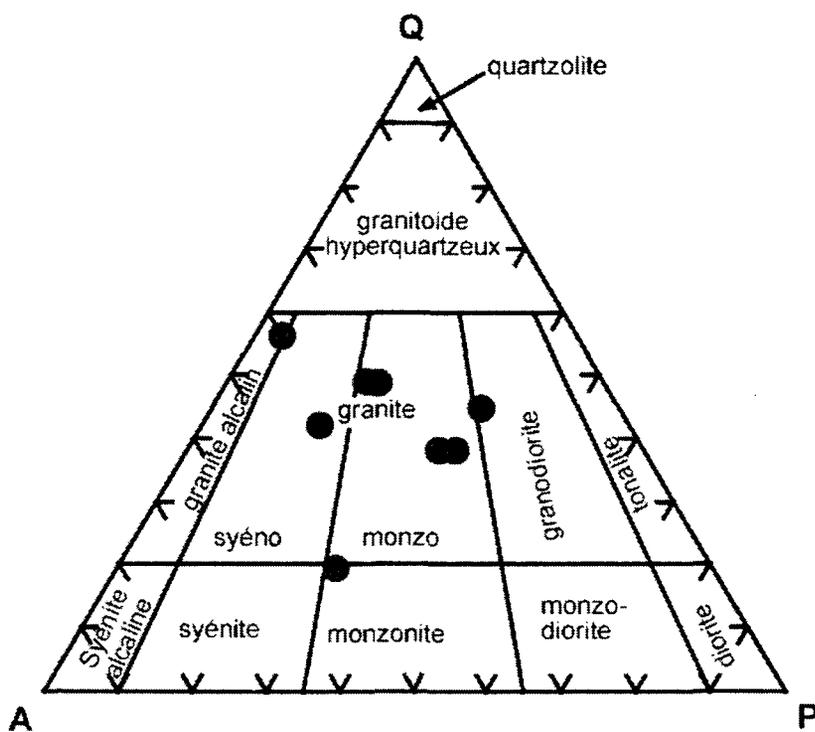


Fig. 3.3. Classification dans le diagramme QAP de Strekeisen (1974) des roches porphyriques du gisement de Yandong

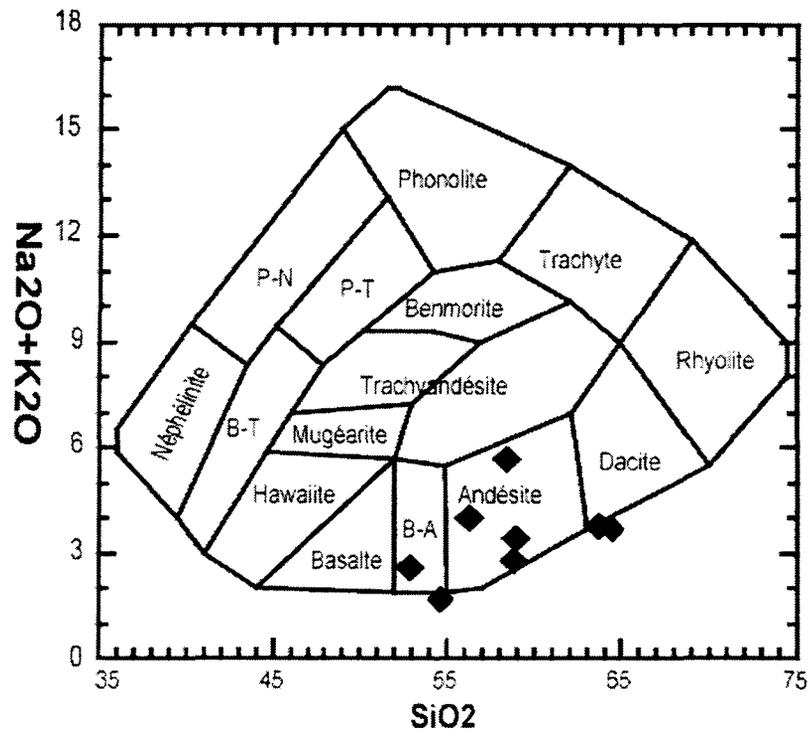


Fig.3.4. Classification des roches encaissantes du gisement de Yandong dans le diagramme SiO_2 vs $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$

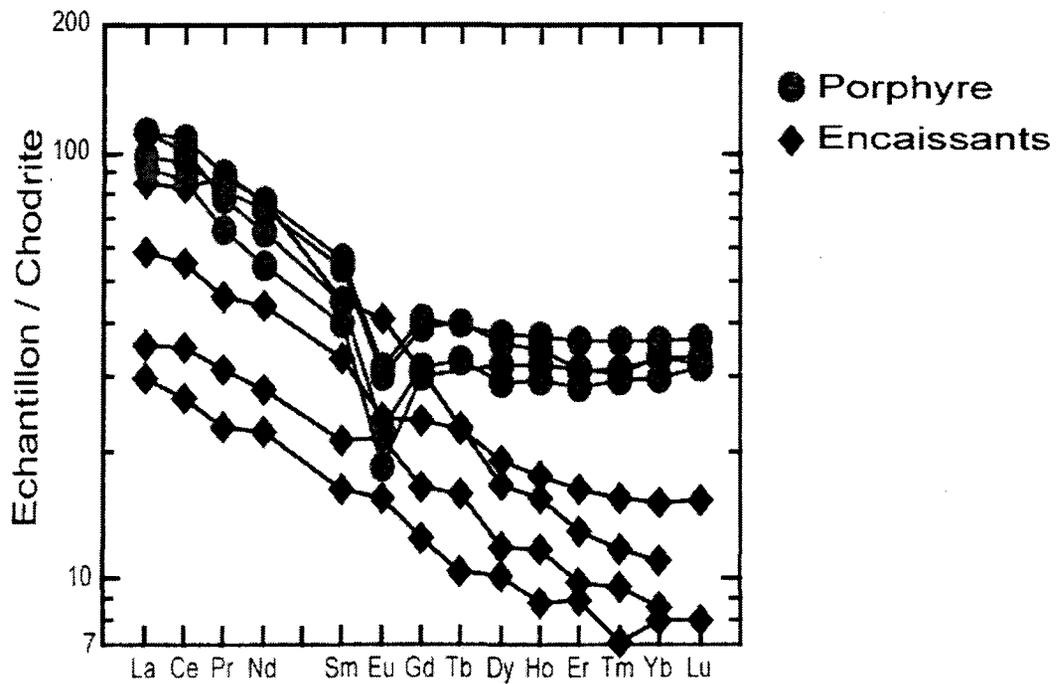


Fig. 3.5. Distribution des éléments de terres rares dans les roches porphyriques et leurs encaissants dans le gisement de Yandong.

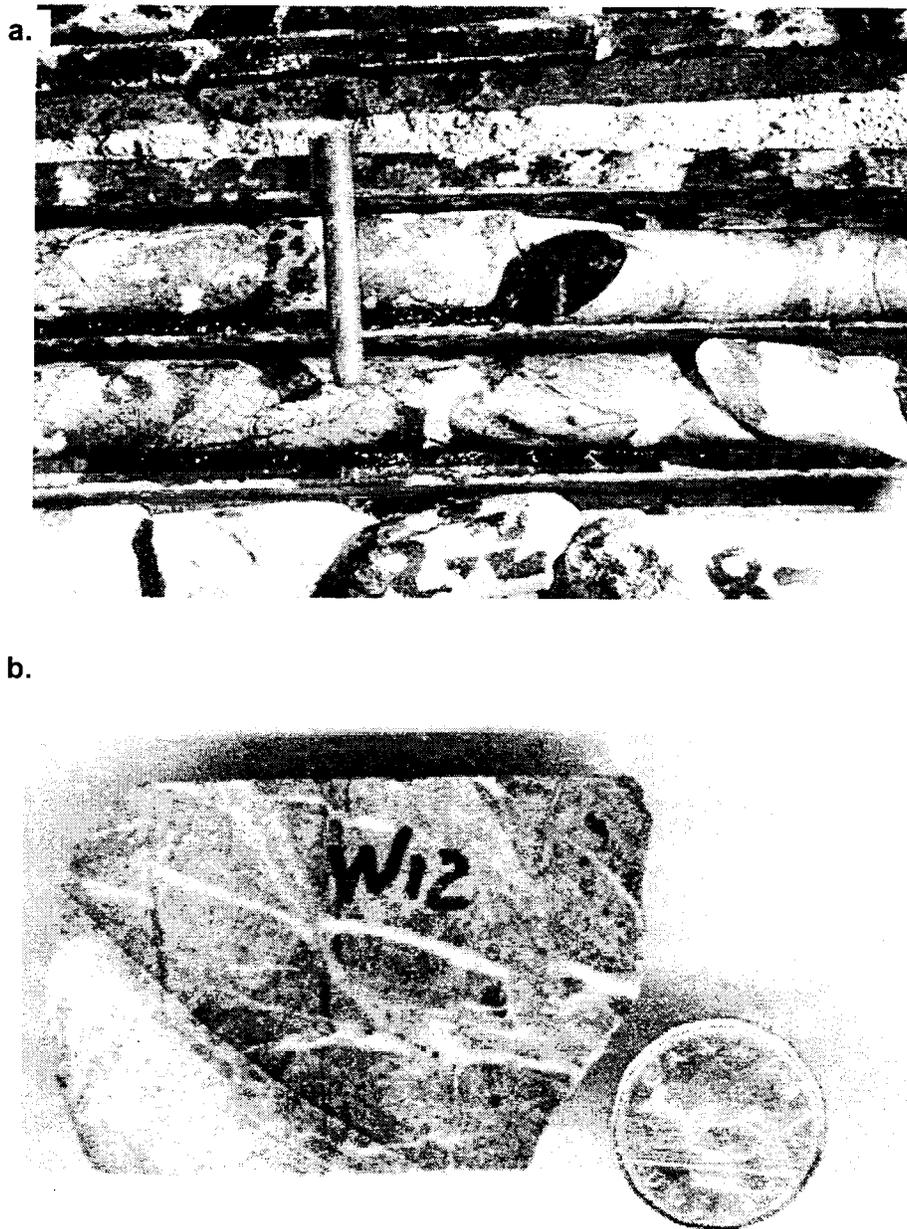


Fig. 3.6. a. Carottes de forage montrant des veinules minéralisées en forme de stockwerk.
b. Veinules minéralisées en forme de stockwerk.

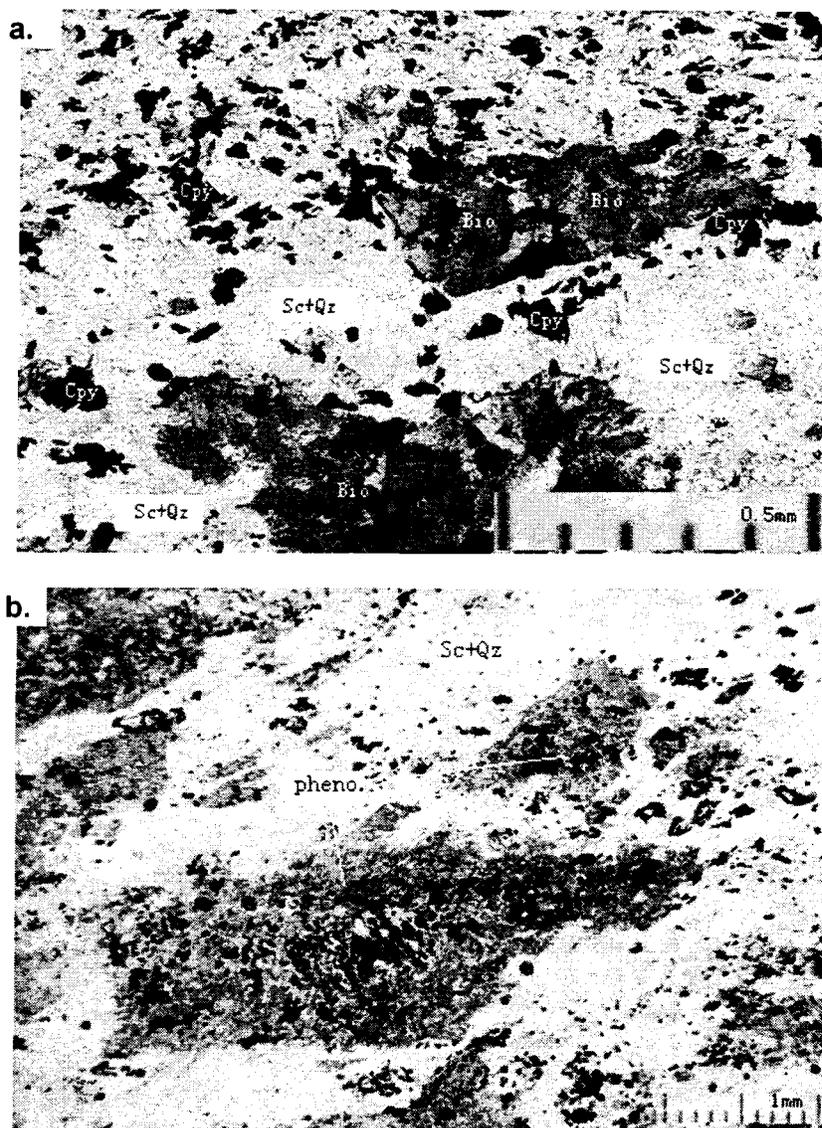


Fig. 3.7. a. Minéralisation disséminée associée la biotisation et à l'altération phyllique.
b. Minéralisation disséminée associée à l'altération phyllique.



Fig. 3.8. a. Veinule à quartz-sulfures dans le porphyre phyllique. Altération à quartz-séricite prononcée sur les épontes de la veinule.
 b. Veinule à quartz-séricite-feldspath-sulfures dans le porphyre phyllique.

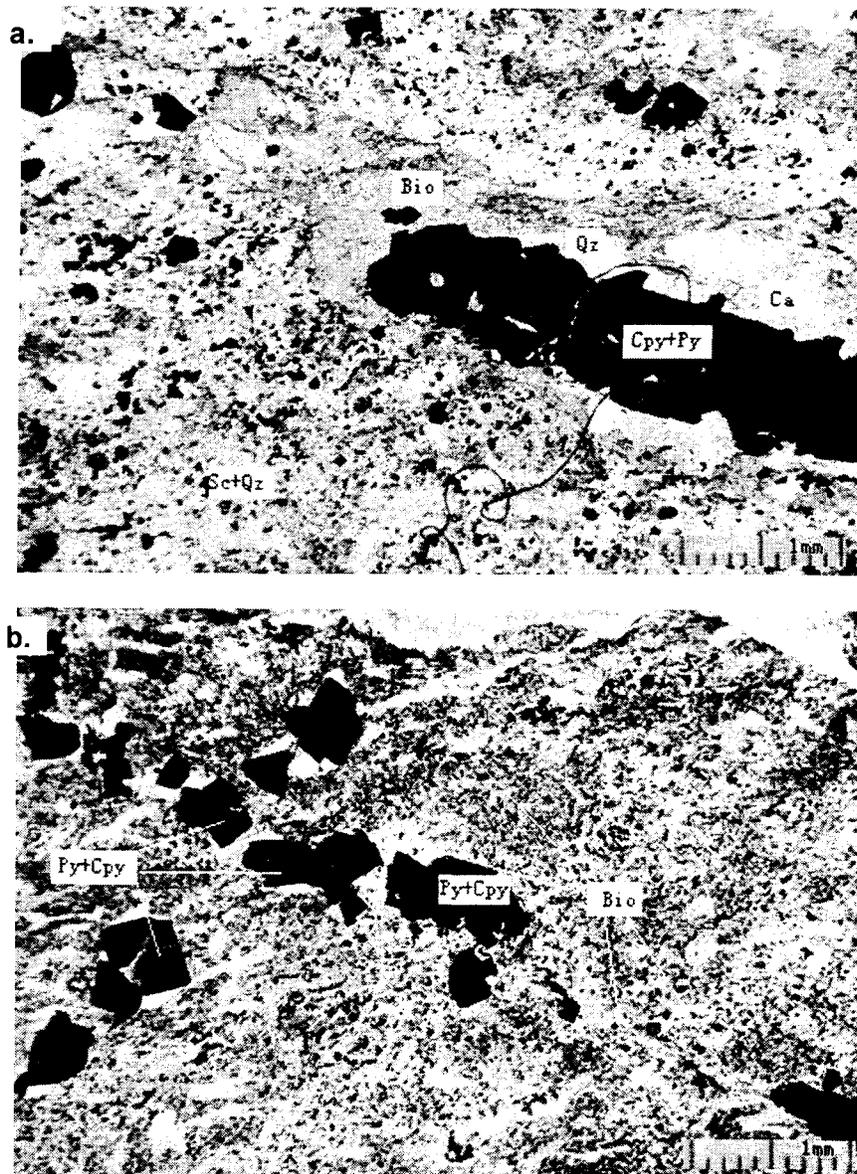


Fig. 7.9. a. Veinule à biotite-chalcopyrite-pyrite-quartz avec minéralisation disséminée dans l'encaissant altéré.
 b. Veinules à biotite-sulfures avec minéralisation disséminée dans un stockwerk

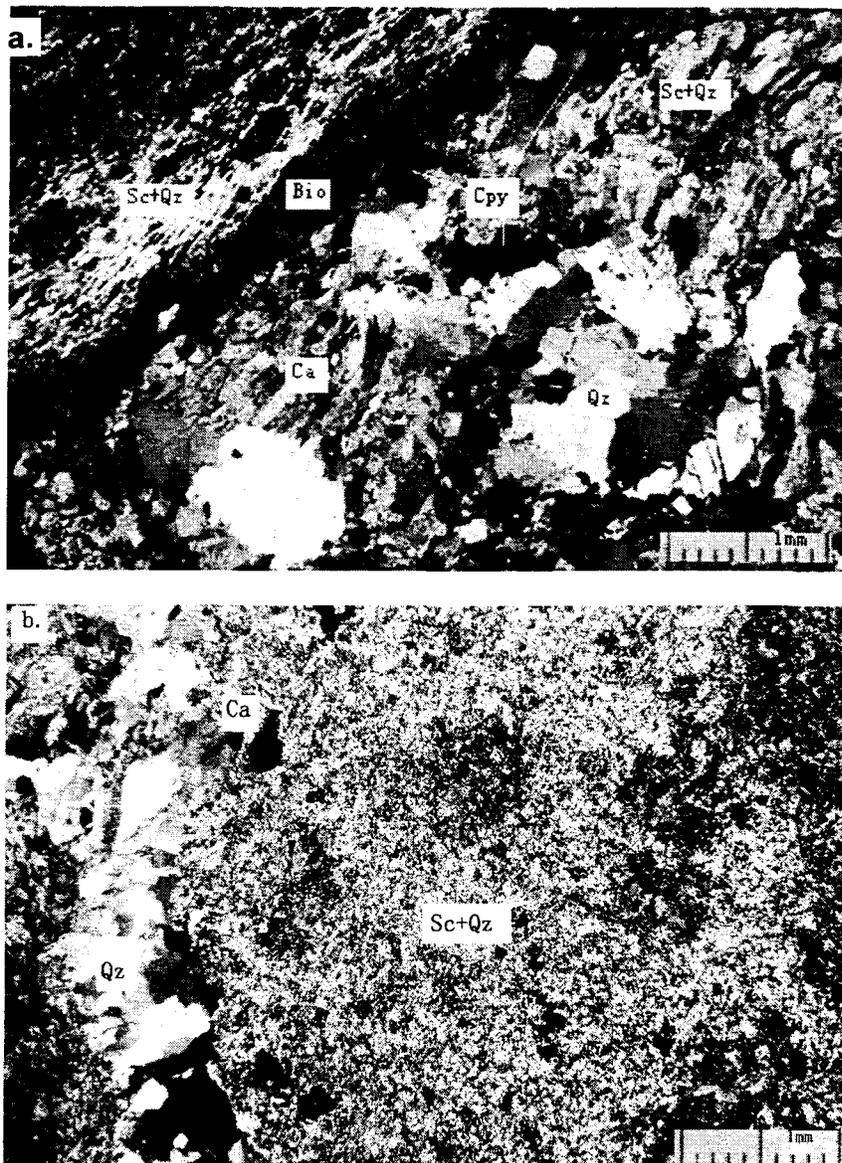


Fig.3.10. a. Veinule à quartz-séricite-biotite-sulfures.
b. Veinule à quartz-carbonates dans une zone à altération phyllique et à faible minéralisation

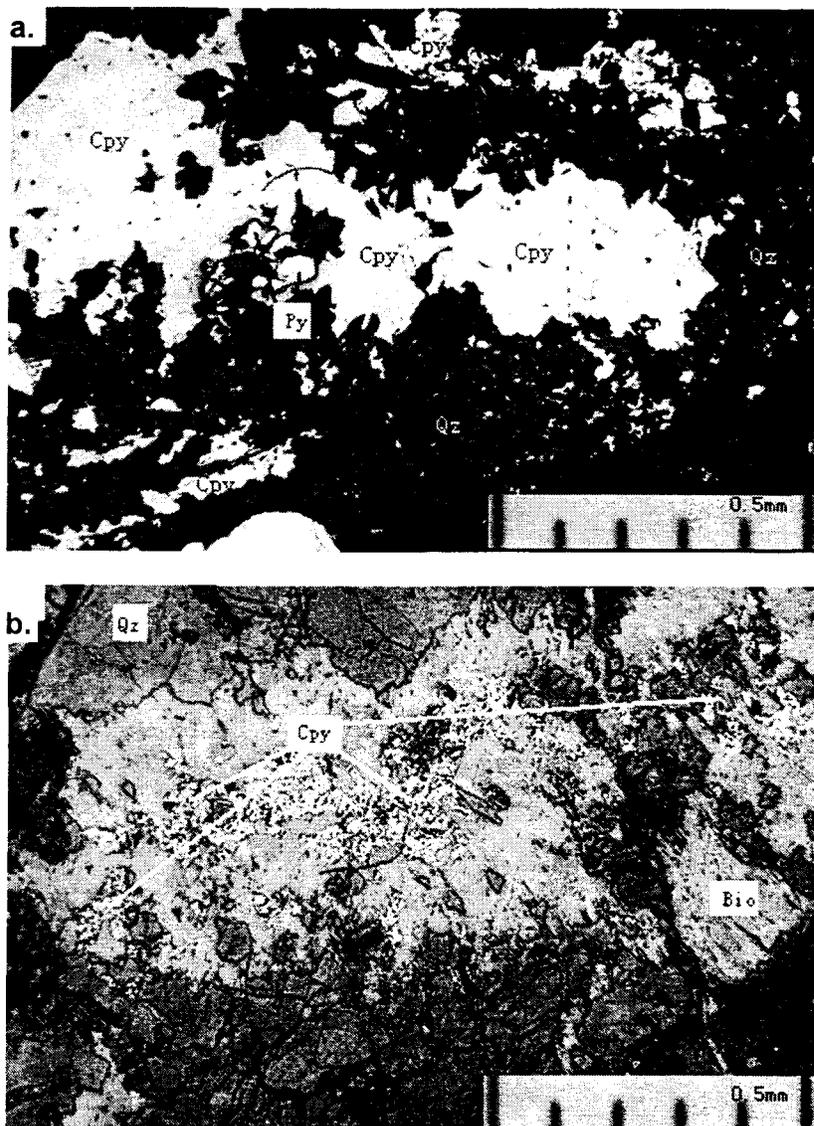


Fig. 3.11. a. Chalcopyrite dans une veinule à quartz-séricite-sulfures. (Réflexion, X 50)
 b. Chalcopyrite dans une veinule à biotite-quartz-sulfures (Réflexion, X 50)

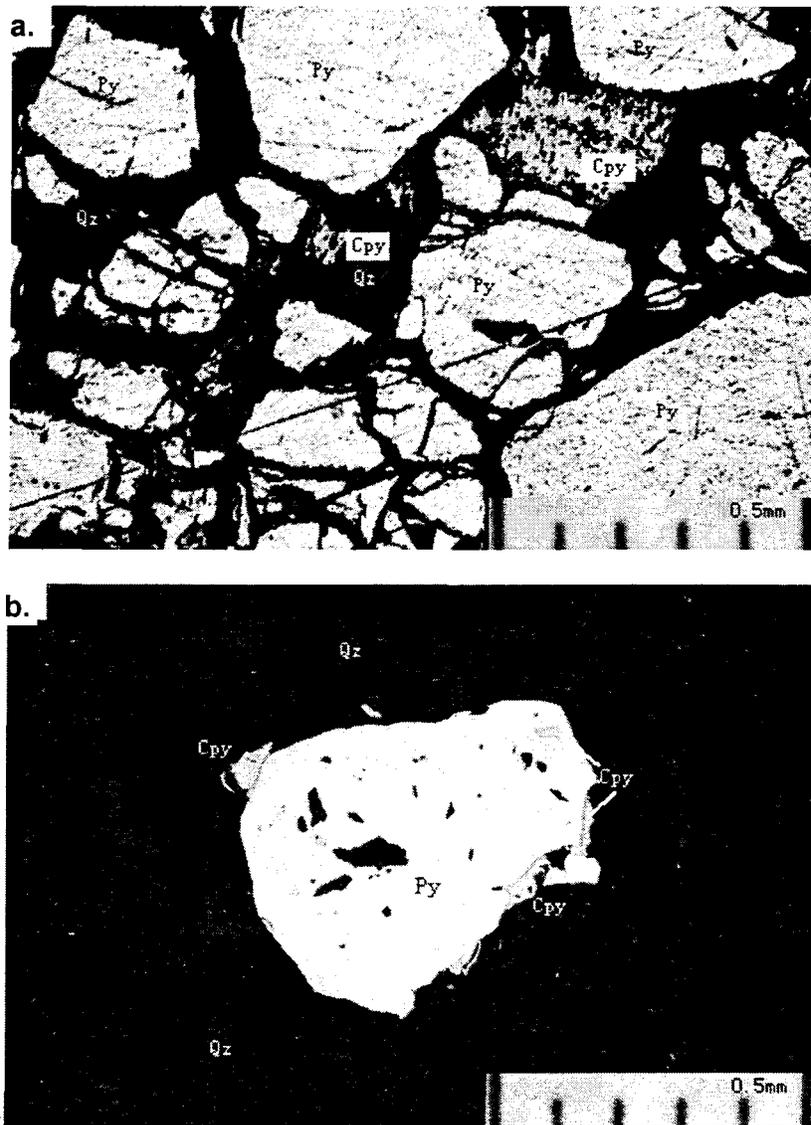


Fig. 3.12. a. Chalcopyrite entre les grains de pyrite. (Réflexion, X 50)
 b. Chalcopyrite entourant un grain de pyrite et contenue dans ses microfractures (Réflexion, X 50)

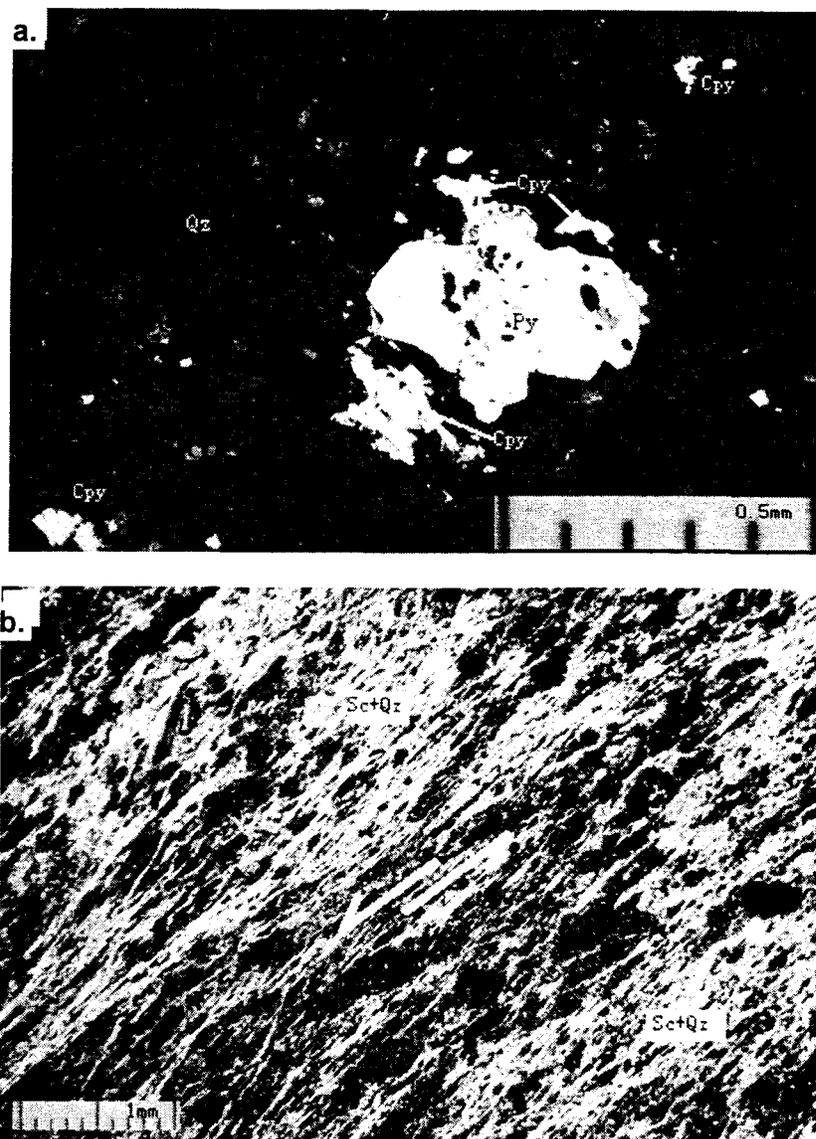


Fig. 3. 13. a. Chalcopyrite entourant un grain de pyrite et disséminée dans l'encaissant (Réflexion, X 50)
b. Foliations de cisaillement dans les zones minéralisées

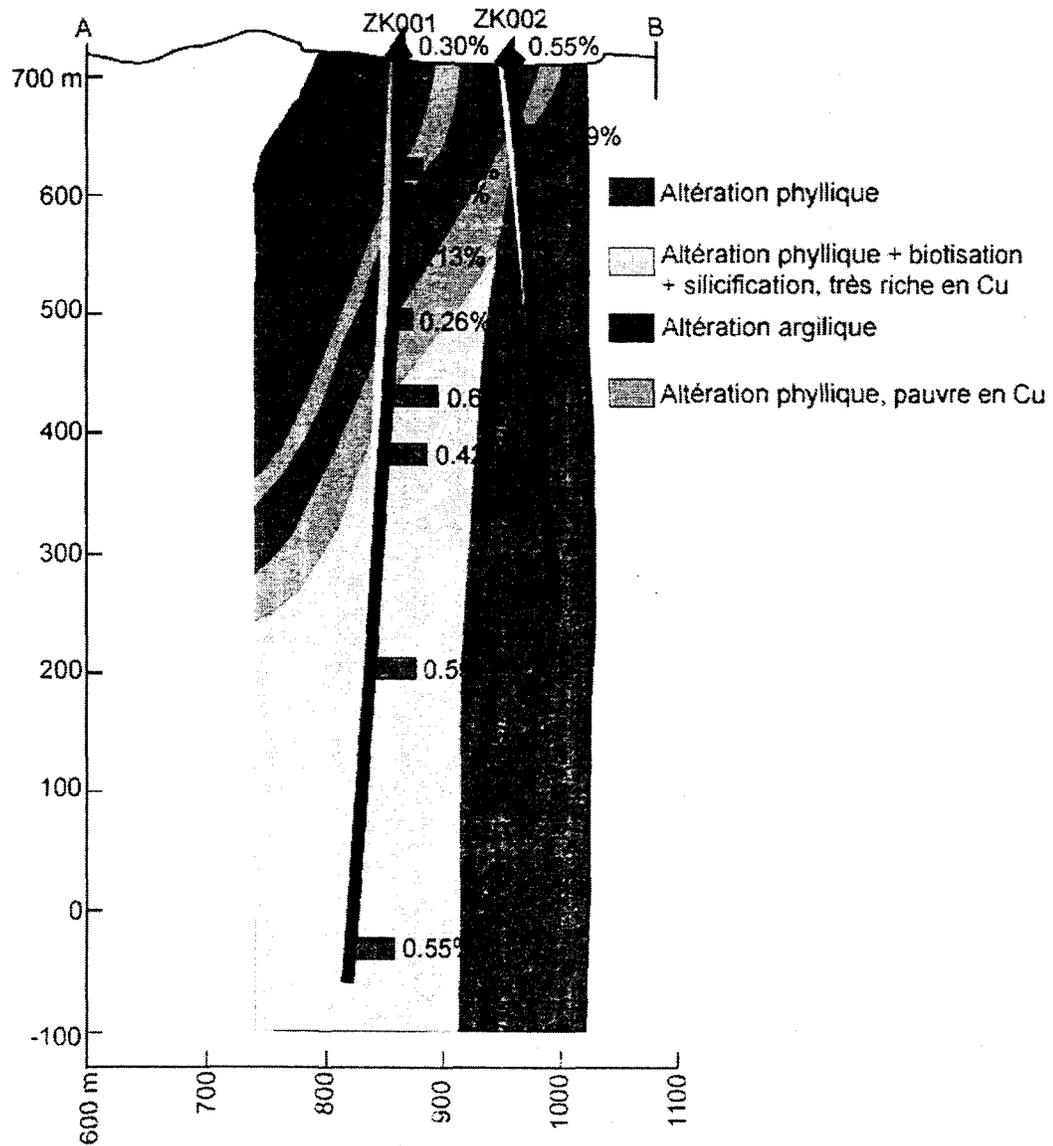


Fig. 3.14. Teneurs en Cu le long des forages ZK001 et ZK002 de la mine Yandong.

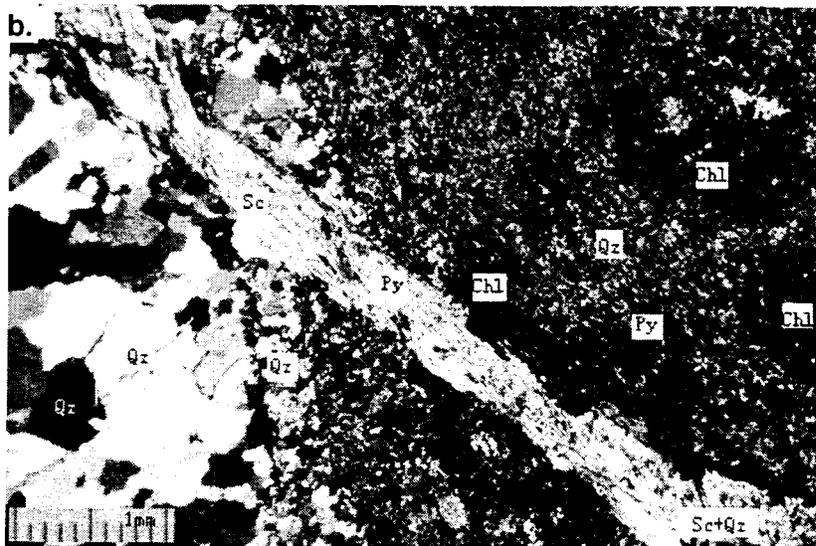
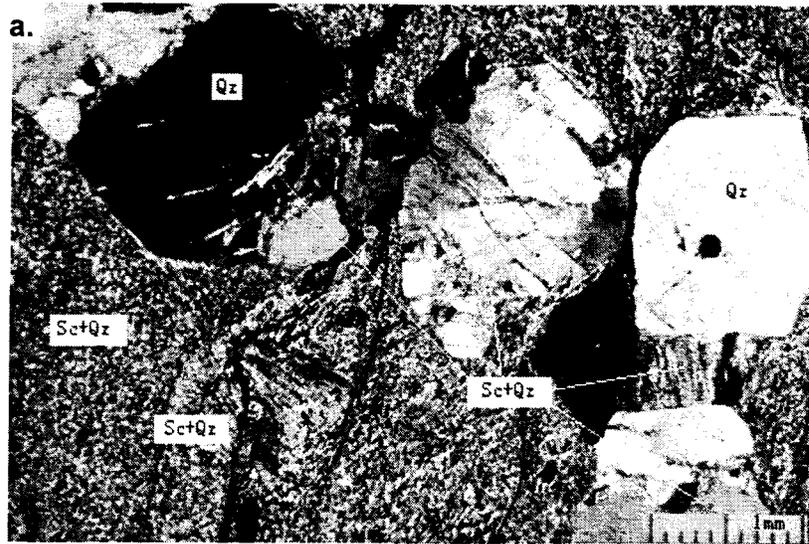


Fig. 3.15. a. Altération phyllique en forme de foliation dans la roche porphyrique minéralisée.
 b. Veinule à séricite+quartz+sulfure.

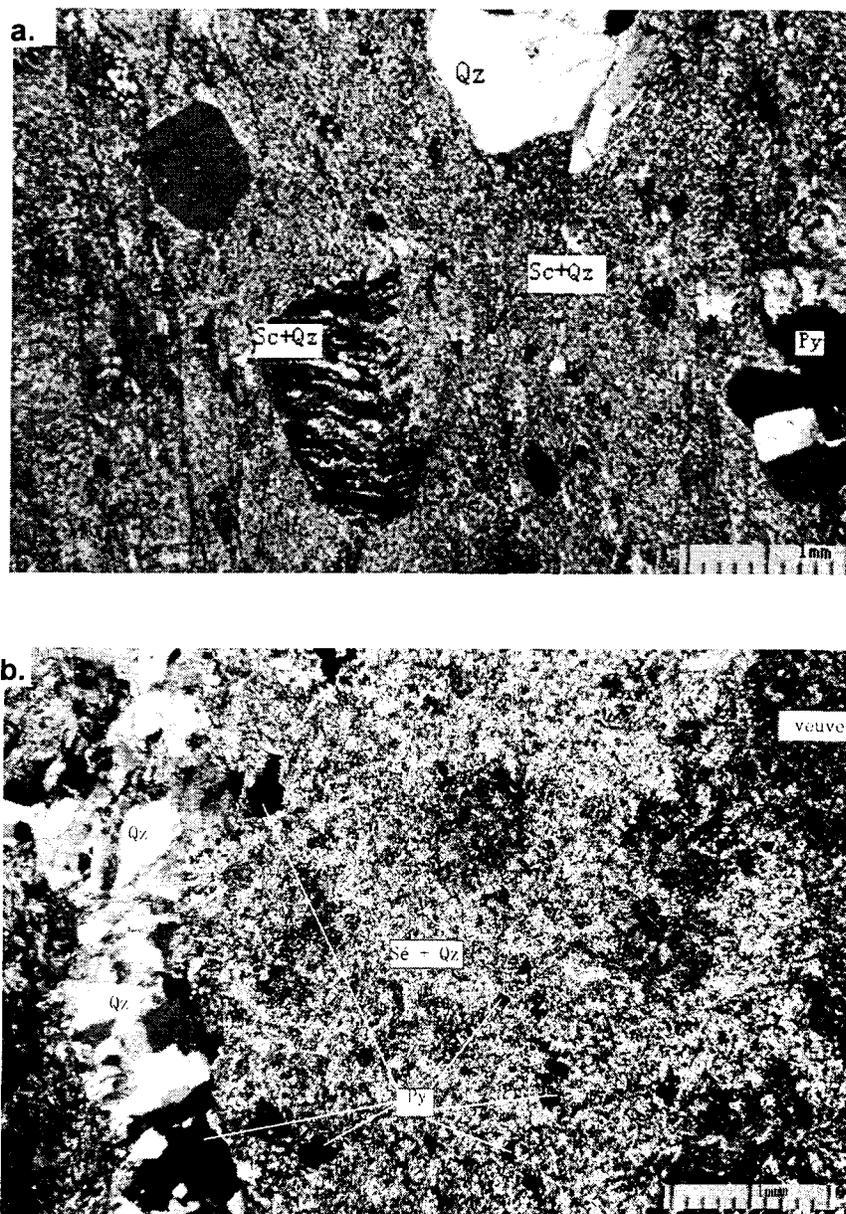


Fig. 3.16. a. Altération phyllique en forme de foliation dans la roche prophyrique minéralisée : agrégat fin de quartz avec séricite et pyrite.
b. Altération phyllique en forme de foliation dans la roche encaissante.



Fig.3.17. a. Deux veinules à biotite-chalcopyrite bordées par une altération phyllique intensive.
b. Minéralisation disséminée dans une zone où l'altération potassique en forme de foliation se superpose à l'altération phyllique intensive.

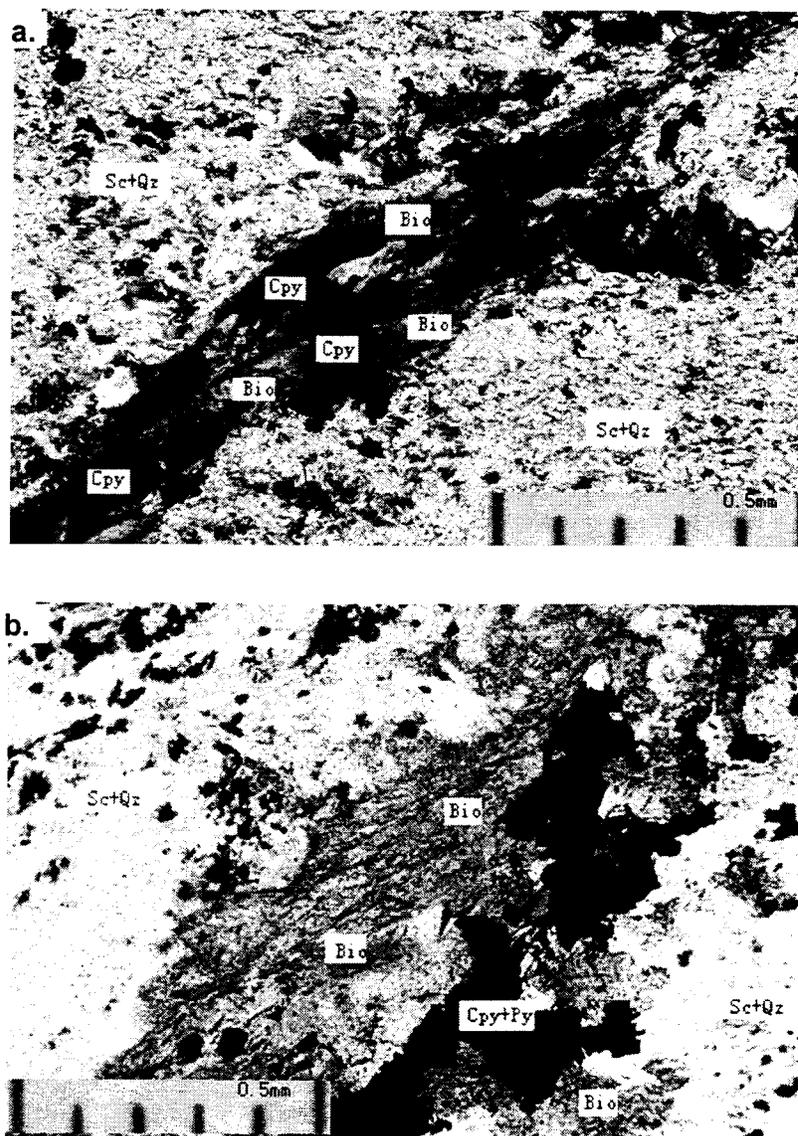


Fig. 3.18. Altération potassique en veinule superposée à l'altération phyllique intensive (a et b) accompagnée d'une forte proportion de sulfures (b).

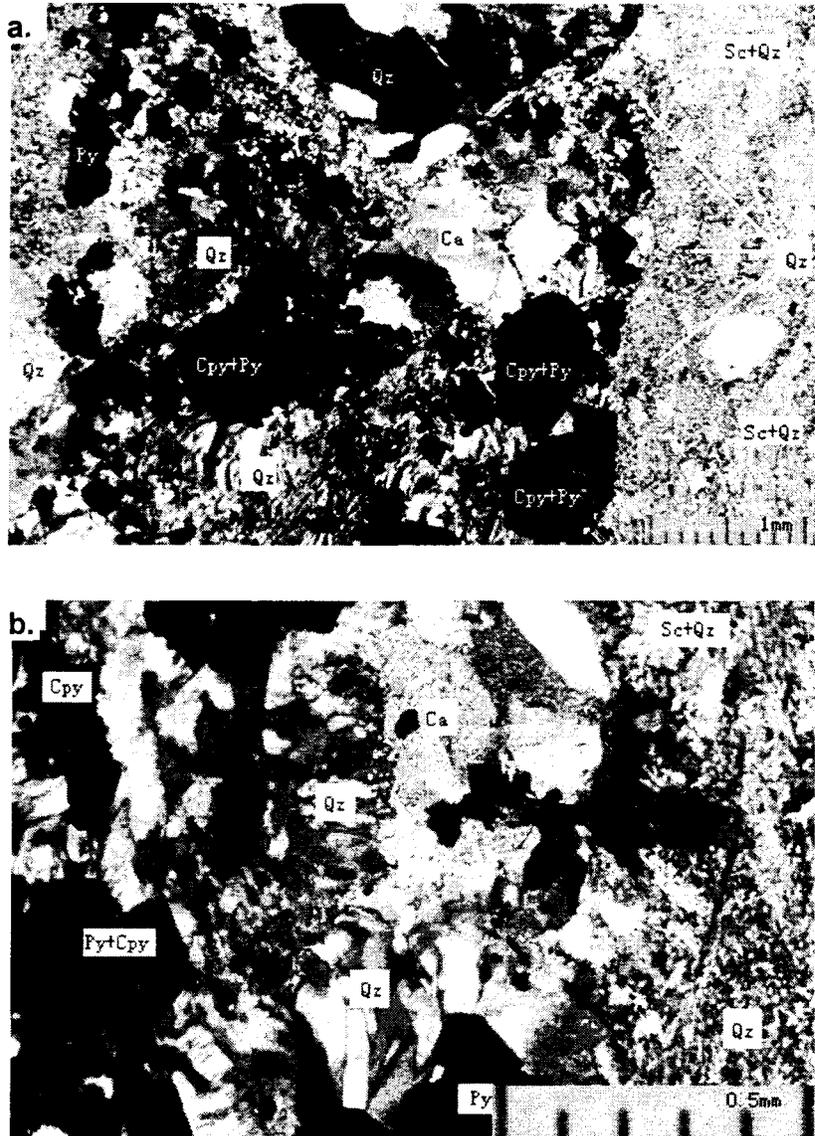


Fig. 3.19. a, b. Silicification intensive en forme de foliation avec veinule à quartz, séricite et sulfures.

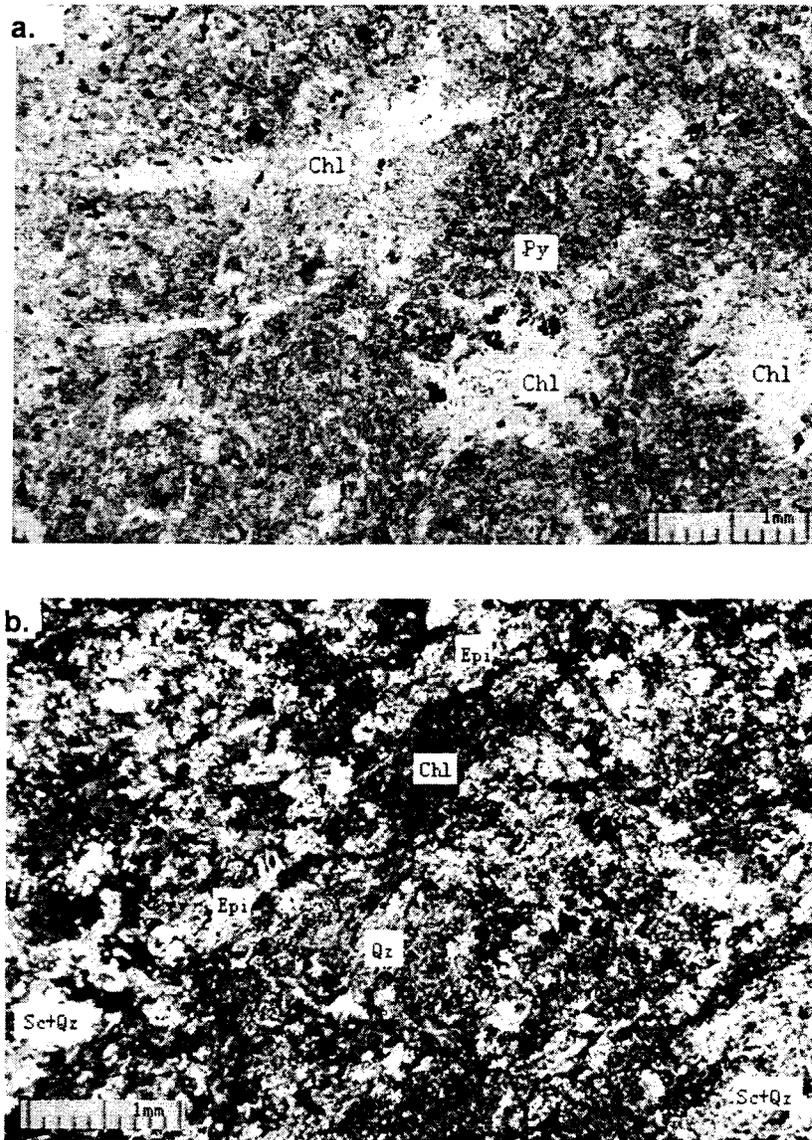


Fig. 3.20. a. Altération argilique en forme de foliation à chlorite et pyrite fine disséminée.

b. Altération propylitique en forme de foliation à chlorite + quartz + épidote + carbonates.

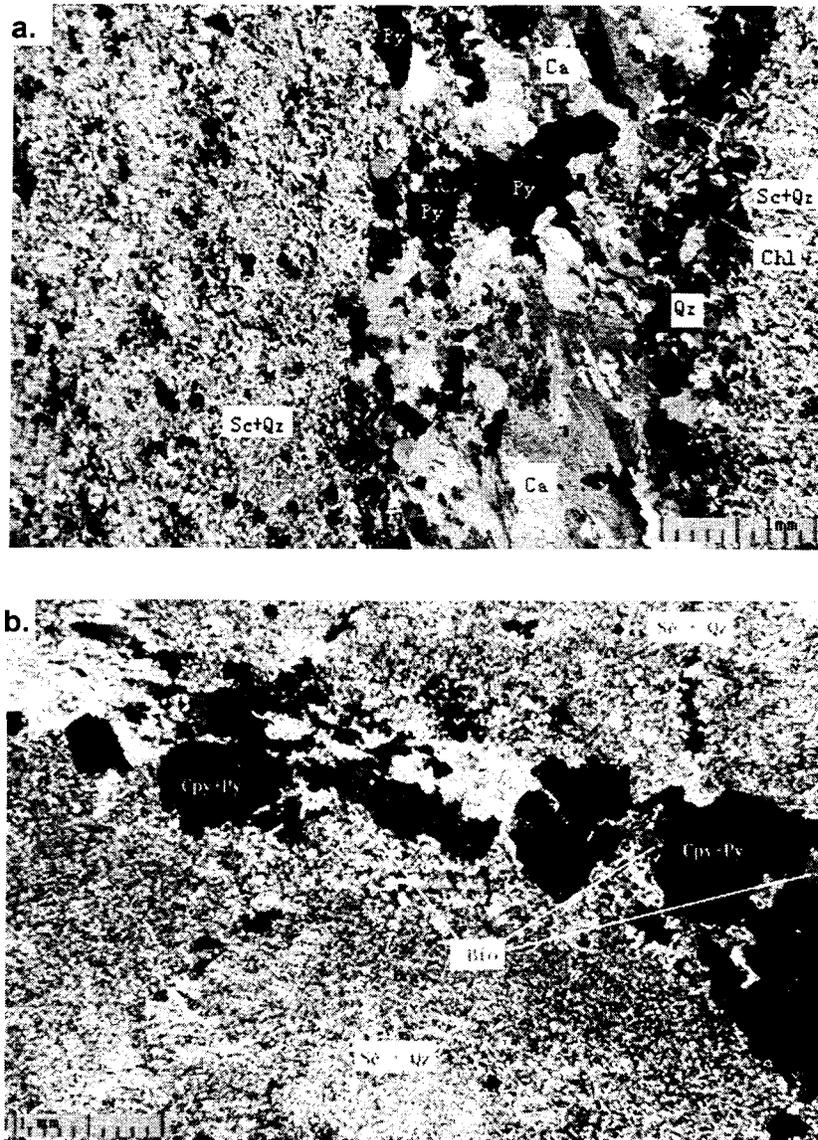


Fig. 3.21. a. Veinule de carbonate (-quartz-pyrite) dépourvue de minéralisation
b. Altération potassique superposée à une silicification intensive associée à des sulfures

CHAPITRE IV

DISCUSSION

4.1. Caractéristiques de la minéralisation et de l'altération du gisement de Yandong

Selon les observations, on peut résumer les caractéristiques de la minéralisation du gisement de Yandong ci-dessous: 1) ce gisement est presque entièrement un gisement de sulfures dont presque tout le cuivre se retrouve sous forme de chalcopryrite, la pyrite était l'autre sulfures principal ; 2) le gisement comprend deux types de minéralisations importants : un type sous forme de sulfures disséminés dans les roches altérées et l'autre type sous forme de veinules riches en sulfures ; 3) la chalcopryrite s'observe dans les veinules, notamment les veinules quartz-séricite-sulfures (Fig.3.9.a, Fig.3.11.a), biotite-quartz-sulfures (Fig. 3.9.b, Fig. 3.11.b); 4) la chalcopryrite apparaît entre les grains de pyrite (Fig.3.12.a), autour de la pyrite (Fig. 3.12.b, Fig. 3.13.a), ou dans les microfractures de la pyrite (Fig. 3.12.b); 5) ce pendant, lorsque la chalcopryrite apparaît abondamment, la pyrite devient rare ou absente (Fig.3.11.a et b.); 6) la minéralisation s'est développée dans les roches encaissantes plus que dans la roche porphrique, mais la roche porphyrique est presque completement minéralisée.

L'altération se développe généralement sur une grande distance dans ce gisement et est en rapport étroit avec la minéralisation. Les types d'altération se sont développés du cœur du minerai vers l'extérieur avec la succession biotisation (potassique), l'altération phyllique, la silicification, l'altération argilique et l'altération propylitique suivant une certaine zonalité spatiale.

Les minéraux d'altération sont principalement la biotite, la séricite, le quartz, la chlorite, l'épidote, la calcite et la pyrite. Les assemblages de minéraux d'altération et la zonalité d'altération constituent des caractéristiques typiques des gisements de type porphyre cuprifère.

Le tableau 4.1 montre les assemblages des minéraux d'altération et les liens paragenétiques entre les minéraux d'altération, la minéralisation et les zones d'altération.

Par comparaison avec le dépôt San Manuel-Kalamazoo (Guibert et Park, 1986), qui est un gisement de porphyre cuprifère typique, l'altération du gisement Yandong montre des différences : 1) dans la zone potassique, la biotite est le minéral d'altération reconnu, le feldspath-K n'est pas observé ; 2) la zone argilique est moins développée; 3) la zone potassique est plus large et une partie de celle entre dans la zone phyllique; 4) la silicification s'est développée localement de façon intensive.

4.2 Relations entre l'altération et la minéralisation dans le gisement Yandong

À travers le tableau 4.1 et en tenant compte des observations mentionnées, on peut dire sans se tromper que les fortes minéralisations dans le gisement de Yandong sont à rechercher dans les zones où se superposent l'altération phyllique, l'altération potassique et la silicification. L'altération phyllique seule, lorsqu'elle est intensive peut renfermer de la minéralisation.

L'altération et la minéralisation dans de nombreux systèmes de porphyre cuprifère résultent de processus mécaniques et hydrothermaux complexes.

L'altération dans les gisements de porphyre cuprifère implique une évolution de la chimie des fluides dans le temps et l'espace.

La nature des différents types d'altération dans les systèmes de porphyre cuprifère permet de comprendre l'évolution de l'altération et de la minéralisation et de faire les interprétations en rapport avec le contexte.

Les caractéristiques minéralogiques des roches indique que ces systèmes ont subi plusieurs épisodes de fracturation et d'altération et que les conditions physiques et chimiques de l'environnement de dépôt des minéraux d'altération ont changé au cours des temps géologiques. Ces minéraux d'altération peuvent être synchrones du développement de l'altération propylitique (épidote, chlorite, calcite) en bordure du système.

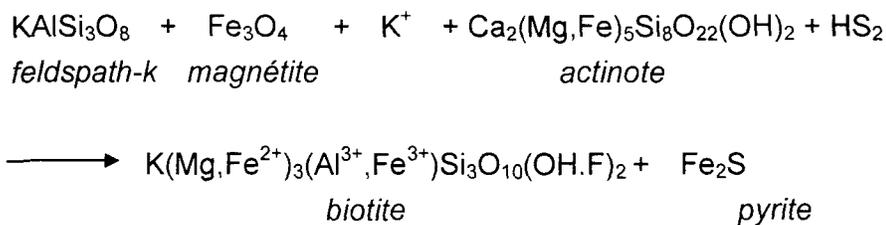
L'altération propylitique peut se poursuivre vers l'intérieur avec le temps mais dans ce cas, apparaissent des assemblages d'argile et le développement

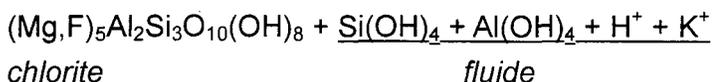
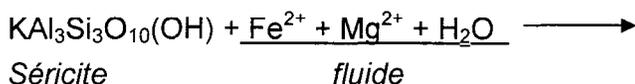
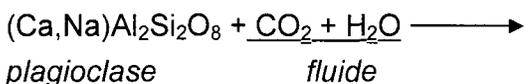
d'assemblages phylliques (séricite, quartz, pyrite).

L'évolution spatio-temporelle se traduit par des assemblages stables pouvant être présents dans différents gisements, dans différentes parties du même gisement, ou dans des roches de compositions différentes dans le même gisement. En conséquence, la définition des zones discrètes d'altération des systèmes de porphyre cuprifère, caractérisées par les assemblages spécifiques simples d'altération, n'est pas toujours possible à moins que la paragenèse soit également considérée. La composition chimique et minéralogique des roches hôtes exerce un contrôle important sur les minéraux d'altération produits suite aux changements des conditions thermo-chimiques.

D'après les études de Gilbert et Park (1986), les processus d'altération peuvent être récapitulés par les équations suivantes :

Altération potassique (biotisation) :



Altération phyllique :**Altération argilique :****Altération propylitique :**

Des études isotopiques et d'inclusions fluides sur les gisements de porphyre cuprifère ont montré que l'altération potassique de haute température (>450° C) est causée exclusivement par les fluides hydrothermaux d'origine magmatique (Dilles et al., 1992). Les fluides à salinités élevées et de haute température sont responsables de l'altération potassique (Gustafson et al., 1975).

Selon Harris et Golding (2002), l'altération phyllique pour les gisements de

porphyre cuprifère est associée à des fluides magmatiques salés de haute température (600-550 °C). Cette hypothèse contredit les modèles génétiques usuels selon lesquels l'altération phyllique résulterait du mélange entre fluides météoriques et fluides magmatiques.

Par ailleurs, les gisements de porphyre cuprifère sont généralement décrits comme disséminés compte tenu de la nature de la distribution des métaux. Une telle description et ses implications, sont réelles seulement si on considère les gisements dans leur ensemble. La minéralisation est désignée par le terme de "disséminée" parce que les grands volumes de roche contiennent, des valeurs relativement uniformément distribuées de métal. En effet, la minéralisation disséminée accompagne l'altération qui longe les épontes des veines suivie du dépôt de sulfures dans les veines ou dans leurs halos d'altération (Parsons, 1957). Cet aspect de la minéralisation des porphyres cuprifères a été longtemps reconnu, mais sa caractérisation nécessite une emphase sur la compréhension du processus de la minéralisation. De faibles minéralisations disséminées se produisent dans la plupart des dépôts et sont caractérisées le plus souvent par des grains de sulfures associés principalement à des minéraux mafiques. Une excellente description de cette observation a été présentée par Anderson et *al.* (1955) dans leurs études à Bagdad au cours de laquelle il a été noté que le dépôt des cristaux automorphes de sulfures isolés fut contrôlé par les fractures qui ont été colmatées suite aux processus d'altération avec la cristallisation du quartz et de l'orthose.

Les équations chimiques et les conclusions mentionnés ci-dessus peuvent représenter les processus d'évolution du fluide entre le toit du porphyre et les roches encaissantes dans le gisement de Yandong.

Le gisement Yandong a développé une altération large et intensive. Ici, l'altération est une réaction chimique entre le fluide et les roches encaissantes. Au cours de l'intrusion de magma granitique, l'eau (H_2O) du magma tend à se concentrer vers la haut. À ce moment, la température intérieure est plus élevée alors que la partie extérieure est déjà refroidie et solidifiée. Le processus de cristallisation continue et la libération de fluide associée à cette cristallisation peut générer une grande énergie qui peut alors provoquer de nombreuses fracturations dans l'encaissant sur plus de 0.5 à 3 km. L'eau météorique va alors occuper les fractures générées et conduire ainsi au refroidissement du système (Fig. 4.2). De telles actions peuvent se répéter quelques fois selon les systèmes de fracturation. Ceci peut alors permettre au fluide minéralisateur et à la chaleur de monter dans le corps minéralisé. Il y a deux types de fluide existants : le fluide magmatique original et le fluide météorique réchauffé à cause de l'intrusion (l'eau de formation ou l'eau souterraine). En période tardive d'évolution, c'est le fluide météorique qui a une influence importante sur les altérations.

La zonalité des altérations du gisement de Yandong s'accorde avec les discussions ci-dessus. Du centre vers l'extérieur, les zones d'altération sont : potassique (biotisation) – phyllique – argilique – propylique. L'assemblage des

minéraux d'altération indique que leur température diminuait progressivement vers l'extérieur et que le fluide météorique s'additionnait de plus en plus.

Les facteurs, qui peuvent conduire la cristallisation des constituants métalliques dans le gisement de porphyre cuprifère, sont principalement : la diminution de température et de pression, l'hydratation et le mélange des fluides (Lu, 1997). Pour le gisement Yandong, à cause l'intrusion d'un porphyre, les roches encaissantes sont fortement fracturées. Il s'ensuit que la conductivité hydraulique augmente, alors que la température et la pression diminuent. À proximité de la zone de contact, la pression du fluide baisse fortement. Aussi, dans cette partie que la séparation du fluide se déroule, c'est la facteur majeur du dépôt des constituants métallogénique du gisement de porphyre cuprifère (Lu, 1997) ; de plus, comme les encaissants sont fortement fracturées, le gradient de température de cette zone est faible, les constituants métallogéniques tendent à se disperser et produire ainsi la minéralisation à base teneur. La principale altération était l'hydrations, le fluide magmatique et le fluide météorique se mélangent, en occasionnant ainsi une diminution de la température et de la pression du fluide magmatique, de la salinité, et une augmentation du pH. Ces processus favorisent la précipitation des matériaux métallogéniques. La figure 4.2 montre le modèle métallogénique du gisement de porphyre cuprifère de Yandong.

4.3. Comparaison entre le gisement Yandong et les autres gisements de porphyre cuprifère

Nous présentons ici une comparaison entre le gisement de Yandong et les autres gisements de porphyre cuprifère du point de vue du contrôle de la minéralisation, de sa distribution et des types d'altération.

4.3.1. Contrôle de la minéralisation

4.3.1.1. Les gisements de porphyre cuprifère dans le monde

Les gisements de porphyre cuprifère sont des dépôts de sulfures de Cu-Mo-Au disséminés dans des veinules associées à des intrusions granitiques calco-alkalines hypergènes. Ce type de gisement est souvent associé aux orogénèses du Phanérozoïque. Les principaux facteurs contrôlant sa mise en place sont les suivants : l'influence du manteau et de la croûte et l'action de l'hydrothermalisme et celle de l'eau météorique en particulier.

Les gisements de porphyre cuprifère se sont formés au cours de deux périodes de l'histoire de la terre : la période des orogénèses convergentes dans la croûte continentale avec la mise en place des granites calco-alkalins tardifs et la période de la croûte continentale néoformée post-orogénique, avec le magmatisme associé. Ils se trouvent principalement dans les bordures continentales actives et dans les arcs insulaires, comme la Rim-particulier Pacifique du Bassin de l'Amérique du Sud (Sillitoe, 1973), les îles Pacifiques du

Sud-Ouest (Branch, 1976), les Philippines (Wolfe, 1973), et les îles Caraïbes et l'Amérique Centrale (Kesler et al. 1977).

Les gisements de porphyre cuprifère sont associés à des granites calco-alcalins et alcalins. Les roches sont de composition assez variée : diorite, plagiogranite, granodiorite, monzogranite et quartzporphyre. Cette variation de composition peut fortement influencer la composition des éléments utiles, surtout la quantité de Cu et Mo.

Les granites sont de type I et sont associées à des volcanites acides à intermédiaires. L'ensemble est marqué par des valeurs de Sr élevées et Y faibles, ce qui traduit la formation des roches par fusion de la plaque océanique (chevauchée) ou de la croûte continentale inférieure (Defant et al. 1990). D'après Thieblemont (1997), sur les 43 gisements de porphyre de Au, Ag, Cu et Mo qu'il a recensés dans le monde, 38 sont associés à ces types des roches. Ces gisements incluent les gisements porphyriques du Chili (Oyarzun, 2001) et ceux des Philippines.

Certaines conditions sont nécessaires pour la formation des gisements de porphyre cuprifère. Les fluides sont piégés dans les corps intrusifs ou à leurs alentours suite à la mise en place de ces derniers. Il est meilleur de n'avoir pas eu de fracturations importantes pendant la période de la mise en place. De plus, les formations lithologiques favorables sont les granites ; viennent ensuite les volcanites, puis les siltstones et les argilites feuilletées.

Par ailleurs, le degré d'altération régionale influence directement la conservation du gisement porphyrique.

4.3.1.2. Le gisement de Yandong

Le gisement de Yandong s'est formé au cours des périodes tardives d'une orogénèse convergente dans un environnement de bordure de plaque continentale active. Ce phénomène est constant dans la plupart des gisements de porphyre cuprifère à l'échelle mondiale.

Dans les porphyres de ce gisement, la quantité de *Sr* est élevée et celle de *Y* est faible. Aussi, sont-ils associés à des volcanites acides à intermédiaires. Ces deux observations montrent que les porphyres et les minéralisations associées résultent de la fusion de la plaque océanique ou de la partie inférieure de la croûte continentale, ce qui est en conformité avec les porphyres cuprifères mondiaux.

Les encaissants de la minéralisation sont des granites carbonifères, des volcanites et des roches détritiques. La granulométrie est fine, la porosité est faible et les fissures sont très peu développées.

Les conditions ci-dessus énumérées sont favorables à la conservation des fluides deutériques, offrant ainsi la possibilité de développement du gisement porphyrique cuprifère.

4.3.2. Distribution de la minéralisation

4.3.2.1. Minéralisation des gisements de porphyre cuprifère

Les systèmes de porphyre cuprifère entourent des intrusions plutoniques à grands volumes ou des intrusions de porphyre complexes. Dans les intrusions et les complexes intrusifs, la minéralisation et l'altération peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres.

Dans les gisements de porphyre cuprifère, la minéralisation est désignée par le terme "disséminée" à cause du fait que de grands volumes rocheux contiennent des valeurs relativement uniformément distribuées de métal. En effet, la minéralisation disséminée est le produit de changements le long des épontes des veines suivis du dépôt de sulfures dans la veine ou dans les halos d'altération de la veine (Parsons, 1957). Cet aspect de la minéralisation des porphyres cuprifères est connu depuis de nombreuses années.

Le gisement de porphyre cuprifère est presque entièrement un gisement hypogène de sulfures avec presque tout le cuivre sous forme de chalcopryrite. La pyrite est l'autre sulfure principal. De faibles quantités de molybdénite, galène et sphalérite sont présentes.

En général, dans la plupart des dépôts de porphyre cuprifère, la minéralisation dans les pipes de brèche est caractérisée par de grandes et irrégulières masses de pyrite et de chalcopryrite associées à des phénocristaux

de quartz, de biotite, et de feldspath potassique. La chalcopyrite est plus abondante dans la brèche.

La chalcopyrite est le minerai Cu-Fe-S hypogène dominant d'intérêt économique pour le porphyre. La bornite est rare et certains dépôts n'en possèdent pas du tout, mais elle est commune dans la plupart des gisements de ce type où elle peut être abondante. La chalcocite hypogène est rare. D'autres sulfosels de Cu-Fe-S, comme la vallerrite et la cubanite, ne sont presque pas observés. Quelques systèmes de porphyre contiennent d'assez importantes d'arsenic, d'antimoine, de tennantite-tetrahedrite et d'énargite. De tels systèmes sont plus communs en Amérique du Sud. Des minerais de ces métaux sont concentrés dans des veines. L'argent et l'or en solution dans plusieurs de ces minerais ont été également extraits. Le molybdène est présent seulement sous la forme de molybdénite.

4.3.2.2. Minéralisation dans le gisement Yandong

La minéralisation apparaît sous forme disséminée et en veinules (Fig.3.6, a. b). Les principaux minéraux utiles observés dans les échantillons sont la chalcopyrite, la pyrite, la molybdénite, et les minéraux des filons majeurs sont le quartz, la séricite, et le feldspath.

Il y a deux types de minéralisations importantes dans le gisement : le type en forme de foliation dans lequel les sulfures sont disséminés dans les roches altérées, et le type stockwork dans lequel les sulfures apparaissent dans les

veinules.

4.3.3. L'altération

4.3.3.1. L'altération dans les systèmes de porphyre cuprifère

Les gisements de porphyre cuprifère sont généralement issus des processus hydrothermaux liés à l'intrusion. Les altérations sont observées dans tous les types de roches. Les phénomènes d'altération sont sous forme de foliations (sélectives, pénétrantes) et sous forme de veines ou veinules. L'ampleur de ces altérations suggère que l'environnement de minéralisation des porphyres cuprifères est marqué par une forte perméabilité des roches hôtes. L'altération sélective est la transformation de un ou deux espèces minérales en d'autres espèces minérales. L'exemple le plus commun dans les systèmes de porphyre est la conversion sélective de la hornblende en la biotite secondaire dans de grands volumes rocheux. Cette biotite peut, alternativement, être transformée en chlorite. L'altération pénétrante d'autre part est la transformation complète d'un type de roche en un autre.

D'après le modèle proposé pour le gisement de San Manuel-Kalamazoo (Fig. 1.1), l'altération se développe dans et autour des intrusions et du gîte de porphyre cuprifère. Quatre types d'altérations sont habituellement observés : potassique, phyllique, argileuse, propylitique. Le modèle de la zonalité ci-dessus présenté se réfère aux gisements classiques. Cependant dans certains gisement particuliers de ce type, les assemblages des minéraux d'altération

présentent différents aspects. Les différents types d'altérations observables dans les porphyres cuprifères sont présentés ci-dessous.

4.3.3.2. Types d'altérations

- Altération sous forme de foliation

Cette altération est à la fois sélective et pénétrante. L'altération pénétrante est le type dominant. Les principaux minéraux d'altération sont : feldspath, quartz, séricite, biotite, etc.

L'altération sélective se produit généralement dans les zones périphériques et centrales des systèmes.

La manifestation la plus fréquente est la transformation de la hornblende ignée ou de la biotite ignée en biotite secondaire. Il est aussi observé des altérations de phénocristaux de feldspath en divers minéraux comme la chlorite, la kaolinite, ou la transformation de l'épidote au cours des phases hydrothermales postérieures, ou alors l'altération de la biotite ou de la hornblende en chlorite.

- Altération à quartz-séricite (-pyrite)

L'altération à quartz-séricite, habituellement accompagnée de la pyrite, est le type le plus répandu et le plus important dans les systèmes porphyriques. L'altération progresse habituellement le long des fractures étroitement espacées

qui se développent vers la fin de l'histoire de refroidissement du système.

- Altération à biotite

Beaucoup de systèmes de porphyre semblent se produire dans une large auréole marquée par la présence de la biotite secondaire. Il est important de souligner encore la fréquence de l'altération de la biotite sur laquelle cette interprétation est basée.

Carson et Jambor (1974) ont noté le caractère et la distribution d'altération sélective à biotite en ce qui concerne certains gisements de porphyre cuprifère renfermant le feldspath et la biotite. Aux Etats-Unis, ce type d'altération est observé à Bingham (Peters et al., 1966; Moore, 1978), à Noël (Koski et al, 1982), à Bell argentée (Graybeal, 1982) et à Butte (Roberts, 1973).

- Altération à chlorite

L'altération à chlorite peut parfois être accompagnée du développement de phases additionnelles, incluant les argiles, les carbonates, les zéolites et les épidotes.

- Altération dans les veinules

Souvent, dans les gisements de porphyre cuprifère, les altérations sous forme de veinules se présentent généralement de la façon suivante : veinules stérile de quartz ; veinules à quartz-sulfures ; veinules à sulfures, biotite,

quartz et magnétite ; veinules à orthoclase, quartz, séricite et sulfures ; veinules à quartz, séricite et pyrite ; veinules à quartz, pyrite et alunite ; veinules à séricite, carbonate et sulfure ; et enfin veinules à chlorite, épidote, montmorillonite et carbonates.

- Altération potassique et silicification

Les veines à altération siliceuse et potassique, qui renferment les minéralisations de cuivre et molybdène, contiennent généralement les minéraux d'altération suivants : biotite, orthose, quartz et séricite. L'appellation "altération potassique" résulte de la présence de la biotite dans quelques veines, l'orthose dans d'autres et la stabilité de la biotite dans la roche.

Dans la zone des veines d'altération potassique, la composition des roches encaissantes exerce une forte influence sur la nature des assemblages minéralogiques d'altération.

- Altération argilique

L'altération argilique des systèmes de porphyre cuprifère est tardive, supergène et est le résultat d'une attaque sélective sur les feldspaths et la séricite.

L'altération argilique intermédiaire (Meyer et Hemley 1967) est caractérisée par le smectite et la kaolinite remplaçant généralement le plagioclase et donnant une roche altérée appauvrie en Ca et Na. Un exemple classique de ce type

d'altération est observé dans les halos d'altération des veines majeures à Butte et au Montana (Meyer et al. 1968) où l'altération argilique intermédiaire est observée à travers toute la veine et les zones propylitique et à séricite observées à l'extérieur. Cette même disposition zonale de l'altération a été reconnue à Summitville (Stoffregen, 1987). Ce type d'altération est variablement développé dans les zones en dehors de la zone d'altération séricitique dans les gisements de porphyre cuprifère (Lowell et Guilbert, 1970).

- Altération propylitique

Dans les roches volcaniques et plutoniques, l'altération propylitique à faible rapport eau/roche produit un assemblage qui inclut l'albite, la chlorite, et l'épidote (et la clinozoïsite et le zoïsite). A l'échelle du système porphyrique, les smectites et les zéolites se produisent dans la partie supérieure et l'altération évolue dans les parties périphériques à basse température en chlorite, albite, épidote. L'actinolite et la biotite se développent à plus grande profondeur et à haute température (Kristmannsdottir, 1982).

4.3.3.3. L'altération dans le gisements de Yandong

Dans le gisement de Yandong, les altérations sont plus intenses et plus larges. Elles se manifestent par une zonalité évidente autour du corps minéralisé considérée comme la zone d'altération "centrale". Du centre vers l'extérieur, se succèdent dans l'ordre la zone à quartz, la zone à biotite, la zone à quartz-séricite, la zone à chlorite et la zone propylitique. La silicification, la

biotisation, l'altération phyllique et la chloritisation sont étroitement liées à la minéralisation. Lorsque qu'il y a superposition de l'altération à biotite à la silicification ou à l'altération phyllique, le degré d'enrichissement en cuivre augmente sensiblement.

L'altération phyllique est le type d'altération le plus répandu dans ce gisement. Elle est marquée essentiellement par l'assemblage minéralogique: séricite + quartz + pyrite. L'altération potassique se manifeste par l'apparition de biotite et la disparition des feldspaths potassiques. L'apparition de la biotite s'accompagne souvent d'une abondance de chalcopryrite et une intensification de la minéralisation. Ce dernier type d'altération est superposé par l'altération phyllique. L'assemblage minéralogique est marqué par l'association biotite + quartz + pyrite.

Dans ce gisement, la silicification se développe localement et se superpose aux zones affectées par la biotisation ou par l'altération phyllique. La silicification intense est étroitement associée à la minéralisation.

L'altération argilique est caractérisée par l'apparition de chlorite en plus du quartz et de la pyrite ; la pyrite est fine et dispersée, la chalcopryrite est rarement observée et parfois il est observé des veinules à chlorite.

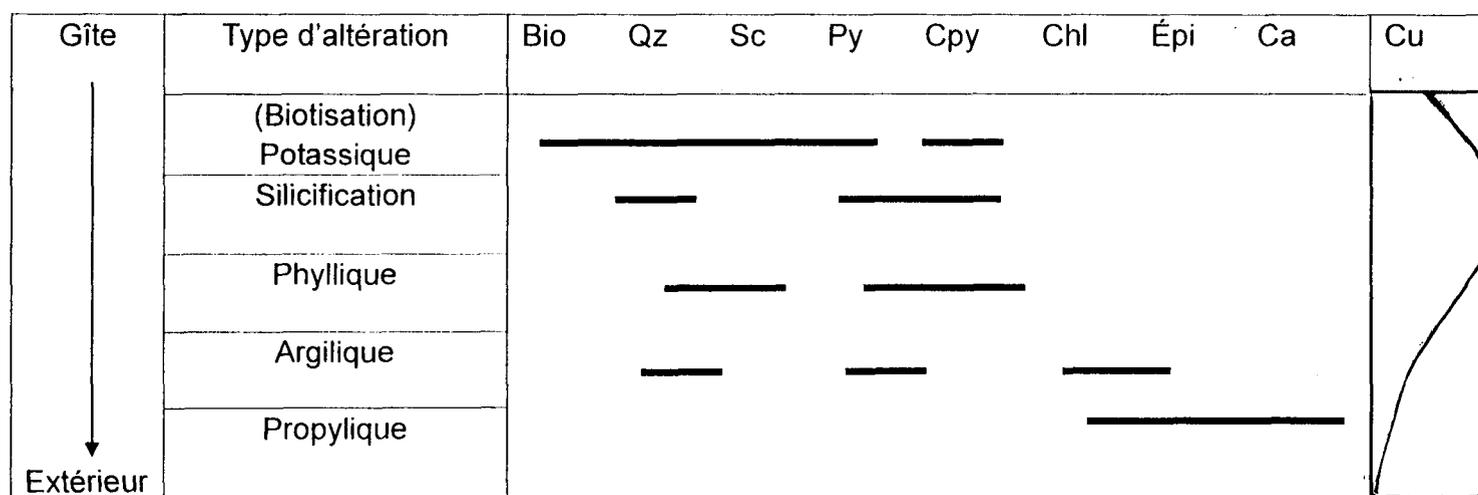
L'altération propylitique apparaît plus loin du corps minéralisé et se caractérise par l'apparition simultanée de la chlorite et des carbonates, ainsi que de faibles quantités d'épidote. Localement, les carbonates peuvent être très

abondants.

4.3.3.4. Résumé

Le résumé de la comparaison de l'altération entre le gisement Yandong et d'autres gisements porphyriques cuprifères mondiaux est fourni par le tableau 4.2. Le gisement Yandong présente des caractéristiques évidentes de porphyres cuprifères. En effet, comme le gisement modèle de San Manuel-Kalamazoo (Guibert et Park, 1986), l'altération du gisement Yandong montre aussi une zonalité évidente. Ici nous avons également les types d'altérations potassique, phyllique, argilique, et propylitique. La différence se situe au niveau de l'assemblage observé dans chaque type d'altération (Tabl. 4.2).

Fig. 4.1. Relations entre minéraux d'altération, de minéralisation et des altérations dans le gisement de Yandong



Bi: biotite
Qz: quartz

Sc: séricite
Py: pyrite

Cpy: chalcopyrite
Chl: chlorite

Épi: épidote
Car: carbonates

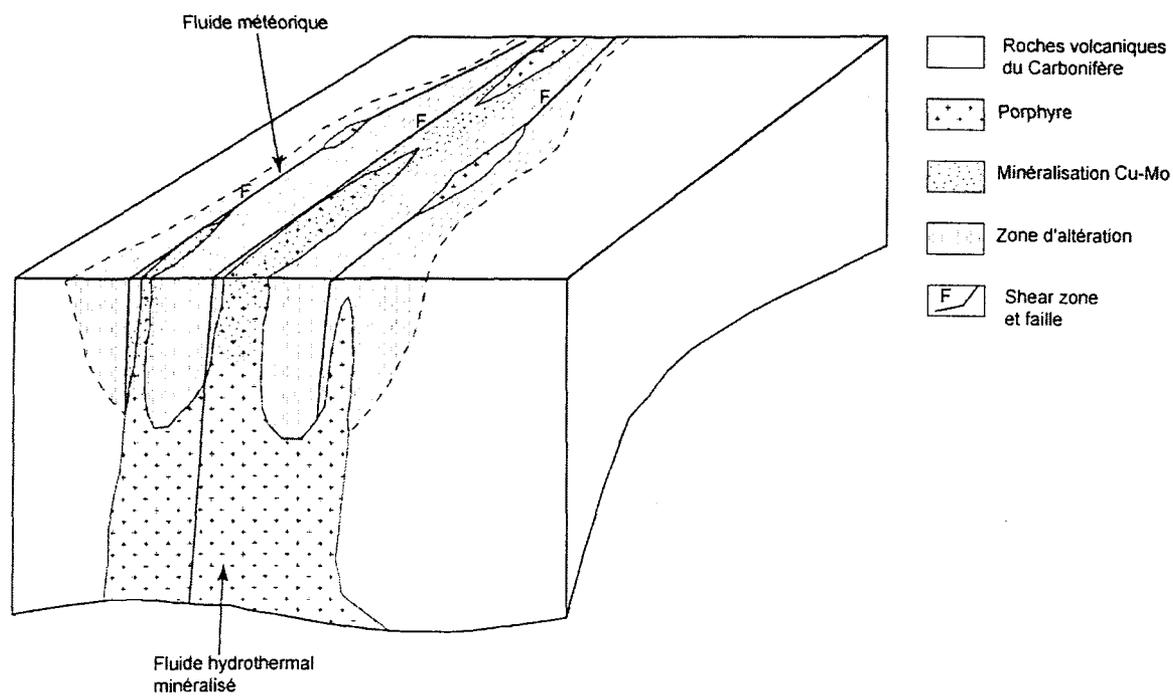


Fig. 4.2. Modèle en trois dimensions du gisement de porphyre cuprifère Yandong

CHAPITRE V

CONCLUSION

1. En comparaison avec des gisements porphyriques cuprifères connus à l'échelle mondiale, le gisement de Yandong présente des conditions de minéralisation similaire du point de vue de l'évolution crustale, de l'environnement tectonique, des roches ignées et encaissantes impliquées dans la minéralisation et enfin du point de vue du degré d'altération.

2. Selon en tenant compte de l'intrusion porphyrique de Yandong, le gisement de Yandong peut être rattaché au type classique des gisements de porphyre cuprifère. Les autres caractéristiques du gisement confirment aussi cette observation.

3. Dans le gisement de Yandong, la minéralisation de cuivre est à teneur basse mais à grosses réserves et l'altération occupe de grandes surfaces.

4. Le gisement de Yandong présente plusieurs types d'altération typiques des

porphyres cuprifères en général (potassique, phyllique, silicification, argilique et propylitique), mais les assemblages des minéraux d'altération présentent des particularités. Notamment, l'altération potassique à biotite est dominante sur celle à feldspath-k qui est plutôt rare, la silicification est fortement exprimée et la chlorite représente le principal minéral d'altération argilique.

5. La minéralisation a une liaison très étroite avec l'altération, surtout la silicification, la biotisation, l'altération phyllique ainsi que la chloritisation. Lorsque se superposent l'altération à biotite, la silicification et l'altération phyllique, le degré d'enrichissement en cuivre est plus élevé. Ces caractéristiques sont différentes du modèle proposé pour le gisement de San Manuel-Kalamazoo dans lequel les zones minéralisées majeures apparaissent dans les zones extérieures de la zone potassique et proches de l'intérieur de la zone phyllique. De plus, la zone à quartz est sans minéralisation.

6. En résumé des observations ci-dessus, le modèle métallogénique du gisement de porphyre cuprifère de Yandong se présente comme suit : le gisement s'est mis en place dans la zone orogénique Jueluotage au Paléozoïque supérieur et la minéralisation est liée à la mise en place des roches calco-alcalines

volcaniques-hypogènes de la période de raccourcissement au début du Carbonifère supérieur. Les roches porteuses de la minéralisation sont les porphyres plagiogranitiques et leurs encaissants (les roches volcaniques basaltiques et volcanoclastiques). La mise en place de l'intrusion et de la minéralisation fut contrôlée par des structures linéaires ayant favorisé la disposition du corps minéralisé sous forme d'une plaque épaisse.

7. Le gisement de Yandong est un des trois gisements de la mine de Tuo-Yandong. Pour les deux autres, les conditions de minéralisation, les roches porphyriques et encaissantes, les volumes sont semblables à ceux du gisement de Yandong. De plus, dans cette région, des gisements et des points minéralisés de cuivre sont découverts, comme les gisements de Chihu, de Weiquan, etc, les roches granitiques de la région de Tuo, de la région de Chihu à l'Est, ainsi que toute la zone nord de Jueluotage. Les compositions et les variations ne présentent pas de différences fondamentales. Ces observations montrent que le contexte et le potentiel métallogénique de toute la zone nord Jueluotage présentent une certaine uniformité. Ici, il existe non seulement des conditions de minéralisation avantageuses mais aussi des conditions de conservation également avantageuses.

Cette étude montre donc la nécessité d'approfondir l'exploration dans la région.

Tabl. 4.1. Comparaison de l'altération entre le gisement Yandong et d'autres gisements dans le monde

	Gisement Yandong	Modèle (gisement de SanManuel-Kalamazo o(Guibert, et Park 1986)	Creasey (1959,1966)	Lowell and Guibert (1970)	Rose (1970)	Meyer and Hemley (1967)
potassique	biotite	quartz, k-feldspar biotite, ou plus séricite anhydrite	k-silicate k-feldspar biotite muscovite	k-feldspar biotite, séricite chorite, quartz	orthoclase - sericite - quartz orthoclase - biotite - quartz orthoclase - séricite - biotite - quartz	k-silicate k-feldspath, biotite muscovite, anhydrite
phyllique	quartz séricite pyrite	quartz, séricite, pyrite	séricite, quartz, pyrite	quartz, séricite, pyrite, hydro-mica chlorite	Séricite, quartz	séricitic serucute, quartz pyrite, chlorite
argilique	chlorite	quartz, kaolinite, chlorite	kaolinite muscovite	kaolinite moontmorillonite chlorite	Séricite, kaolinite, quartz	1) kaolinite, dickite, pyrophyllite 2) kaolinite, montmorillonite, chlorite
propylitique	chlorite, carbonate, épidote	chorite, épidote carbonate, adularia, albite	muscovite épidote chlorite carbonate	chlorite épidote	épidote, albite, calcite, chorite	épidote, albite chlorite septachlorite carbonate

RÉFÉRENCES

- Anderson, C.A. Scholz, E.A, Strobell,J.J.Jr.,1955, Geology and ore deposits of the Bagdad area, Yavapai County, Arizona, U.S.A. Geol. Survey Prof. Paper, p. 278,103
- Branch, C.D.1976, Development of porphyry copper and stratiform volcanogenic ore bodies during the life cycle of andesitic stratovolcanoes: in Johnson,P.W. ed Volcanism in Australasia: New York, London, Amsterdam, p.337-342.
- Brimhall,G.H.,1980. Early fracture-controlled disseminated mineralization at Butte, Montana: Econ.Geol.,v.72, p37-59.
- Brown S.A. 1969. Mineralization in British Columbia and The Copper and Molybdenum deposits. CIM Bulletin, Vol. 62, No.681, p.26-40.
- Brown S.A., 1976. Morphology and Classification. Porphyry Deposits of the Canadian Cordilera. CIM Bulletin, Special Vol. 15, No. p.44-51.
- Brown S.A., Cathro R.J, Panteleyev A. and C.S.Ney. 1971. Metallogeny of the Canadian Cordilera, CIM Bulletin, Vol. 64, No. 709, p.37-61.
- Carson, D.J.T.,and Jambor, J.L,1974, Mineralogy, zonal relationships and economic significance of hydrothermal alteration at porphyry copper deposits. Babine Lake area, British Columbia: IM Bull.,v.67,no.742, p.1-24.
- Cheney E.S. 1975. Batholithic Ore deposits. Geol. Soc. America. Ann. Meeting, Salt Lake City. Abst. p. 1025.
- Defant M J, Kepezhinskias P., 2001, Evidence suggests slab melting in arc magmas.

EOS, v. 82, p.62-69.

Dilles J.H., Solomon G.C., Taylor H.P., Jr., Einaudi M.T., 1992, Oxygen and hydrogen isotope characteristic of hydrothermal alteration at the Ann-Mason porphyry copper deposit, Yerington, Nevada, *Economic Geology*, v. 70, p. 857-912.

Graybeal, F.T., 1982, Geology of the El Tiro area, Silver Bell mining district, Pima County, Arizona: in Titley, S.R. ed., *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*: Tucson, Univ. Ariz. Press, Chapter 24.

Guilbert J.M. and Park C.F. 1986. *The geology of Ore deposits*. W.H. Freeman and Company. New York. p. 405-419.

Gustafson L.B., Hunt J.P., 1975, The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile: *Economic Geology*, v. 87, p. 857-912.

Harris A.C., Golding S.D., 2002, New evidence of magmatic-fluid-related phyllic alteration: implication for the genesis of porphyry Cu deposits, *Geology*, v.30, p.335-338.

He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, Tang Yanling and Zhou Ruhong, 1994, *Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China*. Wulumuqi: Xinjiang People's Publishing House, Hongkong: Educational and Cultural Press Ltd., 1994:177-208 (en chinois avec le résumé en anglais).

Kesler, S.E., Sutter J.F., Issigonis M.J., Jones L.M., Walker R.L., 1977, Evolution of porphyry copper mineralization in an oceanic island arc: Panama: *Econ. Geol.*, v. 72, p.1142-1153.

Koski, R. A., Cook, D.S., 1982, Geology of the Christmas porphyry copper deposit,

- Gila County, Arizona: in Titley, S.R. ed., *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*: Tucson, Univ. Ariz. Press, Chapter 17.
- Kristmannsdottir, H. (1982) Alteration in the Irrdp drill hole compared with other drillholes in Iceland: *J. Geophys. Res.* 87, p.6525-6531.
- Liu D.Q., Chen Y.C., Wang D.H. Tang Y.L., Zhou R.H., Wang J.L., Li H.Q., Chen F.W., 2003, Discussion on the problems related to mineralization in the Tuwu-Yandong Cu-Mo Orefield in Hami, Xinjiang. *Mineral Geology*, v. 22(4), p. 334-344 (en chinois).
- Lowell J.D. and Guilbert J.M. 1970. Lateral and Vertical Alteration – Mineral Zoning in Porphyry Ore Deposits, *Econ. Geol.* Vol.65, p.378-408.
- Lu, H.Z. 1997. The metallogenic fluid. The publishing house science and technology of Beijing (en chinois avec le résumé en anglais). p. 183-188.
- McMillan W.J. Panteleyev A. 1985. Porphyry Copper Deposits. *Geosciences Canada Reprint Series 3*: p.45-58.
- Meyer, C., Hemley, J.J., 1967, Wall rock alteration, in Barnes, *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, Holt, Rinehart, and Winston, p.166-232.
- Meyer C., Shea E.P., Goddard C.C., 1968, Ore deposits at Butte, Montana: in Ridge, J.D., ed., *Ore Deposits of the United States, 1933-1967 (Graton_Sales Volume)*: New York, AIME., P. 1375-1416.
- Moore, W. J., 1978, Chemical characteristics of hydrothermal alteration at Bingham, Utah: *Econ. Geol.*, v.73, p. 1260-1269.

- Nicola P. 1991. Gîtologie et exploration minière. Tec. et Doc.-Lavoisier. P. 211-214.
- Oyarzun R, Mfirquez A, Lillo J, et al., 2001, Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineral Deposit*, v. 36, p.794~798.
- Parsons, A.B., 1957, *The Porphyry Copper in 1956*: New York.,AIME, p.270.
- Peters W.C., James A.H., Field, C.W., 1966, Geology of the Bingham Canyon porphyry copper deposit, Utah: in Titley, S.R., and Hicks, C. L., eds., *Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*: Tuson, Univ. Ariz. Press, p. 165-175.
- Promière Équipe Géologique du Xinjiang. 2001. Carte géologique de 1/50,000 de la région de Hami. Bureau of Geology and Resource Mineral du Xinjiang.
- Roberts, S.A., 1973, Pervasive early alteration in the Butte district, Montana: Soc. Econ. Geol. Guidebook, Butte Field Mtg., Butte, Montana, Anaconda Co., p. HH1-HH8.
- Rui Zongyao, Wang Futong, Li Henghai et al., 2001, Advance of the porphyry copper belt of the East Tianshan mountains, Xinjiang. *Chinese Geology*, v.28(2), p.11-16(en chinois).
- Sillitoe, H., 1973, The tops and bottoms of porphyry copper deposits: *Econ. Zgeol.*, v.68, p.799-815.
- Sillito, R.H., 1993, Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications, in Kirkham, R.V., Sinclair, W.d., Thorpe, R.I. , and Duke , J.M., eds., *Mineral deposit modeling*: Geological Association of Canada, Special Paper 40, p.465-478.

- Sillitoe, 1996, Granites and metal deposits: Episodes, v.19, p.126-133.
- Stoffregen, R., 1987, Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag Mineralization at Summitville, Colorado: Econ. Geol. v.82, p.1575- 1591.
- Streckeisen A. 1974, To each plutonic rock its proper name. Earth. Sci.Rev.. v.12, p. 1-33.
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J.L., 1997, Epithermal and porphyry deposits: the adakite connection. Cr Acad Sci II A, v.325(2), p.103~109.
- Wang F.T. 2000. Tuo porphyry deposits in Proceedings os fouth Tianshan geology and mineral resource conference. Peoples Publishing House of Xinjiang. p.224-229 (en chinois).
- Wolfe, J.A.1973, Tectonic fingerprint in Philippine porphyry deposits: AIME, Preprint 73-5-37, p. 31.

ANNEXE :

DESCRIPTIONS DES CAROTTES DE FORAGE ET
RESULTATS DES ANALYSES EN CUIVRE

Forage ZK001

No. d'Échanti.	Prof.. (m)	Lam. min.	A.Pét.	A. trac	Cu (%)	Roche	Altération					Miné.
							Phylli	Bio.	Silifi.	Chl.	Prop.	
W-1	81	*				Porp.						
W-2	92	*	*	*	0.07%	Porp.						
W-3	100	*				Porp.						
W-4	102	*				Encai.						
W-5	104,3	*		*	0.3%	Encai.	*	*			V+D	
W-6	107,6	*	*	*		Encai.	*		*			
W-7	111	*			0.11%	Encai.	*	*			V+D	
W-8	116,8	*				Encai.	*					
W-9	119.11											
W-10	121	*				Encai.	*	*				
W-11	125	*	*	*	0.13%	Encai.	*				V+D	
W-12	137.1						*					
W-13	139.7	*				Encai.	*					
W-14	145											
W-15	147,7	*				Encai.	*					
W-16	150	*				Encai.	*					
W-17	176,7	*				Encai.	*					
W-18	168.8	*				Encai.	*	*				
W-19	164,8											
W-20	156.21	*				Encai.	*					
W-21	179	*				Encai.	*					
W-22	185	*				Encai.	*					
W-23	195	*				Encai.	*					
W-24	202,4											
W-25	206,12	*				Porp.	*					
W-26	209,62	*				Porp.	*					

Prof: profondeur
Lam. min.: lame mince
A. Pét.: analyse ptochimique
Porp. : porphyre
Encai. : encaissant
A. Trac. : analyse des éléments trace
Phylli*: alteration phyllique
** : intensive
Bio.: alteration de biotisation
Silifi.: silification
Chl.: argillique
Prop.: propyllique
Miné.: minéralisation
* : intensive
V : veinule
D : disséminé

No. de Échant.	Prof. (m)	Lam. min.	A. Pét.	A. trac	Cu (%)	Roche	Altération					Miné.	Prof: profondeur Lam. min.: lame mince
							Phylli.	Bio.	Silifi.	Chl.	Propy		
W-27	213	*				Porp.	*						
W-28	222	*		*	0.26%	Porp.	*		*			V	A. Pét.: analyse ptochemique
W-29	224.5	*				Porp.	*	*	*			V	Porp.: porphyre
W-30	231,73	*				Porp.	*					D	Encai.:
W-31	238	*				Porp.	**					V	encaissant
W-32	241	*		*	0.26%	Porp.	**					V	A. Trac.: analyse des éléments trace
W-33	244,83					Porp.							
W-34	251,85					Porp.							
W-35	262	*				Porp.	*					D	Phylli*: alteration phyllique
W-36	267,56	*				Porp.	*					V	** : intensive
W-37	275,22												
W-38	281	*	*	*	0.61%	Encai.	**	*	*			V+D,*	Bio.: alteration de biotisation
W-39	286	*				Encai.	**	*	*			D,*	Silifi.: silification
W-40	290	*				Encai.	**	*				D,*	Chl.: argillique
W-41	293.82	*				Encai.	**	*	*			V+D,*	Prop.: propyllique
W-42	301.6	*				Encai.	**	*				D,*	
W-43	316,07			*	0.42%								Miné.:
W-44	326,62												minéralisation
W-45	338,3	*				Encai.	**	*	*			V+D,*	* : intensive
W-46	350.5	*		*		Encai.	**	*	*			V+D	V : veinule
W-47	356,04	*		*	0.13%	Encai.	**	*				D	D : disséminé
W-48	359	*				Encai.	**	*				V+D,*	
W-49	376.24	*	*	*		Encai.	**	*				V,*	
W-50	382,44	*				Encai.	**	*				V,*	
W-51	389,64	*				Encai.	**	*				D,*	
W-52	399,24			*	0.28%								
W-53	399,24	*		*		Encai.	**	*				V,*	
W-54	408,64												
W-55	426,84	*				Encai.	**	*	*			V+D,*	
W-56	429,84	*				Encai.	**	*	*			V+D,*	
W-57	439,94	*				Encai.	**					D	

No. de Échanti.	Prof. (m)	Lam. min.	A. Pét.	A. trac	Cu (%)	Roche	Phylli.	Altération				Miné.	Prof. profondeur Lam. min.: lame mince
								Bio.	Silifi.	Chl.	Propy		
W-58	445	*	*	*		Encai.	**	*				V+D,*	A. Pét.: analyse ptochemique
W-59	448	*				Encai.	**					D,*	Porp. : porphyre
W-60	450,84	*				Encai.	**					V+D,*	Encai. : encaissant
W-61	459,87	*				Encai.	**	*				V+D,*	A. Trac. : analyse des éléments trace
W-62	463	*				Encai.	**					D,*	Phylli*: alteration phyllique
W-63	470												** : intensive
W-64	472,87												Bio.: alteration de biotisation
W-65	482	*				Encai.	**	*				D,*	Silifi.: silification
W-66	495,92												Chl.: argillique
W-67	496,22												Prop.: propyllique
W-68	517,4	*				Encai.	**	*	*			D,*	Miné.: minéralisation
W-69	522	*	*	*	0.55%	Encai.	**	*	*			D,*	* : intensive
W-70	536,52	*				Encai.	**		*			D,*	V : veinule
W-71	546,57												D : disséminé
W-72	561,53	*				Encai.	**					D	
W-73	564,23												
W-74	569,42	*		*	0.49%	Encai.	**	*				D,*	
W-75	574,72	*	*	*		Encai.	**	*				D,*	
W-76	585	*				Encai.	**					D	

No. de Échanti.	Prof.	Lam. min.	A. Pét.	A. trace	Cu (%)	Roche	Altération					Miné
							Phylli.	Bio.	Silifi.	Chl.	Propy.	
WZ-28	-630											Prof: profondeur Lam. min.: lame mince A. Pét.: analyse ptrochemique Porp.: porphyre Encai.: encaissant A. Trac.: analyse des éléments trace Phylli*: alteration phyllique **: intensive Bio.: alteration de biotisation Silifi.: silification Chl.: argillique Prop.: propyllique Miné.: minéralisation *: intentive V : veinule D : disséminé
WZ-29	-650											
WZ-30	-670											
WZ-31, W2-1	-690	*	*	*	0.19%		*		*			
WZ-32, W2-2	-710			*								
WZ-33, W2-3	-730	*	*	*		Encai.	*		*			
WZ-34, W2-4	-750			*								
WZ-35, W2-5	-770	*	*	*	0.1%	Encai.	*		*			
WZ-36, W2-6	-790			*								
WZ-37, W2-7	-810		*	*								
WZ-38, W2-8	-830	*		*		Encai.	*		*			
WZ-39, W2-9	-860	*	*	*	0.1%	Encai.	*		*			

Forage ZK1503

No. de Échanti.	Prof. (m)	Lam. min.	A. Pét.	A. trace	Cu (%)	Roche	Altération					Miné.	Prof: profondeur Lam. min.: lame mince A. Pét.: analyse ptrochimique Porp.: porphyre Encai.: encaissant A. Trac.: analyse des éléments trace Phylli*: alteration phyllique **: intensive Bio.: alteration de biotisation Silifi.: silification Chl.: argillique Prop.: propyllique Miné.: minéralisation *: intensive V : veinule D : disséminé
							Phylli.	Bio.	Silifi.	Chl.	Propy.		
W3-1	30-50	*	*	*	0.2%	Encai.	*		*			V,*	
W3-2	70	*				Encai	*	*				V,*	
W3-3	90	*		*	0.57%	Encai.	*	*				V,*	
W3-4	110												
W3-5	130	*				Encai.	*						
W3-6	150		*	*									
W3-7	170												
W3-8	190	*		*	0.15%		*	*				V	
W3-9	210												
W3-10	230			*									
W3-11	250	*				Encai.				*			
W3-12	270	*	*	*		Encai.	*			*			
W3-13	290												
W3-14	310	*		*		Encai.	*			*			
W3-15	330	*				Encai.	*			*			
W3-16	350	*				Encai.	*			*			
W3-17	370			*									
W3-18	390												
W3-19	410	*	*	*	0.16%	Encai.	*			*			
W3-20	430												
W3-21	450			*									
W3-22	470	*				Encai.				*			
W3-23	500		*	*	0.12%								