



Les shear zones aurifères -
Proposition d'un modèle conceptuel

M. Bonnemaïson
E. Marcoux

Avril 1987
87 DAM 016 DEX

Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Direction des Activités Minières
Département Exploration
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex 2 - France
tél : 38.64.34.34

SOMMAIRE

INTRODUCTION	I
1 Définition des diverses échelles d'observation	2
2 Evolution en trois stades des shear zones aurifères	3
2.1 Stade précoce: formation des sulfures aurifères	3
2.1.1 Première phase : fixation de l'or dans la structure	3
2.1.2 Deuxième phase : concentration de l'or	5
2.1.3 Cas particulier des listvénites	7
2.2 Stade intermédiaire : apparition de l'or minéralogique	10
2.2.1 Mise en place des "structures hôtes"	10
2.2.2 Minéralisation des structures hôtes	11
2.3 Stade tardif : formation d'or pépitique	15
2.3.1 Ouvertures ménagées	15
2.3.2 Ouvertures induisant la mise en place d'un stockwerk	16
2.3.3 Ouvertures importantes de la shear zone	16
3 Signature géochimique des shear zones aurifères	17
4 Diversité des shear zones aurifères	19
5 Maturation des shear zones aurifères	23
CONCLUSION	26

LES SHEAR ZONES AURIFERES

PROPOSITION D'UN MODELE CONCEPTUEL

Résumé

Les études réalisées sur les "filons de quartz aurifères" nous ont permis de développer un nouveau modèle métallogénique qui explique la genèse de ces minéralisations: la shear zone aurifère. Ce modèle est applicable à de nombreux autres types de minéralisations à contrôle tectonique et difficiles à rattacher à un type de gîte clairement défini dans les synthèses typologiques déjà réalisées. Afin d'éviter une classification analogique de ces minéralisations qui nous aurait conduit aux mêmes difficultés, on se propose de définir un modèle conceptuel pour expliquer la formation de ces gîtes et prévoir les contrôles de la minéralisation.

Les shear zones aurifères présentent généralement une genèse polyphasée, dans laquelle on distingue trois stades principaux qui sont caractérisés par l'expression minéralogique de la minéralisation : un stade précoce à "or invisible", un stade intermédiaire à or fin et un stade tardif à or pépitique. Ces différents stades traduisent la **maturation** progressive des shear zones aurifères en relation étroite avec les différents états de contraintes qui la font jouer et rejouer.

Le stade précoce correspond au développement de la shear zone sensu stricto. Insérées dans des couloirs tectoniques d'importance régionale, des zones de déformation ductile affectent les roches sur des puissances hectométriques et des extensions décakilométriques. Il se forme ainsi une structure tectonique, soulignée par des mylonites et des blastomylonites, qui sert de drain aux fluides hydrothermaux d'origine diverse (magmatique, métamorphique,...) mais toujours riches en soufre et en CO₂. Sous l'action combinée de la déformation et des circulations hydrothermales, les roches situées dans cette structure tectonique subissent des transformations minéralogiques qui dépendent étroitement de leur nature initiale. Ces phénomènes se produisent avec une intensité croissant vers le cœur des structures qui est le siège d'une silicification et d'une sulfuration importante.

La première fixation de l'or se produit dans le réseau cristallin de la pyrrhotite qui est vraisemblablement le premier sulfure aurifère. Cette pyrrhotite, qui peut renfermer jusqu'à 30 ppm d'or, est disséminée dans l'ensemble de la structure. Dans le cœur, elle est déstabilisée en pyrite- marcasite et l'or ainsi libéré se concentre dans le réseau de sulfures ferrifères (pyrite, mispickel, berthiérite,...) parfois présents en abondance. Ainsi, au stade précoce de fonctionnement des shear zones l'or, inclus dans le réseau des sulfures, ne trouve pas d'expression minéralogique.

Dans le stade intermédiaire, en régime cassant, compressif ou distensif, le fonctionnement de la shear zone peut créer des ouvertures qui autorisent la mise en place de dykes de composition variée (leucogranites, diorites..., généralement porphyriques), ou de filons de quartz blanc laiteux formés par sécrétion latérale. Lorsque ces différents corps filoniens sont rebroyés à leur tour par la poursuite de l'activité tectonique de la shear zone "précoce", se développent par cataclase des faciès pièges, tel le quartz microscaccharoïde, qui servent de "réservoir" à la minéralisation aurifère; les classiques "filons de quartz aurifères" ne sont qu'un cas particulier de ce stade caractérisé par l'apparition de l'or minéralogique. Celui-ci, libéré par la déstabilisation des sulfures aurifères du stade précoce, est déplacé et fixé dans les faciès pièges par les fluides drainés par la shear zone. Cet or est généralement très fin (quelques μm) et peu argentifère.

Le stade tardif, toujours en domaine cassant, peut se manifester au sein d'une structure de stade précoce ou de stade intermédiaire. Il correspond à une ouverture qui se traduit par la formation de stockwerks de quartz ou de quartz et de carbonates, qui provoquent la remobilisation in situ des minéralisations aurifères des stades précédents. Ce phénomène s'accompagne d'une pépétisation de l'or qui peut alors former des particules plurimillimétriques, souvent localisées aux épontes des filonnets du stockwerk ou dans des petites géodes de quartz. Ce type d'or est souvent riche en argent (électrum), métal qui est emprunté aux fluides plombo-zincifères fréquemment responsables de cette remobilisation. Ce dernier stade, qui contribue grandement à la variété des expressions minéralogiques et, par suite paragénetiques, provoque une grande diversité apparente dans la gîtologie des shear zones aurifères.

LES SHEAR ZONES AURIFERES

PROPOSITION D'UN MODELE CONCEPTUEL

Introduction

Le terme de "shear zone" s'applique à des structures tectoniques cisailantes, appelées également "failles ductiles" ou "failles par cisaillement", qui sont induites par des régimes tectoniques compressifs ou distensifs. Ce n'est que récemment que le rôle primordial de ces structures dans le contrôle des minéralisations aurifères de nombreux gisements a été découvert. Un nouveau modèle géologique peut être ainsi proposé: la shear zone aurifère.

Nous désignerons par "shear zone aurifère" un modèle géologique de gisement, c'est à dire qu'à ce terme sera affecté un sens métallogénique et non plus strictement structural. Dans cet article, nous définirons les caractéristiques générales du modèle tel qu'il est actuellement utilisé au BRGM pour le développement des programmes de recherche métallogénique.

Ce modèle intègre de nombreux types de gîtes longtemps considérés comme différents tels que les filons de quartz aurifère (Pouébo, Burkina-Faso; Le Bourneix et Laurières, Haute Vienne, France), les listvénites (Nakéty, Koum, Nouvelle Calédonie), certains "granites" ou "porphyres" minéralisés (Loulouie, Guyane) ou des gîtes de type stockwerk (Vigès, Creuse - France). Ainsi, ce modèle ne s'appuie pas sur une morphologie particulière du corps minéralisé, ou sur les relations spatiales entre la minéralisation et les terrains encaissants, mais sur la dynamique de mise en place de la minéralisation aurifère étayée par la nature des phénomènes physico-chimiques de piégeage et de concentration de l'or. Il s'agit donc d'un **modèle conceptuel dynamique**, qui, à la différence des modèles analogiques, n'est pas le reflet descriptif de quelques gîtes particuliers, mais la **synthèse d'observations réalisées sur des gisements pouvant apparaître comme disparates et dont la genèse offre des caractères similaires.**

1 Définition des diverses échelles d'observation (fig.1)

A l'échelle régionale, les shear zones aurifères s'organisent dans des "couloirs tectoniques" larges de quelques Km (pl.1, fig. 1) et long parfois de quelques centaines de Km . De telles structures affectent une grande partie de la croûte continentale et possèdent une pérennité qui leur permet de jouer et de rejouer en fonction des différents états de contraintes . Au sein de ces couloirs , les shear zones aurifères ont une organisation complexe, en bandes anastomosées parfois associées aux discontinuités lithologiques. Le repérage de ces couloirs tectoniques marque le stade stratégique de la prospection.

La shear zone aurifère sensu stricto correspond à une zone affectée par une déformation ayant évolué de ductile à cassante, de puissance décamétrique à hectométrique, d'extension plurikilométrique et qui peut se développer sur une grande extension verticale (X1000m). Le long de ces structures les roches sont généralement mylonitisées, schistosées, parfois bréchifiées. C'est à cette échelle d'observation que nous définirons le stade semi-stratégique de la prospection.

Au sein de ces structures, les concentrations minérales se produisent soit dans la partie centrale ou "cœur de la shear zone", soit dans des corps filoniens ou intrusifs qui pourront fournir des "lentilles riches". La localisation de ces cœurs, de puissance maximale décamétrique, et de ces lentilles, de dimensions au plus plurihéctométriques, caractérisera le stade tactique de la prospection.

Une prospection optimisée des shear zones aurifères utilisera des outils différents à chacune de ces étapes, chacun d'eux faisant appel aux phénomènes métallogéniques les mieux exprimés à chaque échelle d'observation.

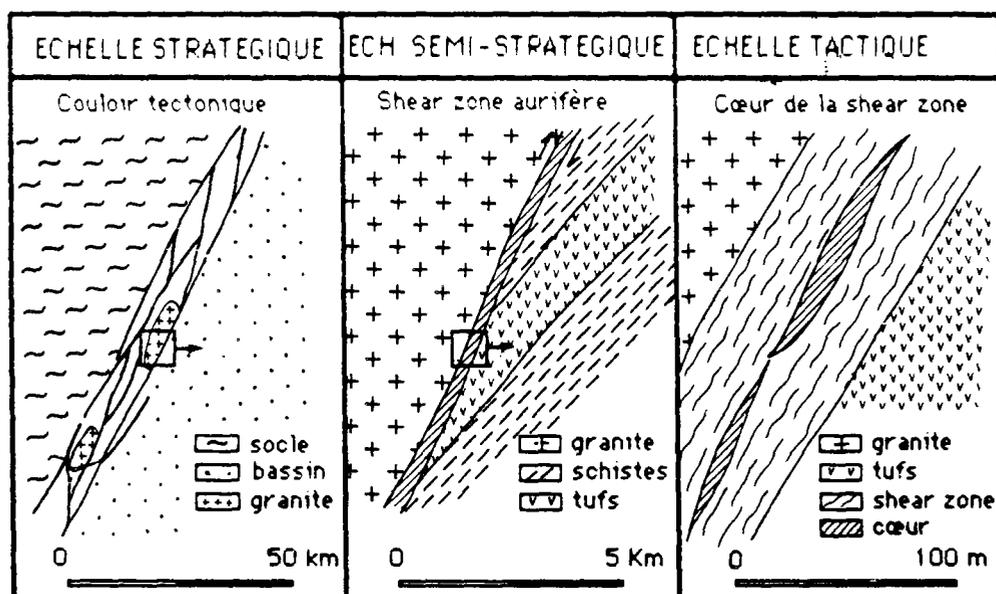


Fig.1: Définition des diverses échelles d'observation des shear zones aurifères

2 Evolution en trois stades des shear zones aurifères

Les travaux réalisés au BRGM dans le cadre du Projet Scientifique "Géologie et prospection des shear zones aurifères" ont montré que les minéralisations aurifères de caractère économique renfermées dans les shear zones ne résultent pas d'un phénomène de "dépôt instantané" mais sont l'aboutissement d'une succession de stades polyphasés qui définissent le degré de maturation de la shear zone aurifère. Chacun de ces stades a des caractéristiques propres et permet une concentration de la minéralisation aurifère dans des faciès différents.

2.1 Stade précoce : formation des sulfures aurifères

2.1.1 Première phase: fixation de l'or dans la structure.

Dans le couloir tectonique, les contraintes et les déformations se focalisent sur des zones restreintes, où les roches sont schistosées ou mylonitisées, et définissent ainsi des shear zones. Ces structures tectoniques acquièrent une perméabilité qui en fait de véritables drains pour les fluides hydrothermaux existant dans le couloir tectonique.

Ces fluides pourraient avoir des origines différentes : déshydratation des roches lors du métamorphisme régional (BOYLE, 1979), activité hydrothermale associée à la mise en place d'intrusions, ou encore des fluides plus superficiels (eaux marines ou météoriques) remobilisés dans ces grandes structures tectoniques par convection géothermique.

Les couloirs tectoniques, zones de faiblesse de l'écorce terrestre, sont le lieu privilégié de mise en place d'intrusions variées, plutoniques ou sub-volcaniques, dont les fluides hydrothermaux à Sn, Bi, ou W peuvent être drainés par les shear zones. Ces mélanges de fluides d'origines différentes sont donc possibles et peuvent expliquer les paragenèses à caractère télescopé d'un grand nombre de minéralisations de shear zones aurifères.

L'action combinée de la déformation et des circulations hydrothermales provoque d'importantes modifications dans la composition minéralogique et géochimique des roches. Deux processus complémentaires sont associés :

- mise en solution partielle et la redistribution in situ des constituants de la roche initiale;
- apport d'éléments étrangers à la composition initiale des roches affectées par le cisaillement et concentration vers le cœur de la shear zone.

Les transformations sont particulièrement frappantes lorsqu'elles se réalisent aux dépens de roches basiques ou ultra-basiques (listvénitisation, §2.1.3).

Les shear zones aurifères sont généralement soulignées par une intense chloritisation à laquelle s'associe une silicification dont l'intensité croît dans le cœur avec l'intensité et la répétition de la déformation. Cette chloritisation provoque l'extraction du TiO_2 des biotites et la néoformation de minéraux titanés: leucoxènes, rutilles..., mais tout le titane ne reprécipite pas sur place; ce dernier est donc mobile dans les shear zones aurifères et semble traduire l'intensité du phénomène hydrothermal au stade précoce. Ce phénomène, avec circulation de fluides et évacuation de matière, peut être considéré comme caractéristique de ces structures.

Cette altération hydrothermale s'accompagne de cristallisations dans les plans de schistosité de pyrrhotite aurifère (pl. 2 Photo 1) dont la teneur (analyses par absorption atomique de minéraux triés), peut atteindre 30 ppm Au (P. Picot et E. Marcoux, 1987). Dans cette pyrrhotite, l'or n'est jamais exprimé minéralogiquement et on doit alors envisager la possibilité d'une substitution diadochique avec le fer. Cette hypothèse est en accord avec les résultats obtenus dans l'étude de l'état de liaison de l'or par spectroscopie Mössbauer (P. Marion et al, 1986). Cette pyrrhotite aurifère qui marque la première concentration de l'or dans la shear zone est vraisemblablement peu abondante dans les faciès mylonitisés et la structure ne présente donc pas de concentration économique. Toutefois, on peut penser que cette pyrrhotite jouerait un rôle essentiel, car c'est elle qui renfermerait le stock initial d'or qui sera ultérieurement reconcentré dans un volume plus restreint, le cœur de la shear zone.

2.1.2 Deuxième phase : concentration de l'or

Dans le cœur de la shear zone, les déformations évoluent rapidement du stade ductile au stade de transition ductile / cassant et les phénomènes d'altération hydrothermale atteignent leur paroxysme. Il se forme ainsi une zone très silicifiée qui se distingue de l'ensemble de la structure par un fort déficit relatif en titane (exemples: Saint-Pierre, Guyane; Vigès, Creuse, France) bien qu'elle puisse renfermer des cristaux de rutile de grande dimension (plusieurs mm à 1 cm à Poura, au Bourneix et à Laurières). Ce cœur concentre aussi certains éléments drainés au niveau de l'ensemble de la shear zone, et provoque la déstabilisation de la pyrrhotite qui donne de la marcasite-pyrite (Le Châtelet, Vigès). De telles transformations pourraient traduire une modification de la fugacité en soufre liée à l'évolution de la déformation ductile vers une déformation cassante (P. Picot et E. Marcoux 1987).

Lorsque les shears zones aurifères drainent de l'arsenic, des concentrations de mispickel (FeAsS) soulignent le cœur de ces structures; c'est le cas de la totalité des exemples connus en France. Les cristaux se présentent généralement avec une granulométrie fine (20 à 100 μm en moyenne) et s'accumulent dans les faciès les plus silicifiés. L'étude détaillée des structures de remplacement de la pyrrhotite par la pyrite et la marcasite montre que le stade de déstabilisation de la pyrrhotite aurifère est contemporain de celui du dépôt du mispickel. L'or libéré au cours de ce processus est fixé sous forme de solution solide dans les zones externes des cristaux de mispickel encroûtant tout d'abord la pyrrhotite (premiers formés, pl. 2 photo 2), puis dans l'ensemble des petits cristaux distribués dans le quartz (derniers formés, pl. 2 photo 3); les teneurs dans le mispickel varient de 0,2% à 1,6% Au (Le Châtelet et Vigès). Comme précédemment, il se produirait une substitution entre l'atome de fer et l'atome d'or.

Les teneurs en As des mispickels aurifères varient de 45,7% à 49,3 % au Châtelet (soit de 33,2 à 38,0 at % As) et de 40,9% à 46,0% dans le gîte voisin de Villerange (soit de 29.3 à 33.3 at % As). La non stœchiométrie du mispickel peut être un géothermomètre très fiable pour estimer sa température de formation (U. Kretschmar et S.D. Scott, 1976; S.D. Scott, 1983). Ces auteurs signalent cependant que ce géothermomètre doit être employé avec prudence lorsque la teneur en éléments mineurs dépasse 1% ou lorsque les cristaux de mispickel possèdent une zonation chimique. Ces deux facteurs se superposent dans les mispickels aurifères. Les températures déduites des diagrammes de stabilité sont donc difficilement utilisables; au Châtelet, par exemple, ces diagrammes indiqueraient une température excessive, comprise entre 450 et 650 °C, incompatible avec les conditions de dépôt de la minéralisation aurifère.

Plus rarement, un processus analogue pourrait se produire lorsque la shear zone draine précocément de l'antimoine. Le phénomène de reconcentration à partir de la pyrrhotite primaire aurifère s'effectuerait alors dans la berthiërite (Les Biards, Haute Vienne; Marmaissat, Puits de Dôme).

Ce processus permet déjà d'atteindre **des concentrations d'or économiques**; les gîtes correspondant peuvent se classer dans la catégorie des **shear zones aurifères "matures" de stade précoce**: structures aurifères où l'or n'est pas minéralogiquement exprimé. En France, plusieurs de ces structures ont déjà été identifiées : Villerange, Vigès et Le Châtelet où plus de 10t d'or ont été exploitées.

2.1.3 Cas particulier des listvénites

Les gisements d'or de type listvénites, peuvent se rattacher à cette catégorie de shear zones aurifères. Leur particularité réside dans la nature des roches tectonisées : roches basiques à ultra-basiques; ces gîtes sont donc très communs dans les greenstones belts, bien que souvent classés sous une typologie différente (filons de quartz, minéralisations aurifères associées à une altération carbonatée, ...).

Sous l'action des phénomènes tectoniques et hydrothermaux imputables à la phase précoce d'évolution d'une shear zone, les roches basiques ou ultra-basiques subissent une carbonatation et une silicification avec dépôt de sulfures qui aboutissent au développement d'un faciès particulier, le faciès listvénite, souvent décrit comme une "dolomie silicifiée", ou parfois même un "quartzite à fuschite".

La listvénitisation est un processus progressif qui se traduit par une intensité croissante des transformations de la roche encaissante des bordures vers le cœur de la shear zone. Le tableau ci dessous (fig. 2) illustre les principales étapes de ce processus dans des environnements ultra-basiques ou basiques ; ces étapes possèdent leurs équivalents dans un environnement acide.

	ULTRA BASIQUE		BASIQUE		ACIDE
Shear zone	Serpentine	MgO > CaO	Chlorite	Carbonates	Chlorite
	Serpentine Carbonates		Chlorite Carbonates		Chlorite et Silice
	Listvénite		Listvénite		
Cœur	Quartz et sulfures	CaO > MgO	Quartz et sulfures		Quartz et sulfures

Fig. 2 : Zonalité des transformations hydrothermales induites par une shear zone aurifère de stade précoce

Les principales étapes de la listvénitisation peuvent se résumer comme suit:

a) Carbonatation

Les premières circulations hydrothermales provoquent une serpentinisation des roches ultra-basiques encaissantes; les minéraux anhydres des roches ultra-basiques et basiques fournissant des amphiboles et du talc dans une étape préalable.

Sous l'action de fluides riches en CO_2 généralement présents dans toutes les shear zones aurifères, il se produit une carbonatation progressive de cette serpentine (faciès adinole, Koum D1, Nouvelle Calédonie) qui envahit la roche jusqu'à l'apparition de la listvénite; le calcium, le magnésium, et le fer qui entrent dans la composition de ces carbonates proviennent alors des roches affectées par la shear zone. Le processus fondamental correspond à un lessivage et à une évacuation préférentielle du magnésium alors que le fer est fixé en partie par la formation des sulfures et des carbonates ferrifères.

En raison de la progressivité du phénomène, une coupure arbitraire fut définie par L. Viallefond (com. pers.) sur l'indice de Dondo Mobi (Gabon) entre les serpentines carbonatées et les listvénites sur la base du ratio CaO/MgO :

- si $\text{CaO} < \text{MgO}$, la roche est une serpentine carbonatée
- si $\text{CaO} > \text{MgO}$, la roche est une listvénite.

b) Silicification

La silicification de la serpentine s'effectue conjointement avec la carbonatation; discrète dans les serpentines carbonatées, elle se développe surtout dans les listvénites qu'elle envahit rapidement jusqu'à la formation de roches siliceuses connues sous le terme de "mur de silice" (M. Jacob, 1985) à Nakéty et à Koum (Nouvelle Calédonie).

Il semblerait que cette silicification ne nécessite pas d'apport de silice; celle-ci serait résiduelle et résulterait du lessivage des autres constituants de la roche ultra-basique. Le cœur de la shear zone constitue donc le site privilégié de cette silicification. Dans des cas extrêmes, ce phénomène peut aboutir à la formation de "filons de quartz" dont les fortes teneurs en chrome (X1000 ppm), nickel et cobalt (X100 ppm), témoignent de leur origine ultra-basique.

c) Formation des sulfures

Les secteurs très silicifiés inclus dans les listvénites sont le siège du dépôt de sulfures typiques de la maturation des shear zones du stade précoce. Des concentrations métalliques (Cu, Zn, Sb, As, ...) se produisent ainsi dans le cœur des structures qui conserve toutefois l'empreinte géochimique de son origine (Cr, Ni, Co). L'ullmannite (NiSbS) et/ou la gersdorffite (NiAsS) se rencontrent ainsi dans toutes les listvénites étudiées* (France, Chine, Arabie, ...). La millérite (NiS) est également fréquente et côtoie la tucekite ($\text{Ni}_9\text{Sb}_2\text{S}_8$) dans certaines listvénites de France* (Rocheservièrès, Vendée, et Decazeville, Aveyron).

L'ensemble de ces processus ne nécessite pas l'introduction de nouveaux constituants majeurs dans la roche; la majeure partie des modifications de composition enregistrées peut s'expliquer par le seul apport de gaz carbonique, de soufre et de potassium (G. N. Phillips, 1986) et le départ progressif de certains éléments (Mg, Ca, Al,...). Les seuls éléments "nouveaux" sont ceux drainés par la shear zone : As, Au, Sb, W, Cu, Bi, ...

* P. Picot, travaux inédits et P. Picot et E. Marcoux, 1987.

2.2 Stade intermédiaire: Apparition de l'or minéralogique

2.2.1 Mise en place des "structures hôtes"

Dès le stade précoce, des ouvertures peuvent se produire, soit dans la shear zone, soit dans les roches encaissantes de sa bordure (fig.3).

Ces ouvertures favorisent la mise en place de remplissages filoniens, tels que des lentilles plus ou moins massives de quartz blanc laiteux, dont la puissance maximale peut atteindre ou dépasser une dizaine de mètres; leur extension dépasse rarement deux à trois centaines de mètres. Ces filons se développent préférentiellement dans les terrains riches en silice : granites, gneiss, séries volcano-sédimentaires acides, etc... Cette observation tendrait à prouver que la silice qui les constitue provient bien de leur encaissant immédiat. Leur formation serait attribuable à un phénomène de sécrétion latérale; la migration des éléments est assurée par les fluides circulant de la shear zone vers la zone d'ouverture.

Des dykes de roches basiques (diabases, diorites, ...) ou acides (leucogranites, microgranites, etc...), généralement de caractère porphyrique, peuvent également se mettre en place dans la shear zone.

Dans certains cas, des copeaux tectoniques de roches affectées par la shear zone peuvent jalonner la structure. Leur mise en place s'effectue donc au sein de la shear zone par entrainement le long des plans de cisaillement. Les lames de roches ultra basiques souvent présentes dans les shear zones aurifères procèderaient de ce phénomène : leur présence traduirait l'existence d'un accident profond, capables d'entraîner des éléments provenant de la base de la croûte continentale.

Ces structures, que l'on qualifiera de structures hôtes, ne sont généralement pas minéralisées en or; on observe tout au plus une légère concentration des minéralisations du stade précoce aux épontes des filons de quartz blanc laiteux, lorsque leur mise en place s'effectue au sein de la shear zone. Cette remobilisation, qui peut provoquer toutefois l'apparition de petits grains d'or dans le quartz ou dans les sulfures recristallisés, reste toujours très limitée et ne constitue pas un facteur permettant la formation de concentrations économiques.

2.2.2 Minéralisation des structures hôtes

Si les mouvements cisailants reprennent ou se poursuivent le long de la shear zone, les structures hôtes cicatrisant les ouvertures antérieures peuvent à leur tour être préférentiellement déformées et minéralisées. En effet, puisqu'elles présentent une compétence bien supérieure à celle des roches encaissantes, elles peuvent être le siège de cataclases intenses; cependant, si leur puissance est importante (quelques dizaines de mètres) par rapport à celle de la shear zone, cette déformation affectera essentiellement la partie externe de la structure hôte, la discontinuité lithologique guidant les déformations cisailantes.

Ce phénomène correspond à la **maturation des shear zones de stade intermédiaire**; il nécessite une structure hôte au chimisme convenable (siliceux ou basique), une déformation tectonique qui provoque la formation d'un faciès piège, et un site particulier, dans lequel ce faciès piège fixe la minéralisation aurifère remobilisée à partir de la shear zone de stade précoce.

Ces shear zones aurifères de stade intermédiaire (**SZI**) peuvent apparaître au sein de la structure précoce (**SZI "inclus"**) et conduire à une forte concentration de la minéralisation, ou à l'extérieur, greffées en épi sur la shear zone précoce (**SZI "sécantes"**); dans ce dernier cas, la concentration de l'or se produit préférentiellement le long d'une colonne à l'intersection ou dans la zone de jonction des deux structures. Ainsi, la diversité des types de shear zones aurifères découle principalement des relations entre les différents types de shear zones de stade précoce et de stade intermédiaire (cf.S 4).

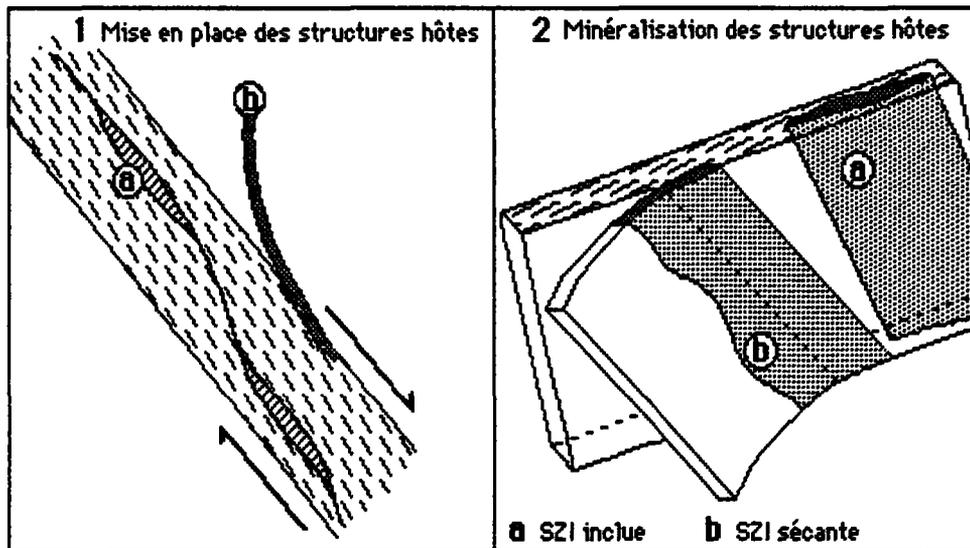


Fig. 3 : Formation des shear zones de stade intermédiaire

Fig. 3 : Formation des shear zones de stade intermédiaire

Dans un premier stade des structures hôtes se mettent en place dans des ouvertures ménagées au sein de la shear zone (1a) ou en bordure de celle-ci (1b). Lorsque ces structures hôtes sont affectées par les déformations cisailantes, il se forme des shear zones de stade intermédiaire (SZI) incluses dans la shear zone précoce (2a) ou sécantes sur celle-ci (2b); le phénomène de maturation (en grisé sur la figure) est maximum au sein de la shear zone de stade précoce ou en bordure de celle-ci, au niveau de la jonction avec les SZI sécantes.

a) Structures hôtes siliceuses

Les structures hôtes siliceuses, et en particulier les filons de quartz blanc laiteux, génèrent par cataclase un faciès de quartz particulier, dit "quartz microsaccharoïde", dont le rôle de réceptacle pour la minéralisation aurifère a pu être démontré (M. Bonnemaison, 1986). La genèse de la majeure partie des gîtes d'or classés comme "filons de quartz aurifère" ou "lames de roche intrusive minéralisées en or" peut être expliqué suivant ce modèle.

La minéralisation des structures hôtes se produit au sein de shear zones déjà minéralisées au cours d'un stade précoce. Cette minéralisation, qui s'effectue au sein d'un milieu pré-concentré en or, quelquefois même présentant des teneurs économiques, est à l'origine de minerais à forte teneur qui peuvent atteindre parfois plusieurs dizaines de g/t. La minéralisation aurifère est véhiculée de la caisse de la shear zone vers les "faciès réservoirs" de la structure hôte, par des fluides hydrothermaux qui provoquent la déstabilisation des sulfures aurifères du stade précoce (pyrrhotite et/ou mispickel aurifères) et l'apparition d'or natif.

Au cours de ce stade intermédiaire, l'essentiel de l'or acquiert pour la première fois une expression minéralogique. Il se présente sous forme de petits globules d'or à haut degré de pureté (moins de 15% Ag), dont la dimension moyenne est généralement de l'ordre du μ , en inclusions dans les sulfures (pl. 2 Photo 4, 5 et 6) ou dans le quartz microsaccharoïde; les microcristaux se groupent alors en petits nuages pouvant atteindre des dimensions millimétriques, centrés sur un cristal de sulfure (M. Bonnemaïson, 1986).

Dans les sulfures, l'or ne montre aucune association privilégiée avec une espèce particulière et peut se rencontrer simultanément dans plusieurs d'entre elles. La minéralisation de La Bellière (Maine et Loire, France) est un bon exemple de cette ubiquité : de fines inclusions d'or se rencontrent aussi bien dans la pyrite, que dans la chalcopyrrite, le mispickel et la galène (pl. 3 Photo 1). Notons que, bien que ces sulfures renferment de nombreuses inclusions d'or natif, on ne peut les considérer comme véritablement aurifères, l'or se comportant vis à vis de ces derniers comme un minéral étranger. Une différence essentielle existe donc avec les minéralisations sulfurées aurifères du stade précoce où une seule espèce, généralement le mispickel, joue le rôle de vecteur de l'or.

Les minéralisations du stade intermédiaire peuvent oblitérer totalement celles du stade précoce dont la reconnaissance peut ainsi présenter de sérieuses difficultés. La pyrrhotite précoce est en effet rarement préservée dans les shear zones matures de stade intermédiaire du type Limousin (Cros-Gallet, Laurières, La Fagassière) et seules les structures lamellaires et filamenteuses de marcasite-pyrite (La Bellière, pl. 3 Photo 2), caractéristiques de la transformation d'anciennes pyrrhotites, témoignent de l'existence passée de ce minéral. Le mispickel aurifère reste par contre impossible à identifier sur de simples critères optiques et nécessite l'analyse à la microsonde qui permet la détection de teneurs supérieures à 600ppm Au.

Les travaux récents réalisés au BRGM ont montré que dans la plupart des cas, ce stade intermédiaire de la minéralisation des shear zones était caractérisé par une forte corrélation Au-Pb (Bonnemaïson 1986), ce dernier pouvant s'exprimer sous forme de galène (La Bellière et Laurières (pl. 3 Photo 3), Repentir et Loulouie, Guyane; Poura, Burkina-Faso) ou de sulfo-sels (Le Bourneix et Laurières, Haute-Vienne) comme la jamesonite ou l'andorite ($PbAgSb_3S_6$). Cette liaison géochimique ne peut s'expliquer que par une corrélation génétique entre les phénomènes minéralisateurs en or et en plomb.

A ce stade de l'évolution des shear zones, les fluides hydrothermaux peuvent avoir une origine profonde ou plus "crustale" en relation avec les nombreux phénomènes volcano-plutoniques qui se manifestent dans le couloir tectonique. Cette hypothèse serait en accord avec les résultats obtenus par P. Hubert (1986) dans son étude des inclusions fluides de la lentille aurifère du Bourneix ; cet auteur démontra l'existence d'un mélange de deux fluides immiscibles lors du dépôt de la minéralisation aurifère du stade intermédiaire.

La silicification des structures hôtes n'est pas sans évoquer celle qui se produit dans le cœur des shear zones matures de stade précoce, toutefois les paragenèses sulfurées associées à ce stade intermédiaire sont généralement beaucoup plus complexes que celles qui caractérisent le stade précoce; en effet, les phénomènes de surimposition avec les nouveaux éléments introduits dans la shear zone (Sn, W, Bi, Mo, ...) lors de la mise en place des structures hôtes sont fréquents.

Ainsi, dans le Limousin (France), ce stade intermédiaire de l'évolution des shear zones aurifères s'accompagne souvent de paragenèses de haute température. Ces paragenèses, spatialement associées à l'or minéralogique, ont orienté la classification de ces minéralisations vers le type "départ acide" et, par simplification, le rattachement des gisements qui les renferment au modèle filonien classique (filons péri-granitiques).

b) Structures hôtes de composition basique

Comme toutes les roches de composition basique ou ultra-basique affectées par une shear zone, les dykes de diabases ou de diorites subissent un phénomène de listvénitisation. De telles structures sont donc capables de développer des pièges comparables à ceux développés dans les shear zones de stade précoce.

Toutefois, lorsque ces dykes se mettent en place dans des séries de caractère plutôt acide, les roches carbonatées qui se forment lors du processus de listvénitisation ont une forte réactivité chimique avec les solutions qui circulent dans la caisse de la shear zone; les carbonates pouvant provoquer des modifications du pH entraînant la précipitation de l'or.

Ainsi, les dykes de roches basiques (ou les copeaux tectoniques de roches ultra-basiques préalablement injectés dans la structure) mis en place dans une shear zone qui affecte des séries de caractère acide, pourront fournir des pièges particulièrement actifs et constituer des objectifs privilégiés pour la recherche minière.

2.3 Stade tardif : formation d'or pépitique

Sous l'action d'un régime tectonique distensif, des ouvertures (fentes d'extension, ouverture de fractures) peuvent se développer dans la shear zone entraînant de nouvelles évolutions significatives au niveau de ses faciès minéralisés. Suivant les modalités de ces phénomènes d'ouverture, ces faciès pourront être très différents ; toutefois ils auront en commun une minéralisation à or pépitique.

2.3.1 Ouvertures ménagées

Lorsque ces ouvertures sont très progressives, il se forme une multitude de petites géodes dans lesquelles le quartz microscopique recrystallise en un quartz automorphe de granulométrie fine (0,1 à 1 mm). Ce faciès a été identifié en France dans le prospect de Vigès et dans certaines aurières du Limousin et du Massif armoricain (P. Hubert, 1986; M. Calli et al, 1986).

L'or se présente alors sous forme de grains parfois millimétriques, en position intergranulaire ou en remplissage de petites géodes (Labessette, Champvert, Cros-Gallet; pl. 2 Photos 4 et 5). Ces ouvertures tardives sont synchrones de l'arrivée de solutions minéralisées épithermales souvent à dominante cupro-argentifère dans la shear zone. Ce cachet géochimique se traduit au niveau paragéométrique par la cristallisation de galène à inclusions de diaphorite (AgPbSbS_3) et de freibergite ($(\text{AgCu})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, Limousin), d'owyheeïte ($\text{Pb}_5\text{Ag}_2\text{Sb}_6\text{S}_{15}$) et de tétraèdrite argentifère.

L'or contient également une forte proportion d'argent (électrum : 20 à 60% Ag) ce qui permet de le distinguer aisément de la génération du stade intermédiaire. Ces différentes générations d'or peuvent coexister au sein d'une même structure minéralisée (Ahmadzadeh et al, 1984), la proportion croissante d'argent évoluant grossièrement avec le degré de maturation de la shear zone.

2.3.2 Ouvertures induisant la mise en place d'un stockwerk

Lorsque l'ouverture tardive de la caisse de la shear zone est faible, elle se manifeste par la formation d'un stockwerk de veinules de quartz blanc laiteux. Le développement de celui-ci est étroitement lié à la nature des roches présentes dans la shear zone; les roches volcano-sédimentaires et les roches plutono-volcaniques à texture porphyrique constituant les faciès les plus favorables.

Ces stockwerks de quartz blanc laiteux, souvent très riches en carbonates remobilisés, offrent un développement particulièrement spectaculaire dans les gîtes associés à des listvénites où ils arment de véritables lentilles d'extension décamétrique à plurihéctométrique (pl. 1, photo 2) dans le cœur des structures.

Ces phénomènes d'ouverture provoquent une remobilisation de l'or fin lorsqu'ils se produisent dans une structure hôte du stade intermédiaire; ils peuvent également permettre la libération de l'or intégré au réseau des sulfures dans le cœur des shear zones de stade précoce. Des paragenèses à stibine, sulfosels et tourmaline sont caractéristiques de ce stade tardif (Viges).

L'or pépitique néoformé se localise préférentiellement aux épontes des veinules de quartz. Localement ce phénomène peut être à l'origine d'un enrichissement de la structure (à Viges, Creuse, par ex.). Dans ce cas, la richesse du minerai ne dépend pas de la proportion de quartz constituant le stockwerk, mais de la surface spécifique représentée par les épontes des veinules. Un stockwerk dense à veinules très minces sera donc un facteur d'enrichissement, alors qu'un stockwerk constitué par un réseau de filonnets de puissance pluricentimétrique à décimétrique risque d'être un facteur de dilution des teneurs initiales de la shear zone

2.3.3 Ouvertures importantes de la shear zone

Lorsque les ouvertures tardives de la shear zones sont concentrées le long d'une discontinuité unique, elles peuvent devenir importantes et conduire à la formation d'un nouveau "filon" de quartz qui peut atteindre une puissance métrique à plurimétrique . En l'absence de bréchification postérieure, ce quartz présente un faciès caractéristique en mâchoires, avec des cristaux automorphes centimétriques, quelquefois décimétriques (Sélib, Arabie Saoudite). Ce mécanisme, qui peut être assimilé à la mise en place d'une nouvelle structure hôte, provoque une dilution importante des teneurs en or de la shear zone et un très fort effet de pépite localisé aux épontes du nouveau filon de quartz.

3 Signature géochimique des shear zones aurifères

La signature géochimique d'une minéralisation découle des paragenèses minérales qui la caractérisent, ainsi que des modifications subies par les roches encaissantes sous l'action des phénomènes hydrothermaux associés à sa mise en place. Elle peut être utilisée pour établir une classification des structures minéralisées en fonction des anomalies (en roche, ou lorsque les conditions le permettent, en sol) qu'elles provoquent dans un environnement lithologique donné.

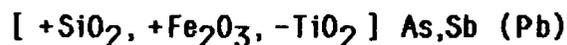
Ainsi, on distinguera trois types d'éléments chimiques dans cette signature :

- les éléments majeurs déjà présents dans les roches encaissantes, et dont les proportions ont été modifiées par l'introduction de la minéralisation; ceux-ci seront écrits en tête de la signature entre des crochets, précédés ou non d'un signe +, lorsqu'ils traduisent un enrichissement, et précédés d'un signe - lorsqu'ils traduisent un lessivage;

- les éléments absents dans les roches encaissantes et introduits par les fluides minéralisateurs qui caractérisent la minéralisation à l'échelle de la structure (échelle semi-stratégique) et donc présents en tout point de celle-ci; ils seront écrits à la suite des précédents;

- les éléments spécifiques des zones riches qui sont associés à un phénomène de remobilisation et de concentration. Ces derniers, qui constituent des traceurs tactiques de la minéralisation seront écrits entre des parenthèses à la suite des précédents.

En France, la majorité des structures en cours d'étude présenteraient la signature suivante :



Les traceurs semi-stratégiques semblent refléter des caractéristiques géologiques régionales qui pourraient être mises en relation avec des contextes géodynamiques spécifiques, mais ceci reste pour l'instant du domaine des hypothèses. Quoiqu'il en soit, des constantes apparaissent nettement dans un certain nombre d'exemples régionaux .

L'arsenic est toujours présent dans les shear zones aurifères du socle varisque français. Il s'observe également dans ces mêmes structures affectant les formations volcano-sédimentaires de Cadillac (Québec, Canada). Par contre, cet élément est généralement peu présent dans les shear zones de la greenstone belt d'Abitibi où il pourrait être remplacé par le cuivre; dans un contexte analogue, certaines shear zones ne renfermeraient pas de traceurs semi-stratégiques (Repentir, Guyane).

L'antimoine, traceur semi-stratégique, semble caractéristique des structures de stade intermédiaire (sous forme de stibine ou de sulfosels) du Massif Central; il pourrait toutefois être aussi un traceur de certaines structures de stade précoce dans lesquelles les berthiérites aurifères jouent le rôle de la pyrrhotite ou du mispickel (stades précoces non matures et matures).

Par contre, le plomb, traceur tactique, semble indépendant de l'environnement lithologique de la shear zone. Plus étroitement lié à l'or que les traceurs semi-stratégiques, il signe les zones riches de la majorité des structures étudiées. Son utilisation pour la prospection est toutefois liée à son niveau de teneur dans le minerai: présent à plus de 1000 ppm dans les structures du Bourneix et de Laurières, il constitue un excellent traceur tactique; par contre, à Repentir, où il n'atteint que quelques dizaines de ppm, il ne développe pas d'anomalies suffisamment contrastées pour qu'il soit utilisable en géochimie sol comme traceur tactique.

4 Diversité des shear zones aurifères

La variété des contextes lithologiques affectés par les shear zones de stade précoce, et celle de la nature des structures hôtes éventuellement mises en place au stade intermédiaire, sont à l'origine de la grande diversité des types de minéralisations qui peuvent se développer dans ces gîtes.

Au stade précoce, la nature de la minéralisation résulte essentiellement des modifications subies par les roches encaissantes sous l'action combinée de la déformation et de l'altération hydrothermale. La composition globale du minerai localisé dans le cœur d'une shear zone est directement héritée du chimisme des roches encaissantes, et l'apport principal des fluides, en dehors des éléments en traces (Pb et Au en particulier) se limiterait à du soufre (sulfuration), du potassium (altération potassique) et du gaz carbonique (carbonatation).

Les roches basiques et ultra basiques permettent ainsi la formation d'un minerai de type listvénite (mine de Sartoai, Chine: pl. 1).

Les roches acides grenues sont favorables au développement de faciès silicifiés à sulfures disséminés, dans lesquels des carbonates sont systématiquement présents en petites quantités (calcite, ankérite, ...). Le calcium, et le fer entrant dans leur composition proviendraient des feldspaths et des biotites détruits par l'activité de la shear zone; cette mobilisation libérerait également une partie de la silice à l'origine de la formation du quartz microscaccharoïde. Des faciès aurifères analogues s'observent aussi dans des roches de composition minéralogique équivalente : gneiss, grauwackes, ...

Les roches plus phylliteuses, comme les schistes ou les formations tufacées peu siliceuses, ne favorisent pas le développement d'une silicification importante du cœur des shear zones. La minéralisation se présente généralement sous la forme d'une dissémination de sulfures dans les plans de la schistosité de la shear zone; il s'agit généralement de pyrite et de pyrrotite, auxquelles s'associent des sulfures formés à partir des principaux métaux disséminés dans la série encaissante (Cu, Zn, Pb, ...).

La figure 4 schématise la diversité des faciès de minerai pour une même shear zone de stade précoce affectant des massifs rocheux de nature différente.

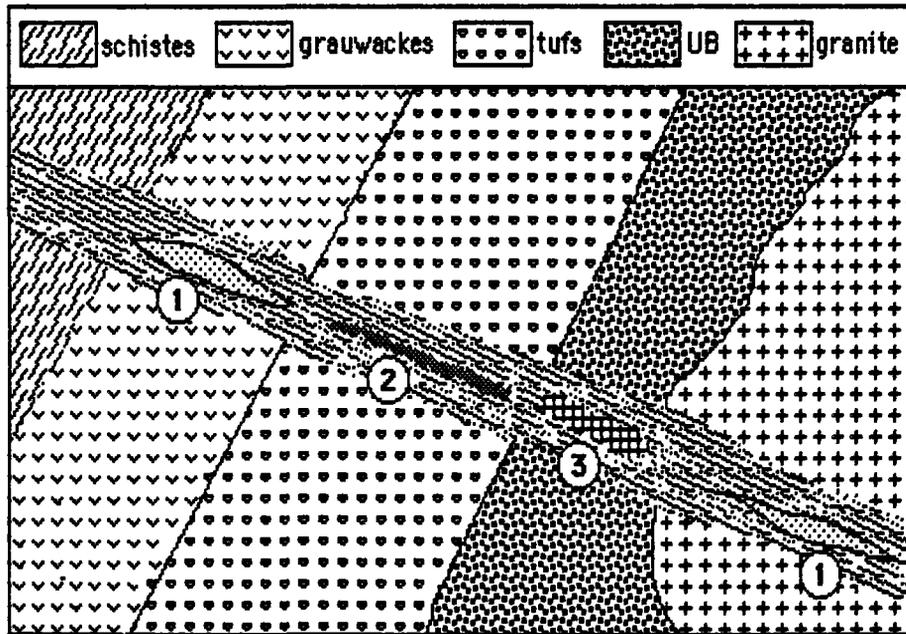


Fig. 4 : Diversité des faciès de minerais développés dans le cœur d'une shear zone mature de stade précoce: 1 Zones silicifiées à sulfures aurifères disséminés; 2 Disséminations de sulfures, localement massifs; 3 Listvénites silicifiées.

Le comportement mécanique des roches des séries encaissantes est primordial dans le contrôle du style des ouvertures ménagées aux stades intermédiaire et tardif; suivant les cas, il peut se former des minerais de type stockwerk ou filonien, dont la nature est aussi un reflet du chimisme des séries encaissantes.

L'introduction de corps intrusifs dans la structure contribue à la variété des types de shear zones de stade intermédiaire (fig 5) en particulier dans la mesure où elle peut entraîner la formation de gangues très diverses. A cette complexité de la composition des minéralisations du stade intermédiaire, s'ajoute une géométrie des corps minéralisés qui découle des relations entre les structures hôtes et la shear zone de stade précoce. Cette diversité est illustrée par le tableau ci-dessous (fig. 6), dans lequel quelques gîtes étudiés ou réinterprétés à partir de données bibliographiques, sont donnés à titre d'exemple.

Stade précoce: Contexte lithologique		Ultra-basique à basique	Acide	Volc. Sed. acide à int.	
Stade intermédiaire: Structure hôte	Inclue	Quartz	Nakéty 3	Repentir 2 Le Bourneix 1	Poura 5
		Intr. acide	Koum D1 3	1	Loulouie 3
		Intr. basique	Golden Mile * 4		Mishibishu * 6 Lake
	Sécante	Quartz	Sartoaï 7	Star lake * 6 pluton	Hatu 7
		Intr. acide	Temagami * 6		Camflo 6
		Intr. basique			

Fig.5 : Diversité des types de shear zones de stade intermédiaire

* interprétation d'après les données bibliographiques.

1: France; 2: Guyane; 3: Nouvelle Calédonie; 4: Australie

5: Burkina faso; 6: Canada; 7: Chine

Ces nombreuses présentations de la minéralisation des shear zones aurifères sont encore compliquées par la superposition éventuelle des stades tardifs, qui provoquent la recristallisation des minéralisations existantes, la déstabilisation de sulfures aurifères du stade précoce et la pépétisation de l'or minéralogique du stade intermédiaire.

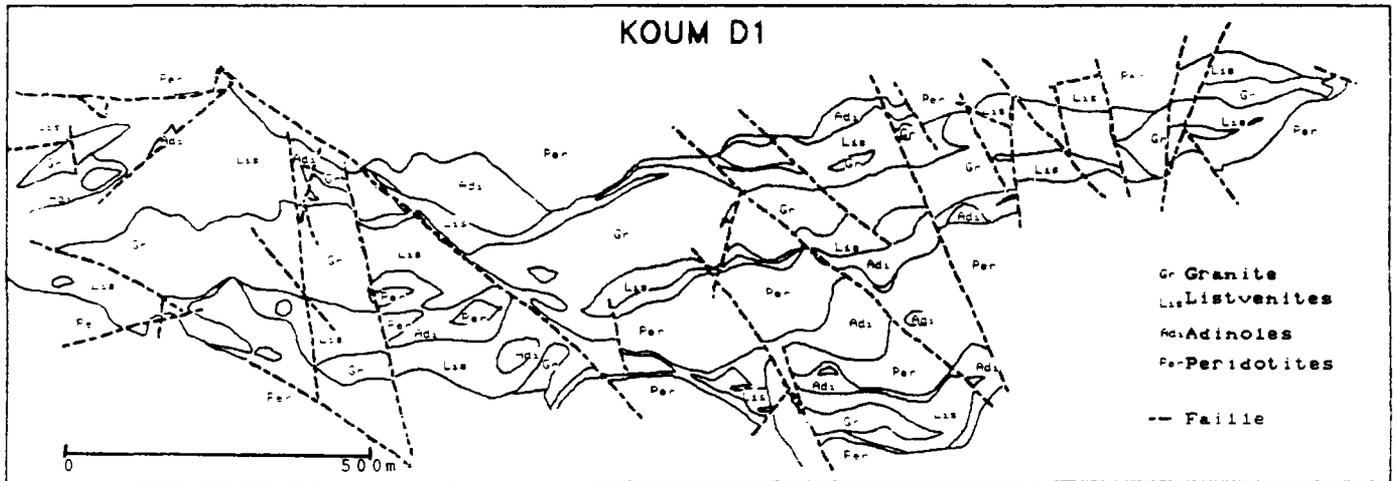


Fig. 6 : dyke granitique inclu dans une shear-zone de stade précoce de type listvénite : KOUM.D1 (Nouvelle-Calédonie) ; le faciès adinole correspond à la zone à serpentine + carbonates (fig. 3).
 (d'après document BRGM Nouvelle Calédonie).

5 Maturation des shear zones aurifères

L'apparition d'une concentration aurifère de caractère économique dans une shear zone nécessite la superposition des divers stades en relation avec divers états de contraintes. Ces structures minéralisées ont donc une *génése* longue, parfois étendue sur des périodes de plusieurs dizaines de millions d'années, et dont les diverses étapes traduisent le degré de maturation. Cette particularité permet de les distinguer des autres types de gisements aurifères comme les amas sulfurés, les niveaux stratiformes de type Sedex ou les gîtes épithermaux dont la formation résulte d'un phénomène relativement bref à l'échelle géologique.

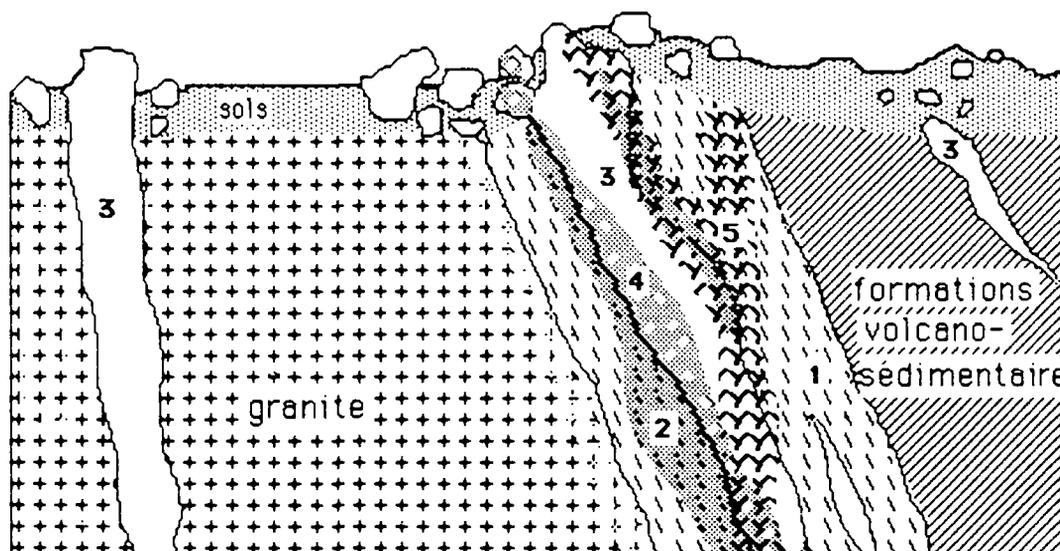
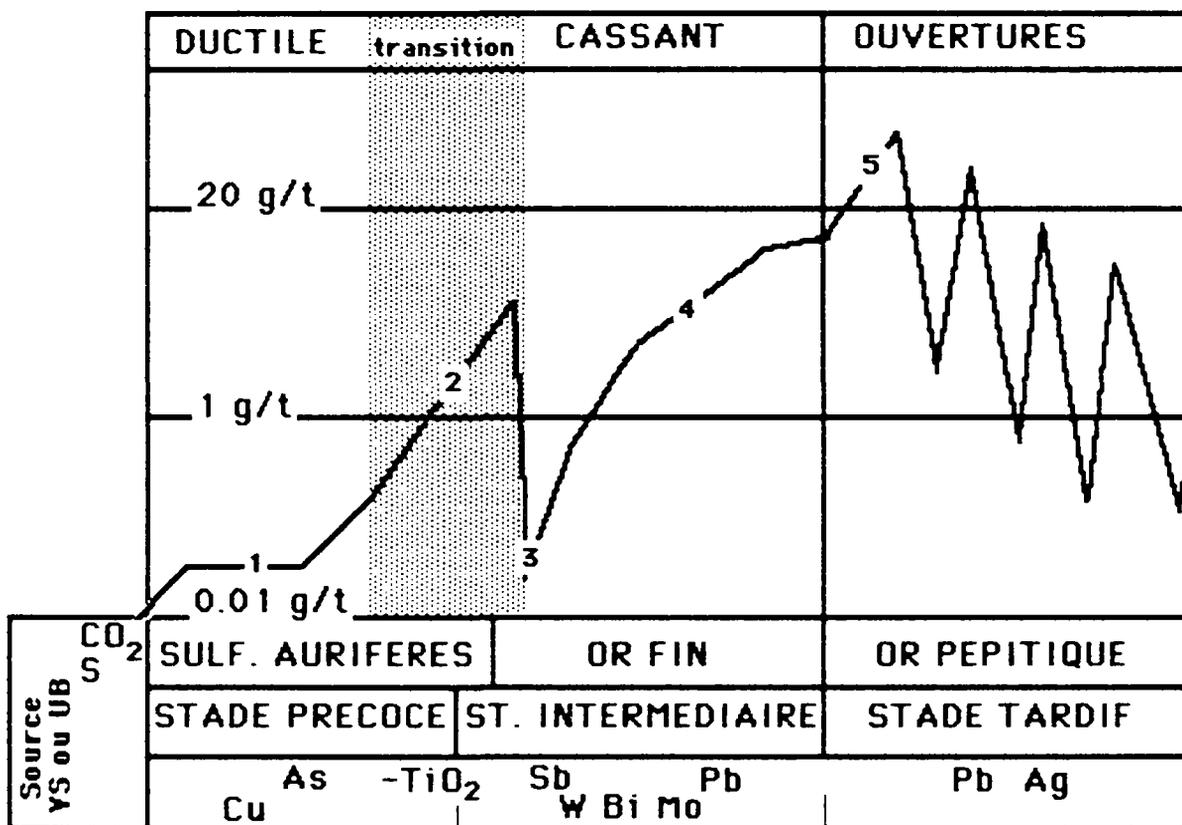
L'or apparaît très tôt dans les shear zones sous forme de pyrrhotite aurifère ou peut être de berthiélite aurifère, alors que les roches subissent une déformation cisailante. Ultérieurement, **chaque épisode de broyage accompagné d'une circulation de fluides hydrothermaux qui se produit dans la shear zone précoce est un facteur d'enrichissement en or de la structure. A l'inverse, chaque phase d'ouverture avec apparition de filons ou stockverks est un facteur de redistribution de la minéralisation et parfois de dilution**; ces phases ont toutefois un rôle majeur en provoquant l'apparition d'un or minéralogique puis sa pépétisation. Leur superposition avec les phases plus précoces s'explique par la maintenance d'une zone de faiblesse au niveau de la structure, celle-ci étant réanimée à chaque nouvel événement tectonique.

L'enchaînement de ces diverses phases minéralisatrices provoque la maturation des shear zones aurifères : phénomène cumulatif aboutissant à l'enrichissement en or ; les structures anciennes, caractérisées par plusieurs phases tectoniques, offrent donc de meilleures potentialités aurifères que des structures plus jeunes.

La figure 7 résume la maturation d'une shear zone aurifère de type "filon de quartz aurifère" en milieu acide ou volcano-sédimentaire, dans laquelle les stades précoces et intermédiaires auraient atteint leur niveau respectif de maturité.

Au stade précoce (1) une minéralisation aurifère disséminée, composée de pyrrhotite aurifère et de sulfures de métaux renfermés dans les séries encaissantes, se développe dans les plans de schistosité mylonitique de la shear zone. Cette minéralisation ne présente pas un caractère économique (teneur en Au généralement inférieure à 1 g/t) et peut être signée par l'arsenic; généralement le mispickel n'est pas encore aurifère.

Fig.7: MATURATION D'UNE SHEAR ZONE AURIFERE



- | | | | |
|----------------|---|----------------|---|
| 1 / \ | Stade précoce non mure | 4 . . . | Stade intermédiaire mure |
| 2 x x x | Stade précoce mure | 3 [] | Mise en place des structures hôtes:
Filons de quartz blanc laiteux |
| 3 [] | Mise en place des structures hôtes:
Filons de quartz blanc laiteux | 5 ~ ~ ~ | Stade tardif:
Formation de stockwerks |

Dans le cœur de la structure, une première concentration économique de la minéralisation sulfurée aurifère se produit dans des zones silicifiées et déficitaires en titane (2); cette concentration correspond au phénomène de maturation de la shear zone précoce. L'or n'est pas exprimé minéralogiquement, mais se trouve concentré dans la partie périphérique des cristaux de mispickel.

Des filons de quartz blanc laiteux et stériles (3) se mettent en place soit dans la shear zone précoce, soit à proximité; ces filons peuvent renfermer des paragenèses à minéraux de Bi, W, Mo ou Sn. Leur cataclase par le rejeu de la structure les transforme en réservoir d'une minéralisation remobilisée à partir de la shear zone de stade précoce (mature ou non). Ce phénomène correspond à la maturation du stade intermédiaire (4) qui est généralement signée par le plomb; l'or acquiert pour la première fois une expression minéralogique.

Dans un stade tardif (5), des stockwerks de quartz se développent dans la shear zone; suivant la nature de leur encaissant (minerais de type 1, 2, ou 4) il se formera un minerai plus ou moins riche à or pépitique: l'association 2+5 ou 4+5 fournira un minerai riche alors que l'association 1+5 ou 3+5 fournira un minerai pauvre. A l'échelle de la structure ces phénomènes tardifs, souvent associés à des venues plombo-zincifères à argent, auraient plutôt tendance à provoquer un appauvrissement par dilution de la teneur en or, malgré l'existence d'échantillons très spectaculaires à or natif argentifère (électrum) largement développé.

Conclusion

Ce phénomène de maturation confère aux shear zones aurifères une originalité qui permet de les distinguer très nettement des autres gîtes aurifères épigénétiques ou des gîtes syngénétiques (amas sulfurés, couches exhalatives sédimentaires), dont la genèse revêt un caractère instantané à l'échelle géologique. Pour ces derniers, la richesse du minerai résulte d'une variation brutale de conditions physico-chimiques locales qui permettent le dépôt d'une minéralisation concentrée: rencontre de solutions hydrothermales aurifères avec des eaux marines ou des nappes phréatiques, ébullition des fluides hydrothermaux dans des fractures ouvertes proches de la surface, etc... . Au contraire la genèse d'une shear zone aurifère est progressive et peut s'effectuer de manière continue ou discontinue, avec des interruptions de plusieurs dizaines, voire centaines, de millions d'années entre chaque étape de maturation. Il s'agit moins d'un type de gîte que d'un site privilégié: une zone de faiblesse de l'écorce où les phénomènes de concentration de l'or peuvent se poursuivre indéfiniment dans des faciès variés, à chaque regain d'activité tectonique.

Les shear zones aurifères peuvent remobiliser et reconcentrer des minéralisations aurifères disséminées comme les niveaux stratiformes de type Sedex. Il résulte de ces associations des "gîtes mixtes", dans lesquels les zones riches obéissent aux contrôles propres aux shear zones aurifères présentés dans le modèle général, alors que l'enveloppe minéralisée est contrôlée par un niveau lithologique particulier. Ainsi des gisements de type exhalatif sédimentaire tels que celui d'Hemlo (H. Hugon, 1986) et d'Agnico-Eagle (D. A. Wyman, 1986) au Canada ont été récemment réinterprétés comme shear zone aurifère : en effet il semblerait que les zones les plus riches de ces gisements devraient leurs teneurs aux déformations de type shear zone qui auraient permis des reconcentrations.

PLANCHE 1

Listvénites du couloir tectonique Anji-Darburt, Xinjiang, Chine.

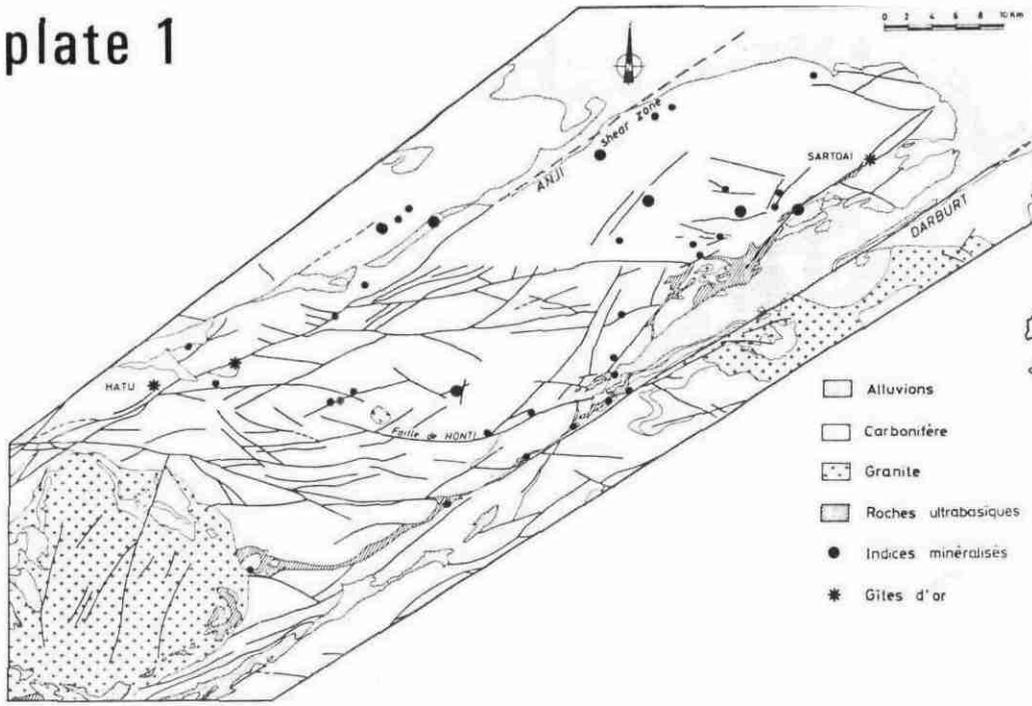
Fig. 1: Couloir tectonique délimité par les shear zones de Anji et de Darburt dans l'Altaï chinois, Province du Xinjiang, Chine Occidentale. Ce couloir renferme de très nombreuses shear zones aurifères dont celle de Hatu (cf. fig. 7) et de Sartoai qui sont en cours d'exploitation. Plusieurs types peuvent être distingués:

- minéralisation disséminée dans la shear zone Anji qui recoupe les formations volcanosédimentaires carbonifères.
- "filons de quartz aurifères" de Hatu correspondant à des shear zones aurifères matures sécantes de stade intermédiaire.
- listvénites et formations siliceuses associées à Sartoai.

Photo 1: Gîte de Sartoai : au premier plan une colline de listvénite silicifiée souligne le cœur de la shear zone de Sartoai. La prospection de ces gîtes est simplifiée par les conditions d'affleurement de ce secteur de l'Altaï chinois où les listvénites forment de petites collines alignées, de couleur brune à marron clair, dans un paysage vallonné de roches ultra-basiques de couleur vert soutenu.

Photo 2: Détail du cœur silicifié des listvénites; celui-ci a été le siège d'ouvertures tardives qui ont entraîné la formation d'un stockwerk de quartz blanc laiteux et de carbonates. Les épontes des filonnets renferment de nombreuses pépites d'or, visibles à l'œil nu.

plate 1



1.



2.



PLANCHE 2

Evolution minéralogique d'une shear zone aurifère

Stade précoce non mature

Photo 1: Pyrrhotite aurifère (10 à 30 ppm Au) dans sidérite, filon des Hermites, Puy de Dôme, France. Minéralisation disséminée typique du stade (1) de la figure 8.

Stade précoce mature

Photo 2: Mispickel aurifère (As) renfermant jusqu'à 1,6 ‰ d'or. Il encroûte d'anciens cristaux de pyrrhotite aurifère, actuellement transformés en marcasite (M). L'étude à la microsonde de ces cristaux de mispickel a montré qu'ils étaient zonés : seule leur périphérie est aurifère. La phase sulfo-arséniée aurifère n'apparaît donc qu'en cours du processus de dépôt du mispickel. Ancienne mine d'or du Châtelet, Creuse, France.

Photo 3: Mispickel aurifère en petits cristaux automorphes dans le quartz. Le dépôt de ces cristaux se réalise lorsque les pyrrhotites précoces sont totalement encroûtées. Ils constituent l'expression finale de l'or dans le stade précoce d'évolution d'une shear zone aurifère arséniée. Cette minéralisation est caractéristique du stade (2) de la figure 8.

Stade intermédiaire

Photo 4: Globules d'or natif (Au) issus de la transformation de pyrrhotite aurifère en marcasite (M). Cette démixtion peut se produire au stade intermédiaire, mais aussi lors des stades tardifs, lorsqu'ils se superposent à une minéralisation du stade précoce non mature. Filon des Hermites Puy de Dôme, France. Ce phénomène se produit donc aux stades (4) et (5) de la figure 8.

Photo 5: Berthiérinite aurifère (Be; Au= 300 ppm) transformée en stibine secondaire (Sb). Ce processus, identique à celui de la photo 4, libère l'or contenu dans la berthiérinite. Shear zone auro-antimonifère de Marmeissat (Puy de Dôme, France).

Photo 6: Détail de la photo précédente qui montre des gouttelettes d'or (Au) dispersées dans la stibine secondaire (Sb).

L'échelle sur les photos représente 0,1mm à l'exception de la photo 2 où elle représente 1 mm.

plate 2

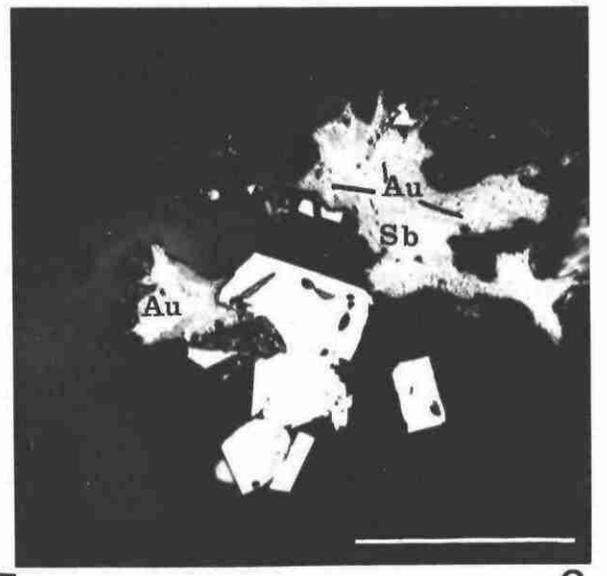
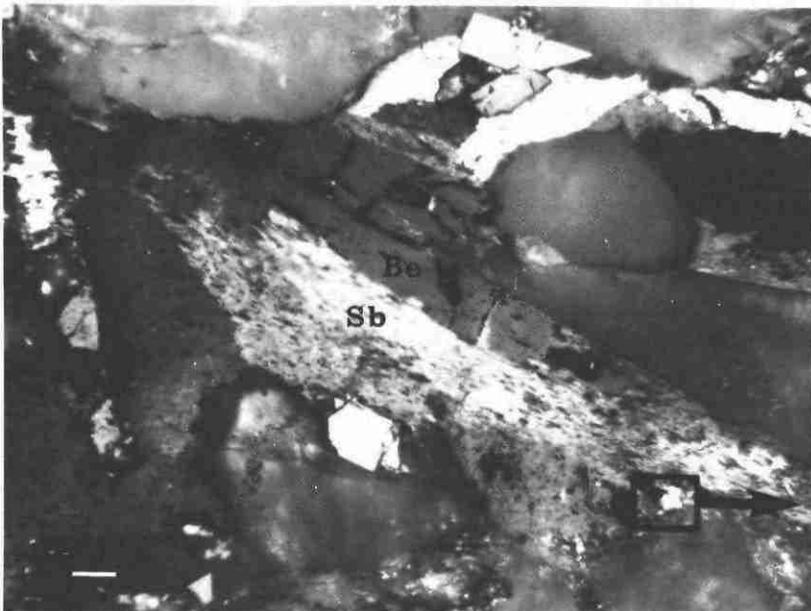
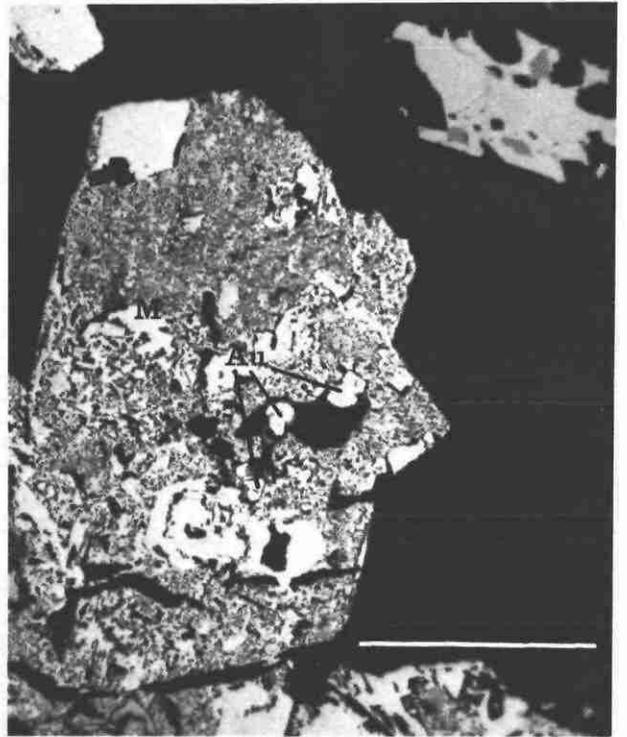
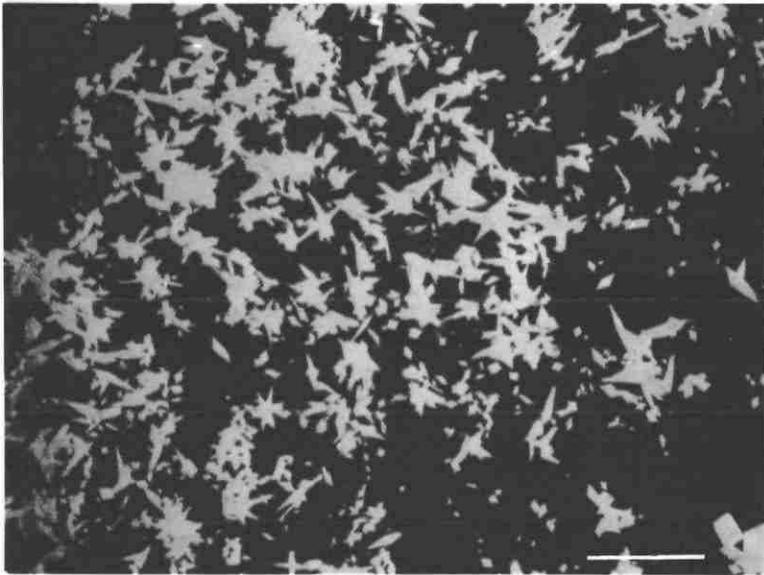
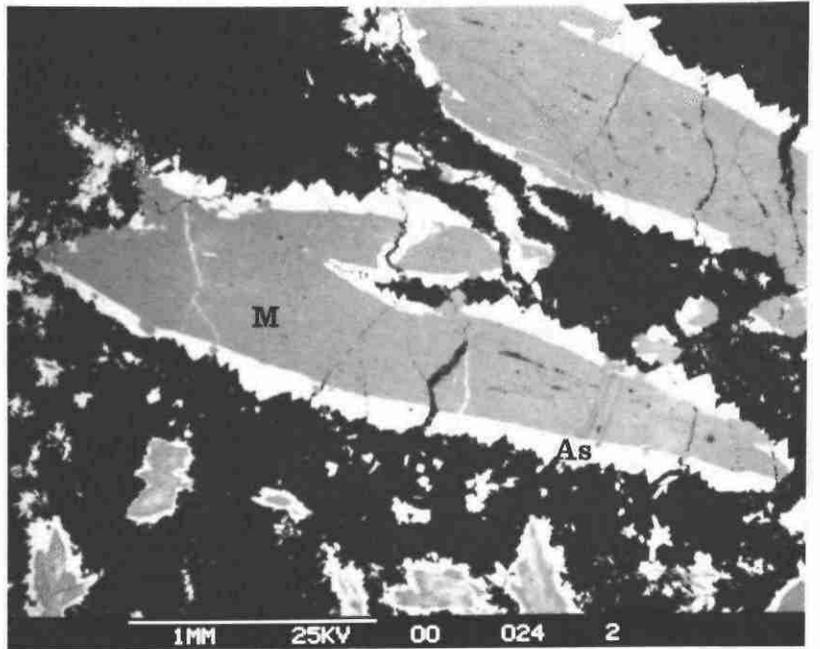
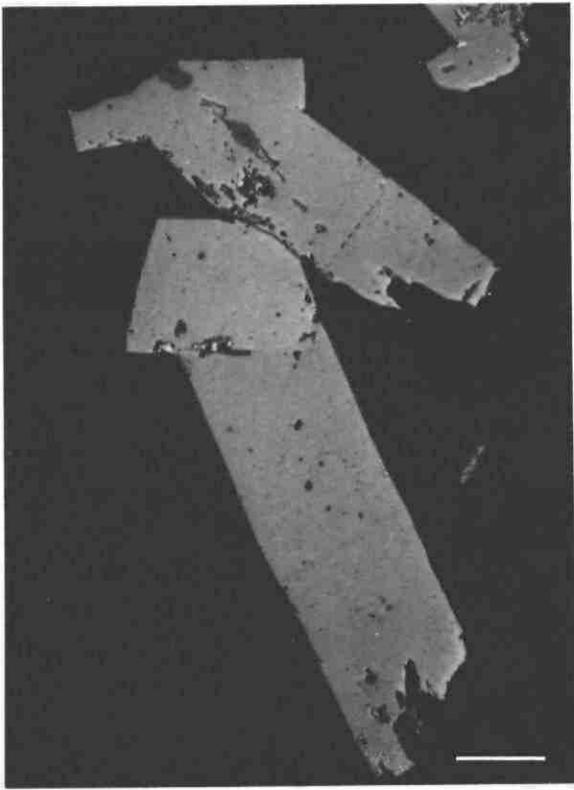


PLANCHE 3

Evolution minéralogique d'une shear zone aurifère

Stade intermédiaire : Piégeage de l'or par les sulfures

Photo 1: Grains d'or natif (Au) inclus dans divers sulfures. Le dépôt de l'or qui renferme 12% Ag, est contemporain de celui de la galène (G) mais postérieur à celui de la pyrite (Py) et de la blende (Zn). Ancienne mine d'or de la Bellière, Maine et Loire, France.

Photo 2: Situation de la photo 1 dans son contexte minéralogique. Les rubans lamellaires de marcasite (M) proviennent de la déstabilisation d'anciennes pyrrotites. L'or natif associé aux sulfures (photo 1) a été libéré par la pyrrotite lors de sa transformation en marcasite.

Photo 3: Or natif (Au) peu argentifère (25% Ag) et galène (G) cimentant des cristaux de mispikkel non aurifères. Shear zone aurifère de Laurières, Haute Vienne, France.

Ces trois photos sont des illustrations du stade (4) de la figure 8.

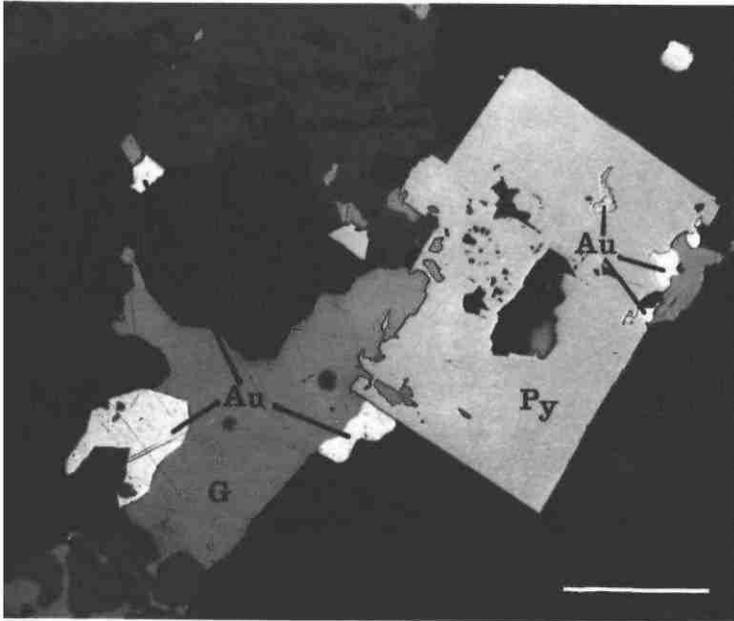
Stade tardif: pépétisation de l'or

Photo 4: Géode tardive à cristaux de quartz automorphes cimentée par de l'électrum (43% Ag). Shear zone aurifère de Labessette, Puy de Dôme, France.

Photo 5: Or géodique (électrum, 28% Ag) de la mine du Bourneix (Haute Vienne, France). L'or associé à un peu de galène (G), remplit une géode à cristaux de quartz localement automorphes et parfois tapissée d'un peu de pyrite (Py).

Ces deux photos illustrent le stade (5) de la figure 8

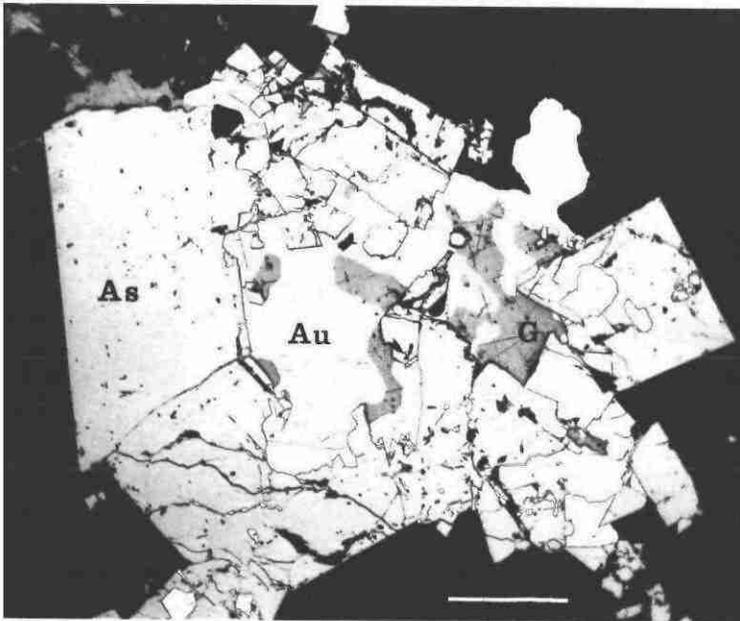
plate 3



1



2



3



5



4

Références:

AHMADZADEH H. , AURIOL M. , CALLI M. , de VAUCORBEIL H. , FOGLIERINI F. , GELAS M. , OLIVIE C. , PICOT P. et TOLLON F.(1984) Le gisement aurifère de Cros-Gallet, le Bourneix, district de Saint-Yrieix (Haute-Vienne). Chron. rech. min. n°474, p. 11-32.

Bache J.J.(1982) Les gisements d'or dans le monde. Essai de typologie quantitative . Mém BRGM n° 118.

BARTRAM J. D. et McCALL G. J. H. (1971) Wall-rock alteration associated with auriferous lodes in the Golden Mile, Kalgoorlie; Spec. Publ. geol. Soc. Aust. , pp. 191 - 199, 1971

BONNEMAISON M.(1986) Les filons de quartz aurifère: un cas particulier de shear zone aurifère; Chronique de la Recherche Minière N° 482, pages 55-66.

BONNEMAISON M.(1983) Premiers résultats de l'étude des quartz aurifères d'Afrique de l'Ouest. Rapport BRGM 83 SGN 160 GMX.

BONNEMAISON M. et ZEEGERS H. (1984) Rapport de mission en Guyane. Note BRGM GMX n° 1058

BONNEMAISON M. et BRAUX C.(1987) Le P. E. R. de Viges (Creuse) Bilan des travaux exécutés en 1985, Rapport BRGM N° 87 DAM 002 DEX

BONNEMAISON M. et BRAUX C. (1987) Le P.E.R. de Viges (Creuse), Le secteur de Viges Est (Montaguillaume), Rapport BRGM N° 87 DAM 004 DEX.

BOUCHOT V., GROS Y., CALLI M., AURIOL M., BONNEMAISON M., CHARVET J., TOLLON F.(1986) La mine d'or de Cros-Gallet, Le Bourneix (Hte Vienne, district de St Yrieix, Massif Central Français): Chronologie relative et rôles respectifs des déformations dans la mise en place de la minéralisation, Colloque PIRSEM Montpellier 1986; mém. BRGM, en cours de publication.

CALLI M., BONNEMAISON M. , AURIOL M. et TOLLON F.(1986) Etude lithogéochimique (majeurs et traces) de la minéralisation aurifère du gisement du Bourneix (Hte Vienne-District de St Yrieix-Massif Central Français): Implications pour la prospection de l'or en Limousin , Colloque PIRSEM Montpellier 1986; mém. BRGM, en cours de publication.

DAVY R., EL ANSARY M.(1986) Géochimical patterns in the laterite profile at the Boddington gold deposit ; Journal Géochimical Exploration; 26-2, p. 119- 114.

FION J. A. et CROCKET J. H.(1986) Gold Mineralisation in Strathy Township, Temagami Area, Ontario. Symposium international 'GOLD 86', Poster Paper Abstracts . Edité par A. M. Chater, Newmont Exploration of Canada Limited, Toronto, Canada.

HEATHER K. (1986); Gold Mineralisation of the Mishibishu Lake Greenstone Belt, Ontario. Symposium international 'GOLD 86', Poster Paper Abstracts . Edité par A. M. Chater, Newmont Exploration of Canada Limited, Toronto, Canada.

HUGON H.(1986) Role of shearing in gold deposition. Symposium international 'GOLD 86', Poster Paper Abstracts . Edité par A. M. Chater, Newmont Exploration of Canada Limited, Toronto, Canada.

HUGON H. (1986) The Hemlo Gold Deposit, Ontario, Canada : A Central Portion of a Large Scale, Wide Zone of Heterogeneous Ductile Shear. Proceedings of 'Gold 86' Symposium, Toronto, pp. 379-387.

JACOB M. (1985) Etude géologique, minéralogique et géochimique des anomalies en As, Sb, Au et W, et des indices minéralisés liées aux fractures régionales de la cote S E de la Nouvelle Calédonie; thèse 3^e cycle Toulouse.

KRETSCHMAR U. et SCOTT S. D.(1976) Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their applications ; Can. Mineral. 14, pp. 364-386.

MAGGION R.(1986) Etude des structures à Au-Sb de la Concession de Lubilhac (district de Brioude-Massiac, Massif Central): un exemple de shear zone aurifère; Mém. de DEA, Université d'Orléans.

MARION P., REGNARD J. R. et WAGNER F. E.(1986) Etude de l'état chimique de l'or dans les sulfures aurifères par spectroscopie Mössbauer de ¹⁹⁷Au : premiers résultats; C. R. Acad. SC. Paris, t. 302, série II, n°8, pp. 571-574.

MARCOUX E. et BONNEMAISON M. (1986) Géochimie isotopique du Pb et la prospection de l'or en France ; Colloque PIRSEM Montpellier 1986; mém. BRGM, en cours de publication.

MANN A. W.(1983) Hydrogeochemistry and weathering on the Yilgarn Block, West Australia, Ferrolysis and Heavy metals in continental brines; Geoch. and Cosmo. Acta, 47, p. 181-190.

MELLING D. R., WATKINSON D. H., POULSEN K. H., CHORLTON L. B. and HUNTER A. D.; The Cameron Lake Gold Deposit, Northwestern Ontario, Canada: Geological Setting, Structure, and Alteration. Proceedings of 'Gold 86' Symposium, Toronto, pp. 149-169.

PHILLIPS G. NEIL (1986) Geology and alteration in the Golden Mile, Kaigoorlie; Economic Geology, vol. 81, 1986, pp. 779 - 808.

PICOT P. et MARCOUX E.(1987) Nouvelles données sur la métallogénie de l'or ; Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris, t. 304, Série II, n° 6.

PLANQUE D.(1985) Etude des filons aurifères du Secteur d'Alteyrac-Pont de Rastel; Mém. de DEA, Université d'Orléans.

POULSEN K. H. (in Press): Auriferous shear zones with examples from the Western Shield; in Gold in the Western Shield Symposium, ed. L. A. Clark; Can. Inst. Mining and Metallurgy, Special Volume N° 38.

RICHARD J. L. , BONNEMAISON M., TOLLON F. (1986): Mission d'étude des mines d'or du Xinjiang, Chine; Rapport inédit SMPC Salsigne.

SCOTT S.D.(1983); Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments. Mineral. Mag. 47, PP. 427-439.

TISCHENDORF G.(1977) Geochemical and petrographic characteristics of silicic magmatic rocks associated with rare-earth element mineralisation: in Metallization associated with acid magmatism, vol.2: edited by M. Stemprock and L. Burnet, Geological Survey of Czechoslovakia, Prague, pp. 41-96.

TRAVIS G. A., WOODALL R. & BARTRAM G. D.(1971), Spec. Publs geol. Soc. Aust. , pp. 175 - 190, 1971

WEBSTER J. G., MANN A. G.(1984) The influence of climate geomorphology and primary geology on the supergene migration of gold and silver; Journal Geochemical Exploration, 22-1, p. 21-42.

WYMAN D. A., KERRICH R. and FRYER B. J.(1986) Gold Mineralisation Overprinting Iron Formation at the Agnico-Eagle Deposit, Quebec, Canada : Mineralogical, Microstructural and geochemical Evidence. Proceedings of 'Gold 86' Symposium, Toronto, pp.108- 123.