



**APPROCHE METHODOLOGIQUE EMPIRIQUE
POUR LA PROSPECTION DES MINERALISATIONS AURIFERES
PAR LE BIAIS DES MINERAUX TITANES :
CRITIQUE DE LA METHODE ET PROPOSITIONS**

V. Bouchot
J.L. Marroncle
P. Piantone
avec la collaboration de
J.C. Delille
C. Gautier
C. Nogueira
C. Beny

août 1990
R 31271

BRGM
DIRECTION DES ACTIVITES MINIERES
Département Exploration
B.P.6009 - 45060 ORLEANS Cedex 2 - France - Tél.:(33)38.64.34.34

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante:

BOUCHOT V., MARRONCLE J.L., PIANTONE P. avec la collaboration de
DELILLE J.C., GAUTIER C., NOGUEIRA C., BENY C. (1990) - Approche
méthodologique empirique pour la prospection des minéralisations
aurifères par le biais des minéraux titanés: critique de la mé-
thode et propositions. Rapport BRGM R31271, 47 p., 11 fig.,
5 tabl., 1 ann.

RESUME

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet "or-Châtelet" (RM 13B). Elle fait le bilan des travaux de méthodologie mis en oeuvre par la Direction locale de Clermont-Ferrand pour la recherche de minéraux accessoires susceptibles d'accompagner l'or ou de marquer les zones hydrothermalisées potentiellement favorables à sa concentration.

L'objectif principal de cette action a été, par une analyse des données disponibles, de tester la validité de cet outil de prospection dans le but de lui apporter les orientations qui semblent les plus pertinentes.

Les liens faits entre les résultats obtenus par l'étude des minéraux alluvionnaires dans des zones potentiellement aurifères et les données géochimiques et minéralogiques concernant le comportement du titane sur un gisement aurifère bien caractérisé, montrent l'importance du rôle joué par les espèces polymorphes du titane dans une telle démarche.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	5
1. HISTORIQUE DE LA DEMARCHE.....	7
2. METHODE EMPIRIQUE.....	9
2.1. Les huit étapes de la démarche.....	9
2.2. Applications à d'autres secteurs : confirmation de la méthode.....	18
2.2.1. Région du Sillon houiller et son prospect d'Eclache..	18
2.2.2. Prospect de Néravaud (feuille La Souterraine).....	18
2.2.3. Prospect du Châtelet.....	19
2.3. Mode d'emploi pour appliquer la méthode et impact sur la prospection.....	19
2.3.1. Mode d'emploi.....	19
2.3.2. Impact sur la prospection aurifère.....	21
3. ANALYSE DU COMPORTEMENT DU TITANE ET DE QUELQUES MINERAUX ACCESSOIRES EN ROCHE : le cas du gîte du Châtelet.....	23
3.1. Paragenèse de l'encaissant migmatitique.....	23
3.2. Stade d'altération I.....	23
3.3. Stades d'altération II et II'.....	24
4. CRITIQUE DE LA METHODE EMPIRIQUE ET PROPOSITIONS.....	27
4.1. Choix des minéraux symptomatiques.....	27
4.2. Choix des paramètres.....	28
4.3. Choix de la région de référence pour mettre au point la codification.....	31
4.4. Choix de l'arsenic comme élément géochimique majeur de l'analyse multivariée.....	31
5. DISCUSSION ET PROPOSITIONS.....	33
5.1. Utilisation de l'anatase et de la brookite.....	33
5.2. Utilisation du rutil.....	33
ANNEXE 1 - Analyse détaillée du comportement du titane et de quelques minéraux accessoires en roche dans le gîte du Châtelet, par P. Piantone.....	37
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	46
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	47

INTRODUCTION

Dans le cadre de la prospection stratégique des minéralisations aurifères, l'interprétation des données alluvionnaires en or, considérées isolément, ne permet généralement pas de remonter à la source primaire du métal jaune, ni de déterminer son origine primaire ou remaniée (problèmes de transport, de pépétisation secondaire ou de reconcentration).

La démarche, adoptée par la Direction locale de Clermont-Ferrand pour tenter d'apporter une réponse à cette problématique, s'apparente à celle mise en oeuvre pour la recherche du diamant par l'intermédiaire de ses accompagnateurs (pyrope, ilménite...). Elle est fondée sur l'observation empirique de l'abondance de minéraux titanés (et de quelques autres) dans les concentrés alluvionnaires récoltés à proximité des minéralisations aurifères, en prenant en compte les caractéristiques macroscopiques, spécifiques de chacun de ces minéraux.

En substance, pour les initiateurs de la méthode (J.C. Delille puis J.L. Marroncle), la présence de minéraux titanés dans les concentrés trace très probablement des zones d'altérations hydrothermales, pouvant être ou ne pas être en relation avec des minéralisations aurifères.

Cette méthodologie empirique, que nous allons détailler dans la première partie de ce rapport, constitue un outil de prospection **super-stratégique** des concentrations aurifères primaires, utilisé en routine par la Direction locale et ce, quel que soit le type de minéralisation prospectée (anté- ou post-métamorphe).

Le principal objectif de notre étude est de tester la validité de cet outil de prospection et de l'affiner, en faisant le lien entre la démarche empirique fondée sur l'expérience de terrain, et les résultats minéralogiques et géochimiques concernant le comportement du titane dans la zone du Châtelet (Creuse, Massif central), que nous exposerons dans la deuxième partie.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet "Or-Châtelet" (RM 13B).

1. HISTORIQUE DE LA DEMARCHE

En 1985, Mesdames Nogueira et Gautier, minéralogistes à la Direction locale de Clermont-Ferrand, remarquent l'association fréquente de particules d'or et de divers minéraux titanifères dans les concentrés alluvionnaires et montrent que ces derniers sont souvent caractérisés soit par leur abondance relative et/ou leur granulométrie grossière, soit par des caractères morphologiques particuliers.

Sous l'impulsion de J.C. Delille (juin 1985), ces associations minéralogiques sont systématiquement recherchées au sein de districts aurifères du Massif central parmi lesquels Saint-Yrieix, Prunet, Vigès, Le Châtelet, Terjat ; elles sont partiellement ou totalement retrouvées d'où l'idée que de telles associations pourraient traduire des phénomènes hydrothermaux spécifiques et favorables à la prospection des minéralisations aurifères. Le contrôle de cette hypothèse, par le biais d'une démarche qualitative, a été testé à une maille super-stratégique (1 étude de concentré pour 10 à 15 km²), dans un premier temps à l'échelle locale (feuilles de Maurs, Thiviers, Juillac, Tulle), puis de façon systématique dans la région du Morvan (15 feuilles à 1/50 000 concernées, soit 300 échantillons) où plusieurs zones hydrothermalisées favorables furent mises en évidence.

En 1987, J.L. Marroncle poursuit la démarche méthodologique afin de mettre au point une codification des concentrés visant à estimer semi-quantitativement leur potentiel hydrothermal (terrain de référence : la région de Saint-Etienne). La méthode a ensuite été appliquée à d'autres secteurs (feuilles Pontgibaud, Bourg Lastic, Evaux-les-Bains, Maringue, La Palisse, Le Donjon).

Cette démarche va être présentée de façon détaillée dans le prochain paragraphe.

2. METHODE EMPIRIQUE

Le double objectif de cette méthode est dans un premier temps, d'estimer semi-quantitativement le potentiel hydrothermal d'un domaine prospecté à l'échelle stratégique puis de cerner, dans un deuxième temps, par le biais d'une approche multivariée, des secteurs potentiellement hydrothermalisés et aurifères. La démarche adoptée a débouché sur une codification en cinq classes qui permet de juger de la qualité d'un concentré.

2.1. LES HUIT ETAPES DE LA DEMARCHE

La démarche méthodologique, initiée par J.C. Delille (étapes 1 à 2) puis poursuivie par J.L. Marroncle (étapes 2 à 8), peut être schématisée par huit étapes successives :

Etape 1 - Identification des minéraux "symptomatiques" contenus dans les concentrés de batée provenant des divers districts aurifères du Massif central français et caractérisation macroscopique de ces minéraux à la loupe binoculaire à partir de cinq paramètres considérés discriminants : habitus, abondance, granulométrie, degré d'usure et couleur des minéraux titanés et de quelques autres.

La base du raisonnement (J.C. Delille) a été acquise à partir de l'observation de concentrés alluvionnaires provenant de différents districts aurifères du Massif central français (Viges, Villeranges, Châtelet, Saint-Yrieix).

*** Identification des minéraux "symptomatiques"**

Les minéraux considérés comme des accompagnateurs de l'or dans les concentrés de batée sont les polymorphes de l'oxyde de titane ainsi que certains minéraux porteur de titane ou non :

- rutile,
- rutile magnétique (appelé "titano-ilménite"),
- anatase,
- leucoxène,
- ilménite,
- zircon atypique,
- arsénopyrite,
- minéraux de tungstène ou d'étain : wolframite, scheelite, cassitérite,
- minéraux accessoires : xénotime, monazite.

*** Choix des paramètres**

Cinq paramètres ont été retenus dans le but d'estimer au mieux le potentiel hydrothermal d'un concentré alluvionnaire :

- granulométrie des minéraux symptomatiques :
 - . grain fin : < 1 mm,
 - . grain grossier : > 1 mm ;

MINERAUX EN GRAINS NON ROULES	TYPE 1 CRITERES TRES FAVORABLES 5 points	TYPE 2 CRITERES FAVORABLES 2,5 points	TYPE 3 CRITERES VALORISANTS 0.5 point
Or	Présence		
Anatase miel, en tablettes +- cassées	Présence		
Anatase bleue en tablettes +- cassées	> 1 %	< 1 % (trace ou microtrace)	
Rutile	Grains fins > 1 % ou quelques grains grossiers	Grains fins < 1 % (trace)	
Leucoxène primaire "semi-évolué "	Grains fins > 1 % ou quelques grains grossiers	Grains fins < 1 % (trace ou microtrace)	
Rutile magnétique	Grains fins > 1 % ou quelques grains grossiers	Grains fins < 1 % (trace ou microtrace)	
Ilménite	Grains fins > 60 % ou quelques grains grossiers	Grains fins : 25 à 50 %	Grains fins : 1 à 20 %
Zircon atypique	Présence		
Arsénopyrite	Présence		
Wolframite		> 1 %	< 1 % (trace ou utr.)
Scheelite		> 1 %	< 1 % (trace)
Cassitérite		> 1 %	< 1 % (trace)
Monazite jaune			Présence
Monazite commune			> 1 %
Xénotime			Présence

Tabl. 1 - Caractérisation des critères sélectionnés et leur classement en fonction du type auquel ils appartiennent.

- habitus des grains plus ou moins cristallisés, tronqués et/ou cassés (cristaux en tablettes, en octaèdre, en agrégats...) ;
- couleur, variable pour un même minéral (anatase bleue ou jaune...) ;
- abondance relative ou absolue de minéraux par rapport à la totalité du concentré :
 - . présence ou absence,
 - . > 1 %,
 - . < 1 % (en trace ou microtrace) ;
- degré d'usure des grains.

Etape 2 - Identification des critères favorables à l'existence d'une altération hydrothermale, en fonction des cinq paramètres choisis. Ces critères doivent permettre de caractériser les concentrés alluvionnaires de référence dans le but d'évaluer semi-quantitativement leur potentiel hydrothermal.

Cette identification a été menée suivant deux approches complémentaires : dans un premier temps, l'aspect descriptif et qualitatif des critères a été pris en compte par J.C. Delille à partir de l'observation des concentrés provenant de divers districts aurifères du Massif central, dans un deuxième temps, l'aspect quantitatif (abondance relative, équivalence) a été développé par J.L. Marroncle à partir de l'observation d'un grand nombre de concentrés issus de la région de référence de Saint-Etienne.

*** Choix du terrain de référence de la région de Saint-Etienne et échantillonnage.**

Le terrain de référence, situé dans la région de Saint-Etienne, comprend quatre feuilles à 1/50 000 soit Saint-Symphorien, Saint-Etienne, Vienne et Gisors. Cette région, couverte en prospection stratégique Inventaire, a été retenue comme terrain de référence en raison du nombre important d'anomalies en or alluvionnaire et de leur apparente variété (or remanié et/ou or primaire). Seuls les concentrés de la prospection Inventaire, situés dans l'emprise et dans l'environnement proche des anomalies en or alluvionnaire, ont alors été retenus, soit un total de 400 échantillons.

*** Identification des critères**

En fonction des différents paramètres identifiés au cours de la première étape, plusieurs règles permettant de sélectionner des critères "favorables" à l'existence d'altération hydrothermale, en relation ou non avec des minéralisations aurifères, ont été établies (tabl. 1). Et afin de prendre exclusivement en compte les minéraux alluvionnaires symptomatiques les plus proches de leur source primaire, on a négligé la fraction de grains moyennement à fortement usés (roulés).

Globalement, ont été établies les règles suivantes :

- plus un minéral titanifère est gros et plus il est "favorable" ;
- plus un minéral titanifère est abondant et plus il est "favorable" ;
- à faible quantité égale, les différents polymorphes d'oxydes de titane (rutile et anatase) apparaissent plus "favorables" que l'ilménite (généralement abondante).

De plus, au niveau d'un minéral symptomatique, les auteurs considèrent que :

- la présence d'or, même en faible quantité, constitue un critère très favorable. Quant à la taille et la forme des particules, elles n'ont pas été prises en considération ;
- pour le rutil et le leucoxène :
 - . à quantité égale, de gros grains de rutil, de rutil magnétique ou de leucoxène sont plus "favorables" que des grains fins de même nature ;
 - . quelques gros grains de rutil, de rutil magnétique ou de leucoxène équivalent plus ou moins à des grains fins en proportion $>$ à 1 % du concentré total. Mais de façon générale, on privilégie l'existence de gros grains de rutil ($>$ 1 mm), qui sont considérés comme indicateur d'une source proche ;
- pour l'anatase :
 - . uniquement par sa présence dans le concentré (au même titre que l'or), l'anatase miel en tablettes (plus ou moins cassées) s'avère très "favorable" alors que l'anatase bleue est d'autant plus intéressante qu'elle est abondante ;
 - . l'habitus en plaquette est plus "favorable" que celui en octaèdre ;
- pour l'ilménite :
 - . plus l'ilménite est présente sous forme de gros grains et plus elle est "favorable" : ainsi, quelques gros grains d'ilménite équivalent à une grande quantité de grains fins. Mais de façon générale, comme pour le rutil, on privilégie l'existence de grains grossiers ($>$ 1 mm) ;
 - . quand elle est à grain fin, l'ilménite est d'autant plus "favorable" qu'elle est présente en très grande quantité ($>$ 60 %) par rapport au volume total du concentré ;
- certains minéraux non titanés peuvent parfois être discriminants :
 - . la présence d'arsénopyrite, généralement rare dans les concentrés de batée compte tenu de sa faible résistance à l'altération météorique, est très "favorable" en raison des relations privilégiées qui existent entre ce sulfure et certains types de concentrations aurifères ;
 - . la présence de zircon atypique, en raison de leur couleur rose ou de leur forme trapue ou en goutte, est très "favorable" ;
 - . la proportion d'oxydes de tungstène (wolframite ou scheelite) et d'étain (cassitérite) supérieure à 1 % (ou la présence en trace) est "favorable" au même titre que certains minéraux accessoires tels que le xénotime ou la monazite. Pour J.C. Delille (comm. person.), ces différents minéraux sont en rapport avec la spécialisation granitique (l.s.) ou avec l'hydrothermalisme lié aux granitoïdes.

Fondamentalement, selon J.L. Marroncle, un critère "favorable" ne définit pas, à lui seul, la qualité globale du concentré mais celle-ci résulte du cumul de plusieurs critères "favorables" identifiés au sein de ce concentré ; ce cumul constitue en fait une sorte de pondération qui permet d'atténuer la sur- ou sous-estimation d'un concentré.

Notons que les étapes suivantes (n°3 à n°8) ont été exclusivement développées à partir de l'étude des concentrés de la région de référence de Saint-Etienne (par J.L. Marroncle).

Etape 3 - Hiérarchisation et quantification des critères identifiés, en fonction de leur importance (3 types).

En fonction de l'abondance variable de certains minéraux et plus généralement des règles énoncées ci-dessus, trois types de critères d'importance décroissante ont été retenus ; ils sont présentés dans le tableau 2 :

- type 1 : critères très favorables → 5,0 points,
- type 2 : critères favorables → 2,5 points,
- type 3 : critères valorisants → 0,5 points.

Chacun des critères reçoit un nombre de points (5, 2,5 ou 0,5 points) en fonction du type (1, 2 ou 3) auquel il appartient.

Etape 4 - Réalisation d'une carte d'identité pour chacun des concentrés de la région de référence (Saint-Etienne).

La réalisation de la carte d'identité d'un concentré, dont un exemple est présenté dans le tableau 2, a pour but de caractériser ce concentré en fonction des six paramètres : minéralogie, abondance, couleur, habitus, granulométrie, degré d'usure.

Dans un deuxième temps, parmi ces caractéristiques, seuls les critères "favorables" sont retenus puis quantifiés (tabl. 3). Finalement, on réalise le total des points attribués à chaque critère recensé, en fonction du type auquel il appartient.

Etape 5 - Comparaison de la valeur de ces différents concentrés caractérisés par un total de points pour ensuite définir cinq classes de "qualité des concentrés". Les coupures de ces classes ont été déterminées à partir de l'émergence de plusieurs populations de concentrés de qualité variable, suite à cette comparaison.

La classe de qualité, qui caractérise un concentré alluvionnaire, correspond à une évaluation semi-quantitative de son potentiel hydrothermal.

- classe A : > 20 points,
- classe B : 15 à 19,5 points,
- classe C : 10 à 14,5 points,
- classe D : 6 à 9,5 points,
- classe E : < 6 points.

Les coupures définissant ces cinq classes ont été établies à partir des résultats méthodologiques obtenus sur la région de Saint-Etienne. Depuis, les applications multiples réalisées semblent indiquer que ces coupures peuvent être adoptées pour d'autres régions du Massif central (cf. § 2.2).

Les concentrés des classes A et B sont considérés comme caractéristiques de zones hydrothermalisées favorables alors que ceux des classes D et E caractériseraient des zones distales ou des minéralisations remaniées. Les concentrés de la classe C, d'interprétation plus délicate, sont à pondérer en fonction de l'environnement. Fruit de l'expérience acquise, une classe intermédiaire C+ fut introduite : elle correspond à des concentrés dont les critères qualitatifs sont

Définition de la qualité de l'hydrothermalisme par les minéraux alluvionnaires.

CONCENTRÉ Echant. N°	Or	Anatase Miel tablettes	Anatase bleue tablettes	Rutile	Ilménorutile	Ilménite	Leucoxène 1 semi-évolué	Zircons atypiques	Cassitérite	Scheelite	Wolframite	Monazite jaune	Monazite commune	Xénotime	Pyrite	Mispickel	Autres	Points	Classe
4946				Tf		60% f						5% f		mtf	mtf			8,5	D
4949			0,10	Tf 30% g		60% f				mtf		1% f						13	C
4950		0,10		mtf		50% f				mtf		3% f						8	D
4954				Tf		50% f						1% f			Tf			5,5	E
4956		0,10	0,10	Tf		10% f		ZT		mtf		Tf		mtf				16,5	B
4960		0,10		Tf		20% f 10% g				mtf		30% f		Tf				13,5	C
4963				Tf		10% f				mtf		40% f		mtf				4	E
4964			0,10	2% f		10% f				Tf		40% f		mtf				9,5	D
4967				Tf		mtf						10% f						3	E
4969			0,10	1% f		5% f				mtf							Blende 5% f	8	D
4972		0,10	0,10	Tf		40% f 25% g		ZT		mtf		10% f						20,5	A
4975				Tf		60% f	mtf			mtf		10% f						10,5	C
4980	1P	0,10	0,10	Tf 25% g		60% f 60% g		ZT		mtf		5% f			mtf			28	A
4983				1% f 20% g		50% f	3% f			Tf		2% f						13,5	C
4984		0,10	0,10	1% f 40% g		40% f 30% g		ZT 2R		Tf 1g		1% f			mtf 1g			23,5	A
4985				Tf		60% f 5% g				mtf		2% f						8	D
4989	2C 1P	0,10	0,10	Tf 30% g		40% f 40% g		ZT	mtf	mtf	mtf	5% f			Tf			28,5	A

Tabl. 3 - Attribution des points en fonction du type de critère identifié (1-2-3) pour chacun des concentrés, réalisation du total de points puis évaluation semi-quantitative du potentiel hydrothermal de chaque concentré par le biais des classes A, B, C, D ou E.

Légende : ●● critère très favorable (5 pts)
● critère favorable (2,5 pts)
◆ critère valorisant (0,5 pts)

T = trace ; mt = microtrace ; f = grain fin ; g = grain grossier
granulométrie des particules d'or : P = point ; C = couleur

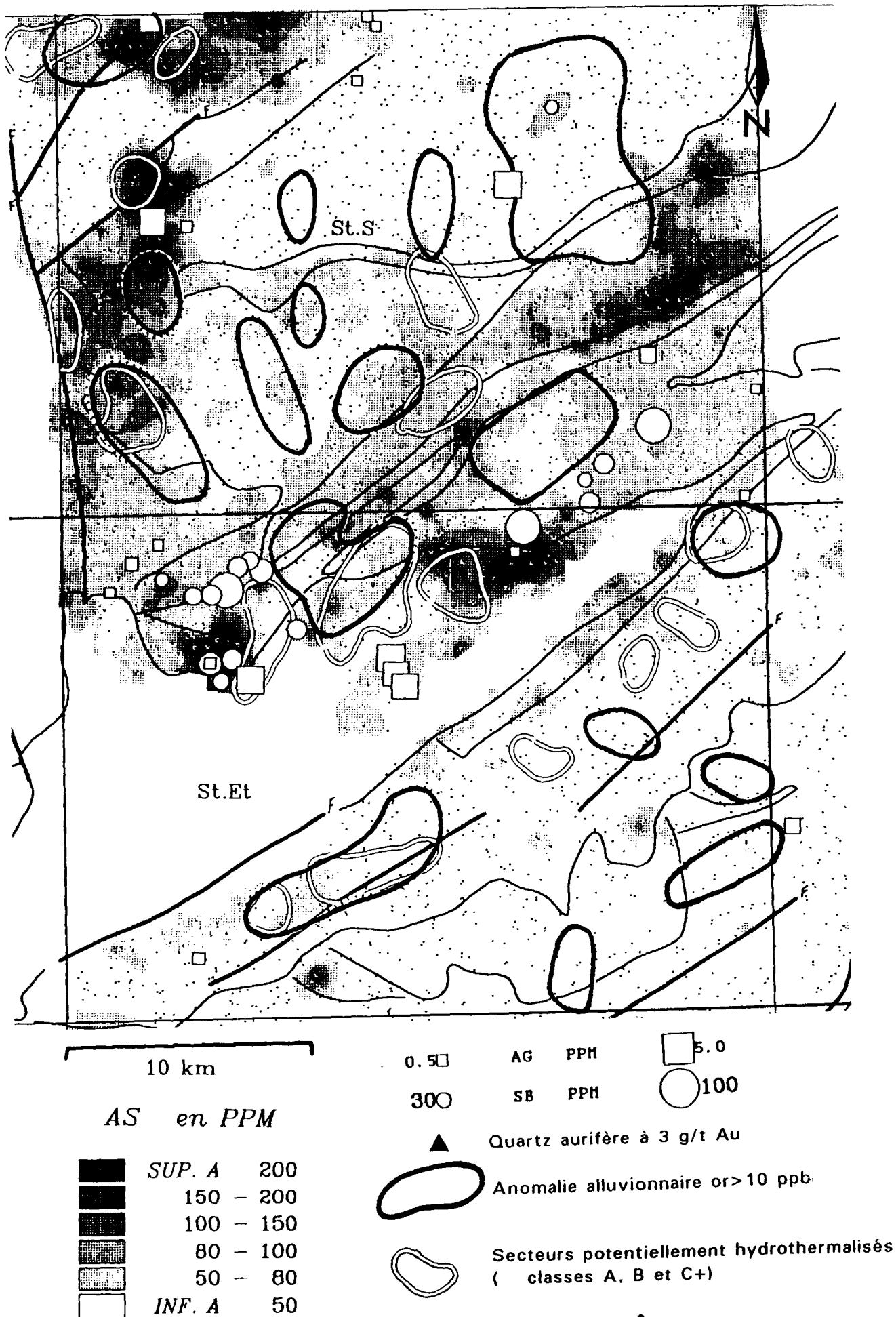


Fig. 1 - Carte de synthèse de Saint-Etienne à 1/200 000 : visualisation des secteurs potentiellement hydrothermalisés, délimités par des courbes isoclasses A, B et/ou C+ et superposition des anomalies alluvionnaires en or et des données géochimiques en arsenic.

positifs mais qui paraissent sous-estimés par le barème de notation adopté ; souvent localisés dans -ou à la périphérie- des zones favorables, ils pourraient résulter d'un échantillonnage moins représentatif (conditions de terrain, choix du site, etc.).

Après avoir estimé le potentiel hydrothermal de chacun des concentrés de la région de Saint-Etienne, il convenait d'aborder leur répartition, à l'échelle régionale puis de finaliser l'opération par une interprétation multivariée.

Etape 6 - Il résulte de l'étape n°5 que chaque concentré peut alors être "rangé" dans une des cinq classes "de qualité" (A, B, C, D, E), ce qui permet ainsi d'évaluer leur potentiel hydrothermal respectif (tabl. 3).

Etape 7 - Visualisation du potentiel hydrothermal de chacun des concentrés estimés qui se traduit par le tracé de courbes d'isoclasse de qualité, reportée sur une carte du réseau hydrographique : ces courbes permettent de délimiter des zones à plus ou moins fort potentiel hydrothermal.

Les points de prélèvements alluvionnaires respectivement accompagnés du degré de qualité de concentré (classes A, B, C, D ou E) ont ensuite été reportés sur une carte géologique à 1/200 000 de la feuille de Saint-Etienne et celle du réseau hydrographique. Des courbes "isoclasses" ont alors été tracées en prenant en compte le bassin versant représentatif de l'échantillon alluvionnaire (fig. 1) : ces courbes permettent de cerner des secteurs ayant probablement été le siège d'une ou plusieurs altérations hydrothermales (= zones potentiellement hydrothermalisées).

Etape 8 - Interprétation de ces données par le biais d'une approche combinant les courbes "isoclasses" à l'or alluvionnaire et à certains éléments accompagnateurs de la minéralisation tels que As, (Sb, Ag) géochimique. Cette interprétation multivariée permet alors d'estimer le potentiel hydrothermal et aurifère du domaine prospecté.

Cette étape doit permettre de sélectionner les secteurs au sein desquels l'altération hydrothermale est en étroite relation spatiale avec la minéralisation aurifère primaire et de rejeter ceux où ce n'est pas le cas.

Sur la carte des secteurs potentiellement hydrothermalisés (car limités par des isoclasses A, B et/ou C+), ont été superposées les données de la prospection stratégique Inventaire de Saint-Etienne (fig. 1), soit :

- les anomalies géochimiques en arsenic où $As \gg 100$ ppm ;
- la distribution des anomalies en or alluvionnaire ;
- la localisation des points géochimiques anomaux en argent et en antimoine pour des teneurs respectivement supérieures à 0,5 et 20 ppm.

Le choix de l'arsenic comme élément géochimique majeur de l'analyse multivariée réside dans le fait que, dans les minéralisations du socle hercynien français, l'or est très fréquemment associé à l'arsénopyrite, que l'or soit libre (comme à Saint-Yrieix) ou camouflé dans ce sulfure (comme au Châtelet).

Dans la région de référence de Saint-Etienne et plus particulièrement dans la partie ouest de la feuille Saint-Symphorien (fig. 1), on constate une bonne corrélation entre les anomalies géochimiques en arsenic - alluvionnaire en or et les courbes "isoclasses en titane". En revanche, dans le quart nord-est de la feuille Saint-Etienne (fig. 1), ces différents types d'anomalies ne se superposent pas et certaines à or libre seul sont probablement la trace de placers formés dans des formations de cailloutis alpins.

Le contrôle de la méthode par dosages de l'or géochimique dans l'environnement des "enveloppes anormales en As et Ti-Oxyde" et la découverte d'un indice de quartz minéralisé (4 g/t Au ; fig. 1) ont finalement permis de confirmer le potentiel aurifère de ces zones hydrothermales. On notera d'ailleurs que les secteurs favorables de la feuille Saint-Symphorien ont toutes été couvertes par des demandes de PER de la part de la COGEMA, d'HEXAMINES et du BRGM pour une prospection or. Les résultats satisfaisants obtenus dans la région de référence de Saint-Etienne autorisaient alors l'extension de la méthode à d'autres secteurs.

2.2. APPLICATIONS A D'AUTRES SECTEURS : CONFIRMATION DE LA METHODE

Après avoir été mise au point, cette méthode a été testée sur plusieurs secteurs, à l'échelle d'une feuille à 1/50 000 puis à celle d'un prospect.

2.2.1. Région du Sillon houiller et son prospect d'Eclache

A l'échelle du 1/50 000, des associations minéralogiques favorables ont été identifiées sur les feuilles de Bourg-Lastic et de Pontgibaud, notamment dans les environnements du Sillon houiller et du granite de Gelles. Dans ces secteurs, les travaux récents de COGEMA ou du BRGM ont abouti à la découverte d'indices aurifères, et notamment dans le PER de l'Eclache (à cheval sur les 2 feuilles).

Ce prospect, situé au contact sud-ouest du granite de Gelles, se caractérise par des anomalies géochimiques en As-W et en or alluvionnaire. La phase super-stratégique ayant montré la présence de concentrés favorables, la totalité des concentrés issus de la prospection Inventaire ont été systématiquement étudiés : une large enveloppe hydrothermale de classe A, B et C+ a été mise en évidence, corrélable à des réponses géochimiques Au comprises entre 10 et 45 ppb. Dans cette enveloppe, deux structures quartzeuses ont été reconnues par tranchées et sondages hydrofores avec des impacts plus ou moins ponctuels dont les teneurs sont comprises entre 1 et 9 ppm Au.

2.2.2. Prospect de Néravaud (feuille La Souterraine)

La découverte d'une minéralisation aurifère primaire sur le PER de Néravaud a été fortuite suite à des travaux de sondages réalisés pour la recherche de wolframite : la structure minéralisée a fourni des valeurs de 2 à 3,7 ppm Au sur, parfois, des puissances plurimétriques et la présence d'or libre a ensuite été confirmée par une campagne éluvionnaire.

L'étude des concentrés alluvionnaires issus de la prospection stratégique Inventaire (réalisée dans l'environnement de l'indice) a mis en évidence une enveloppe favorable (isoclasses A, B et C+) de forme elliptique, dont l'axe orienté NE-SW se superpose à la structure aurifère reconnue en sondage et en surface (fig. 2-1).

2.2.3. Prospect du Châtelet

Au nord de la Tardes, le site de la mine est marqué par un concentré de classe B tandis que l'ensemble du secteur produit des concentrés de classe C ou C+, complétés par quelques échantillons périphériques de classe A ou B (fig. 2-2).

L'étude de ce prospect soulève en fait un double problème :

- dans l'environnement proche de la mine du Châtelet, l'or alluvionnaire étant exceptionnel ou plus généralement absent, on peut penser que le potentiel des concentrés est sous-estimé. Dans le cas d'une minéralisation à or libre type Le Bourneix, ces mêmes concentrés pourraient effectivement atteindre la classe B. En conséquence, ce cas particulier suggère que l'opérateur peut avoir à pondérer au cours de l'analyse détaillée de la séquence minéralogique ;
- parallèlement, il ressort que le choix des variables de l'interprétation multisource peuvent varier en fonction du type de minéralisation prospectée. Ainsi, l'absence d'anomalie or alluvionnaire, superposée à une zone à fort potentiel hydrothermal (courbes isoclasses A, B et/ou C+) ne doit pas être un critère dévalorisant notamment dans le cas où les minéralisations aurifères primaires ne libèrent pas d'or libre dans les alluvions (cas des mispickels aurifères du Châtelet). Un raisonnement similaire est applicable dans le cas où l'or a pu être transporté loin de sa source primaire.

2.3. MODE D'EMPLOI POUR APPLIQUER LA METHODE ET IMPACT SUR LA PROSPECTION

2.3.1. Mode d'emploi

- Etape 1** - Echantillonnage de concentrés alluvionnaires à une densité de 1 pour 10 km (réutilisation des données Inventaire possible).
- Etape 2** - Réalisation d'une carte d'identité par concentré conformément à l'étape n°4 de la méthode et évaluation du potentiel hydrothermal du concentré par le biais des classes de qualité.
- Etape 3** - Tracé des courbes isoclasses pour délimiter les zones potentiellement hydrothermalisées sur une carte géologique et hydrographique.
- Etape 4** - Interprétation multivariée combinant les courbes isoclasses et les données géochimiques en As et/ou alluvionnaire en or.

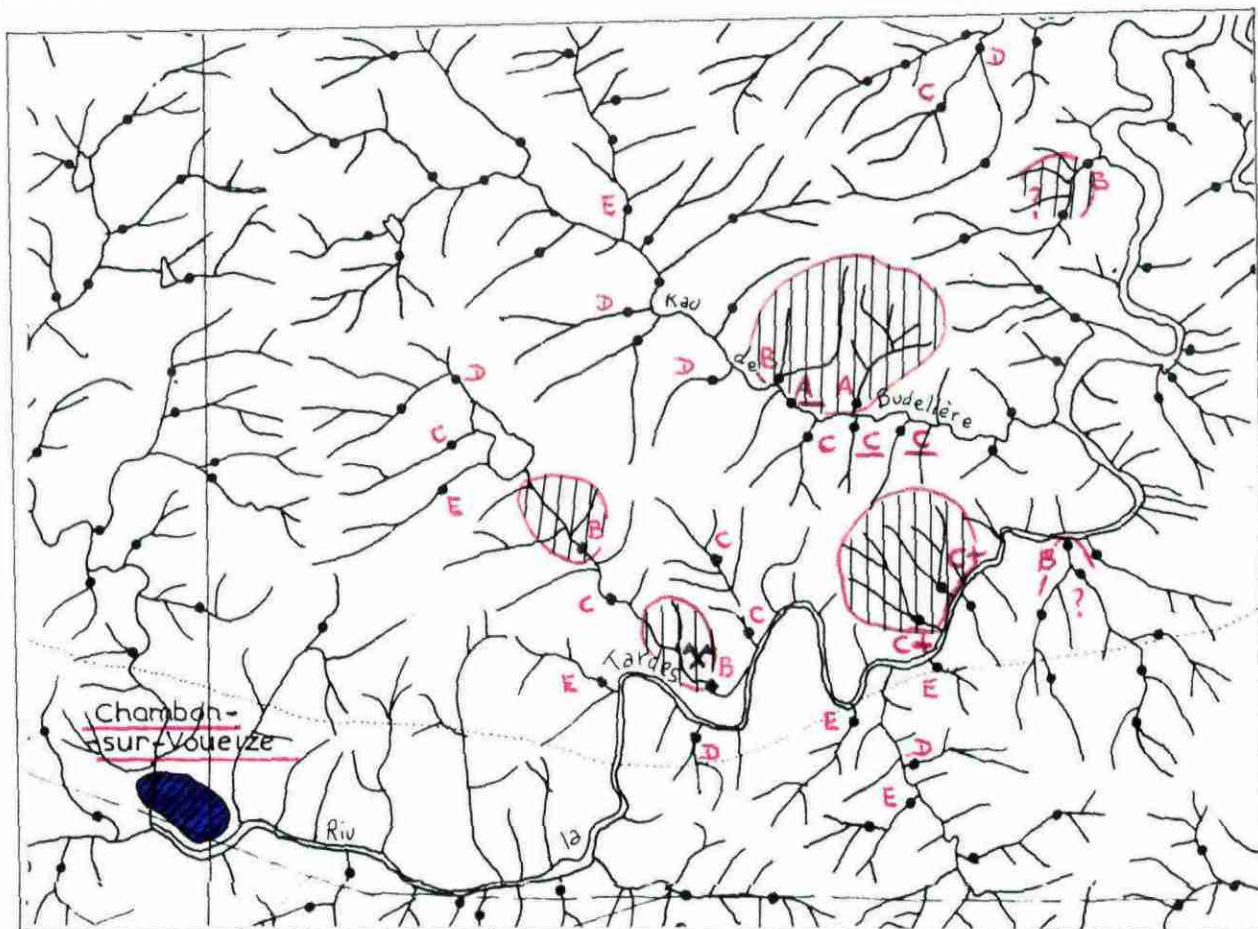
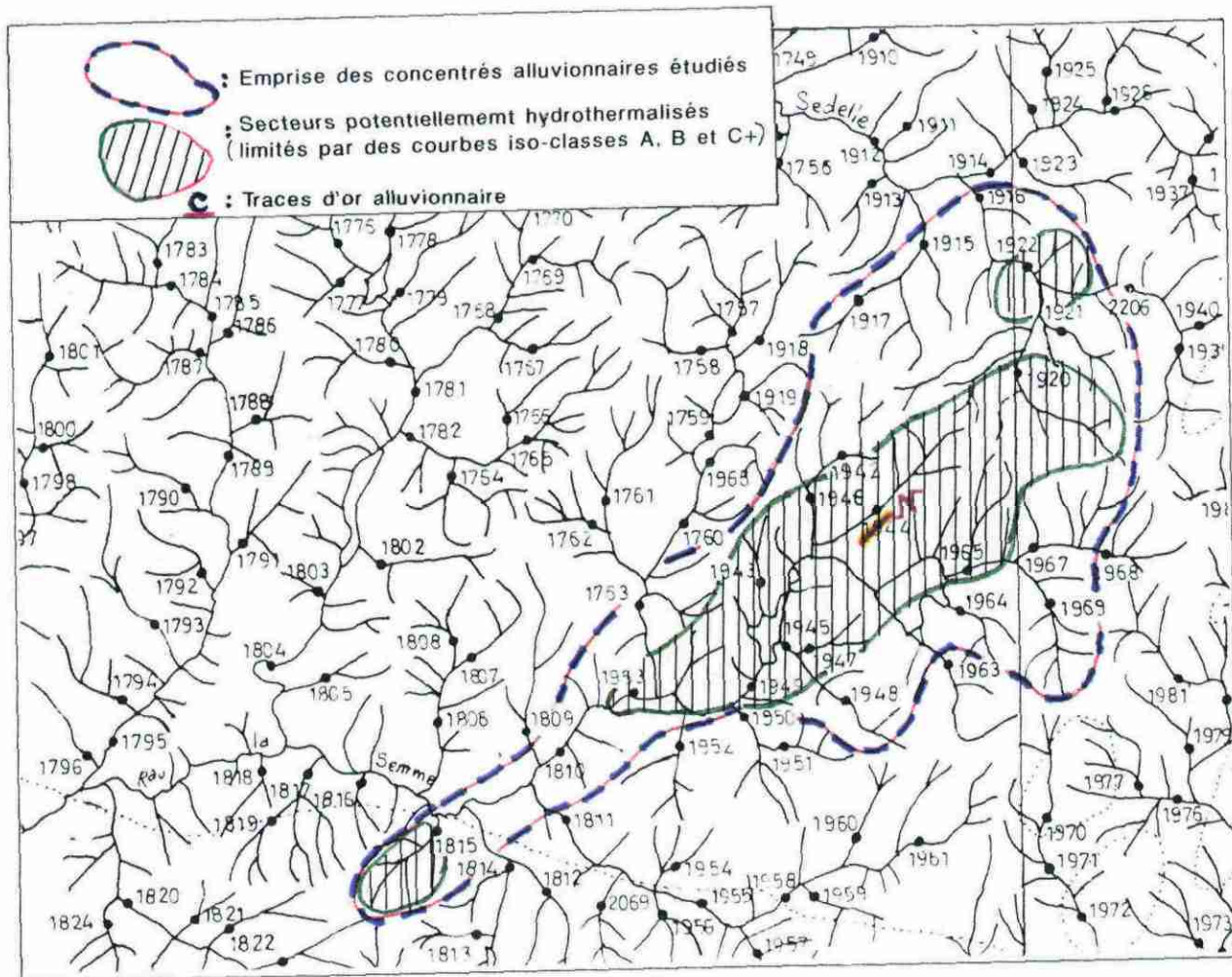


Fig. 2 - Exemple d'application de la méthode : visualisation, sur carte à 1/50 000, des secteurs potentiellement hydrothermalisés, délimités par des courbes isoclasses A, B et C+.

1- PER de néravaud (feuilles Bourg-Lastic et Pontgibaud)

~~N~~ = structure minéralisées Au-W de Néravaud

2- secteur du Châtelet (Feuille Evaux-Les Bains)

 = Mine du châtelet

2.3.2. Impact sur la prospection aurifère

L'interprétation multicritère (Au, As, isoclasses A, B et C+) permet de sélectionner, au stade stratégique, des zones à fort potentiel hydrothermal et aurifère.

- dans une zone sans indice connu et où les anomalies aurifères sont d'origine incertaine, cette méthode permet :
 - . dans un premier temps, de faire le tri entre les anomalies à or alluvionnaire exclusivement et celles présentant un intérêt car étant liées à une zone probablement hydrothermalisée (incidence des minéraux titanés) ;
 - . dans un deuxième temps, de proposer des cibles de prospection semi-stratégique au sein desquelles une étude géologique sur le terrain couplée à un resserrement en sédiments de ruisseau et alluvionnaire sont vivement conseillés ;
- dans une zone où seul un indice ou un petit groupement d'indices aurifères est connu (avec ou sans anomalie en or alluvionnaire), la méthode peut permettre de cerner la zone d'altération hydrothermale et ainsi de délimiter rapidement le périmètre d'un Permis Exclusif de Recherche.

	FACIES I	FACIES II	FACIES II'
Biotite	Chlorite/mica blanc 2, rutile, carbonates	Mica blanc 2, rutile + carbonates	Mica blanc 2'
Plagioclase	Illite/argile, carbonates	Plasma phylliteux (illite) + carbonates + silice	Plasma phylliteux + silice
Cordiérite	Illite/produits serpentiniteux	Plasma phylliteux (illite)	Plasma phylliteux (illite)
Mica blanc 1	Non touché	Visuellement non touché bien que déformé	Restes de mica blanc 1
Orthose	Non touché	Probablement phyllitisé	Non mis en évidence

Tabl. 4 - Synthèse des principaux résultats obtenus sur le Châtelet, températures estimées à partir des associations paragenétiques. (Piantone *et al.*, 1990).

3. ANALYSE DU COMPORTEMENT DU TITANE ET DE QUELQUES MINÉRAUX ACCESSOIRES EN ROCHE LE CAS DU GITE DU CHATELET

L'approche minéralogique du comportement du titane, entreprise sur la zone du Châtelet (Creuse, Massif central français), s'inscrit dans le cadre plus général de l'étude des altérations hydrothermales de ce gîte et de la certification d'outils développés pour la prospection.

Les résultats des études concernant le comportement du titane montrent que chaque altération hydrothermale mise en évidence au Châtelet (tabl. 4 ; Piantone P. et al., 1990) se caractérise par une signature spécifique en minéraux du titane (ann. 1).

3.1. PARAGENÈSE DE L'ENCAISSANT MIGMATITIQUE

L'encaissant migmatitique sain des concentrations aurifères du Châtelet se compose d'une part de quartz, plagioclase, orthose, mica blanc, cordiérite et d'autre part de biotite et d'ilménite en ce qui concerne les minéraux titanifères. Quant à la monazite, au xénotime et au zircon, ils se présentent uniquement en quantité accessoire.

3.2. STADE D'ALTERATION I

Le premier oxyde de titane apparaît pendant un stade d'altération caractérisé par une paragenèse à phengite-chlorite-rutile. Ce rutile semble se développer aux dépens de l'ilménite contenue dans l'encaissant migmatitique sain, selon le schéma de réaction suivant : ilménite + soufre (fluide) $\rightarrow$ rutile + pyrrhotite, (aucune magnétite n'ayant été observée).

L'altération à phengite-chlorite-rutile se développe préférentiellement au sein de zones de faille d'extension régionale qui portent localement des concentrations aurifères. Compte tenu de l'extension des fractures, cette altération ne permet en aucun cas de cerner précisément les lentilles minéralisées.

De plus, le rutile, marqueur de ce stade d'altération, constitue un guide de prospection très indirect puisque les liens génétiques entre cette altération et la minéralisation aurifère sont encore loin d'être démontrés : " à quoi correspond ce stade d'altération I ? " s'agit-il d'un métamorphisme rétrograde dans le faciès schiste vert ou plutôt comme cela a été démontré au Bourneix (Bouchot V., 1989), d'une altération pervasive précoce synchrone de la formation de zones de cisaillement ductiles-cassantes. Des réponses à ces questions permettraient assurément de mieux cerner la place du rutile par rapport à la minéralisation aurifère (cf. §-4).

Un apport de titane au système, véhiculé par les fluides dans les zones de fractures, n'apparaît pas nécessaire pour permettre la cristallisation du rutile, en raison de la présence d'ilménite et de

biotite dans l'encaissant sain. Par ailleurs, on peut se demander si la pyrrhotite qui accompagne le rutil ne correspond pas au porteur primaire de l'or comme le suggéraient P. Picot et E. Marcoux (1987) et comme semble l'envisager Wu Xin (Commn. pers.).

3.3. STADES D'ALTERATION II ET II'

Ces stades se traduisent par deux altérations hydrothermales, d'extension locale, caractérisées par des paragenèses à tosudite-kaolinite-sidérinite puis à illite + sidérinite, avec, dans les deux cas, expression de l'anatase et de la brookite. Ces altérations semblent accompagner la mise en place de la minéralisation, en la précédant de peu ; elles dessinent des halos, plus ou moins bien centrés autour des lentilles de quartz à mispickel aurifère.

Ainsi, au cours de ces deux stades, le rutil (stade I) est à son tour déstabilisé par les fluides hydrothermaux et se transforme en brookite et/ou anatase, selon le schéma de réaction suivant :

rutil + pyrrhotite + S (fluide) → brookite/anatase + pyrite/marcasite

Par conséquent, l'anatase et la brookite, deux espèces polymorphes de l'oxyde de titane, sont de bons marqueurs des zones intensément altérées, associées à la minéralisation. Ils peuvent ainsi jouer le rôle de traceurs de la minéralisation aurifère dans le cas du Châtelet. La distinction entre les trois espèces (rutil, anatase, brookite) pourrait donc fournir un critère de sélection des cibles de prospection fondé sur la notion de maturité d'un système hydrothermal.

Pour ce faire, il conviendrait précisément de caler, dans le temps et dans l'espace, les altérations hydrothermales par rapport à la fracturation et aux minéralisations.

De telles transformations minéralogiques (ilménite → rutil → anatase/-brookite) sont à rapprocher des résultats de F. Dachille et al. (1968) selon lesquels le rutil doit être considéré comme un minéral de haute pression et haute température alors que l'anatase et la brookite constitue des minéraux d'origine hydrothermale sous des conditions de pression-température inférieures.

En substance, sur la zone du Châtelet, les oxydes de titane constituent des minéraux caractéristiques des zones d'altération hydrothermale qui soulignent des zones de fractures. De plus, la caractérisation des polymorphes de l'oxyde de titane permet de différencier les zones hydrothermalisées d'extension régionale à rutil, des zones d'altération à anatase/brookite potentiellement centrées sur des minéralisations aurifères. L'intérêt pour la prospection peut être résumé ainsi :

ENCAISSANT MIGMATITIQUE	ALTERATION HYDROTHERMALE I	ALTERATION HYDROTHERMALE II-II'
Ilménite →	Rutile →	Anatase/Brookite
Minéral de l'encaissant migmatitique sain	Traceur stratégique des zones de fracture ayant servi de drain aux fluides des hydrothermaux I	Traceurs tactiques et semi-stratégiques de la minéralisation au- rifère du gîte du Châtelet et de son enveloppe hydrother- malisée
----->		
Temps		

4. CRITIQUE DE LA METHODE EMPIRIQUE ET PROPOSITIONS

Après avoir exposé d'une part, la méthodologie empirique et, d'autre part, les résultats de l'analyse du comportement du titane en roche, il convient de faire le lien entre ces deux démarches complémentaires dans le but de tester l'outil de prospection alluvionnaire, voire de l'affiner. Les différents choix, faits au cours de la démarche méthodologique, vont être successivement discutés.

4.1. CHOIX DES MINERAUX SYMPTOMATIQUES

Le choix des minéraux symptomatiques est globalement en accord avec les résultats minéralogiques obtenus sur la zone du Châtelet, et plus particulièrement en ce qui concerne le rutil et l'anatase qui cristallisent effectivement, dans ce secteur, au cours de processus hydrothermaux.

Traditionnellement, selon W.A. Deer *et al.* (1965), l'anatase, d'origine secondaire, se développe aux dépens de minéraux titanifères alors que le rutil constitue soit un composé d'altération hydrothermale à l'image de l'anatase, soit plus rarement un minéral primaire d'origine magmatique, ou métamorphique (même en climat catazonal !). A cet égard, si le rutil appartient à la paragenèse métamorphique ou magmatique, il ne devra donc pas être considéré comme minéral symptomatique. D'autre part et à titre indicatif, E.F. Ziv (1956) a montré que localement, le rutil peut résulter d'une déstabilisation de l'ilménite en milieu supergène.

De même, on peut se demander si tous les minéraux retenus cristallisent effectivement sous l'effet de processus hydrothermaux ?

L'ilménite, exclusivement d'origine magmatique ou métamorphique (Deer W.A. *et al.*, 1965), appartient à la paragenèse des migmatites du Châtelet. Il constitue, à ce titre, un minéral de l'encaissant non hydrothermalisé des minéralisations aurifères ; par conséquent, il ne doit pas être considéré comme un critère, même lorsqu'il est présent en grande quantité. En revanche, quantifier son abondance devrait permettre de déterminer si l'encaissant sain contient du titane "potentiellement remobilisable" ou pas.

En conséquence, une bonne connaissance de la composition minéralogique des roches métamorphiques ou ignées de la zone prospectée permettrait d'éviter de considérer comme symptomatique, certains minéraux (rutil, ilménite...) pouvant appartenir aux paragenèses primaires.

Si le leucoxène constitue un minéral d'altération météorique des oxydes de titane et non pas un minéral primaire, il ne doit pas constituer un critère à part entière mais plutôt être "comptabilisé" avec le rutil et/ou l'anatase dont il dérive. En revanche, si ce minéral vient à cristalliser au cours de l'altération hydrothermale, comme cela a déjà été démontré (Deer W.A. *et al.*, 1965), il constitue alors un critère à proprement parler. En fait, il apparaît difficile,

sur un simple examen binoculaire, de différencier les leucoxènes d'altération hydrothermale et ceux d'origine supergène.

L'or constitue un critère très favorable quelle que soit la composition minéralogique du concentré dans lequel il a été observé. Toutefois, l'auteur de la méthode précise que dans certains cas, l'opérateur doit pondérer le résultat pour cause de sous-estimation (cas du Châtelet cf. § 1.2.3) ou sur-estimation (cas d'un or déplacé ou remanié : effet de pépité) du potentiel hydrothermal des concentrés. En fait, dans le but d'éviter une estimation biaisée des concentrés, il est souhaitable que l'or soit exclu des critères ; une telle exclusion est d'autant moins problématique que l'or alluvionnaire rentre en ligne de compte, quand il est présent dans les alluvions, dans l'interprétation multivariée.

L'idée, qui soutend le choix de la wolframite, de la scheelite et de la cassitérite, s'avère lourde de sens : elle suppose que les minéraux à tungstène et à étain caractéristiques des gîtes de type "départ acide" peuvent avoir des liens privilégiés avec les minéralisations aurifères. A cet égard, le rôle thermique et/ou mécanique des granites dans la mise en place des minéralisations aurifères est fréquemment mis en avant (Colvine A.G. et al., 1988 ; Bouchot V., 1989, etc.) ; toutefois, notons d'une part que l'influence de ces granites mériterait d'être largement nuancée en fonction du type de gîte aurifère étudié et d'autre part que l'hypothèse de deux types de minéralisations télescopées ne doit pas être sous-estimée. A cet égard, la scheelite et/ou la cassitérite peuvent se rencontrer dans d'autres types de gîtes tels que les amas sulfurés (cassitérite à Neves Corvo) ou les skarns (or et tungstène à Salau).

Enfin, en ce qui concerne la brookite, elle n'est pas prise en compte comme critère de sélection dans la méthode en raison d'un problème d'identification macroscopique : en effet, elle a l'aspect du rutile et se trouve généralement regroupée avec ce dernier.

4.2. CHOIX DES PARAMETRES

En ce qui concerne l'habitus et la couleur spécifiques des oxydes de titane et notamment l'anatase (bleue ou jaune, en tablette ou en octaèdre), aucune recherche n'a été menée dans ce sens qui permettraient de proposer une explication.

En guise de voie de recherche, on remarque que les minéraux accessoires retenus comme critères valorisants tels que la monazite, le zircon ou le xénotime sont des constituants de la paragenèse migmatitique saine. Toutefois, ceux-ci pourraient effectivement devenir intéressants quand ils présentent une forme ou une couleur singulière :

- la couleur jaune de la monazite n'est-elle pas une caractéristique des monazites hydrothermales ? ... comme c'est le cas d'anatases bleues rencontrées en grands cristaux dans des veines de quartz à Slidre (Norvège) ;
- une partie du xénotime n'est-il pas d'origine hydrothermale ? selon G.W. Robinson (1978), ce minéral cristallise parfois en épitaxie sur du zircon dans les zones de circulation de fluides ;

- le zircon, réputé classiquement inerte au cours d'une altération, se caractérise par une **forme en goutte ou trapue**, ou par une **couleur rose** : ces singularités ne résultent-elles pas de phénomènes mal cernés (mécanique, épitaxie...) contemporains d'altération d'origine magmatique comme le suggère J.C. Delille ?

En ce qui concerne les paramètres "**abondance et granulométrie**" des minéraux titanifères, ils tiennent une place importante dans l'identification des critères de la méthode. D'ailleurs, il est logique de penser que la quantité de minéraux d'origine hydrothermale présents dans un concentré est proportionnelle à l'extension de la zone altérée et, pourquoi pas, à l'intensité de cette altération (toute proportion gardée compte tenu des phénomènes d'enrichissement alluvionnaire).

D'autre part, à quantité égale, le fait de privilégier un grain grossier par rapport à un grain fin dépend probablement de processus de néogénèse blastique synchrone de l'altération hydrothermale. Par exemple, dans une roche encaissante saine où la taille des minéraux porteurs de titane, tels que l'ilménite, ne dépasse pas 500 μm , on peut penser que la cristallisation de gros oxydes (> 1 mm) résulte effectivement d'une néogénèse suite à un transport du titane.

Dans cet esprit, la granulométrie des grains de rutile pourrait effectivement, comme le propose la méthode, constituer un critère discriminant permettant de déterminer l'origine primaire ou secondaire des grains de rutile présents dans un concentré de batée : les petits cristaux ($\times 50 \mu\text{m}$) ne seraient pas d'origine métamorphique ou ignée alors que les gros rutilles relèveraient plutôt de la paragenèse hydrothermale ?

Ces différentes remarques soulèvent le problème de la mobilité du titane dans une zone de faille où circulent des fluides :

- M. Bonnemaïson et E. Marcoux (1990) pensent que, dans les gîtes de type "zone de cisaillement aurifère", l'altération précoce provoque la libération du titane contenu dans les minéraux titanifères de l'encaissant : une part du titane précipite in situ sous forme de rutile alors qu'une autre partie va circuler dans la zone de fracture puis précipiter. D'ailleurs, V. Bouchot (1989) constate que, dans le gisement du Bourneix, des oxydes de titane (indéterminés), globulaires, pleins ou vacuolaires, cristallisent effectivement au cours d'une altération pervasive précoce ;
- G.K. Czamanske et al. (1981) ont mis en évidence le comportement mobile du titane dans l'environnement des porphyry coppers ;
- dans l'encaissant proximal de l'amas sulfurés de Chessy, M. Poupon (1989) démontre que le titane est mis en mouvement avant de cristalliser sous la forme de chapelet de rutile ; cet élément serait apporté au système par les fluides hydrothermaux. En fait, ce dernier point soulève le problème de la source du titane : est-il issu de l'encaissant immédiat voire de la série sous-jacente ou est-ce un apport juvénile ?

En substance, le titane, réputé autrefois inerte, apparaît parfois comme un élément relativement mobile dans les drains hydrothermaux, et qui peut être soit apporté par les fluides hydrothermaux et/ou libéré suite à une déstabilisation des minéraux titanifères de l'encaissant.

MINERAUX EN GRAINS NON ROULES	TYPE 1 CRITERES TRES FAVORABLES	TYPE 2 CRITERES FAVORABLES	TYPE 3 CRITERES VALORISANTS
Anatase miel, en tablettes +- cassées	Présence		
Anatase bleue en tablettes +- cassées	> 1 %	< 1 % (en trace ou µtrace)	
Rutile non métamorphi- que (+- leucoxénisé)	Grains fins > 1 % ou quelques grains grossiers	Grains fins < 1 % (en trace)	
Rutile magnétique	Grains fins > 1 % ou quelques grains grossiers	Grains fins < 1 % (en trace ou µtrace)	
Leucoxène primaire	Grains fins > 1 % ou quelques grains grossiers	Grains fins < 1 % (en trace ou µtrace)	
Arsénopyrite	Présence, dans le cas de minéralisations Au-As		
Zircon atypique	Présence ?		
Wolframite		> 1 % ?	< 1 % (trace ou µtr.)
Scheelite		> 1 % ?	< 1 % (en trace)
Cassitérite		> 1 % ?	< 1 % (en trace)
Monazite jaune			Présence ?
Monazite commune			> 1 % ?
Xénotime			Présence

Tabl. 5 - Critères retenus suite à la critique de la méthode.

4.3. CHOIX DE LA REGION DE REFERENCE POUR METTRE AU POINT LA CODIFICATION

En ce qui concerne le choix du terrain ayant servi de référence pour mettre au point la codification, on peut regretter que celui-ci n'est pas été choisi dans un district renfermant des minéralisations primaires mieux connues. En effet, un tel choix permettrait de mieux caractériser le contenu des concentrés alluvionnaires par rapport aux paragenèses de la zone hydrothermalisée et de la minéralisation aurifère.

4.4. CHOIX DE L'ARSENIC COMME ELEMENT GEOCHIMIQUE MAJEUR DE L'ANALYSE MULTIVARIEE (étape n° 8)

Ce choix réside dans le fait que le mispickel et l'or sont très généralement associés au sein des minéralisations aurifères, que l'or soit libre ou camouflé dans le mispickel. D'ailleurs, selon M. Bonnemaïson et E. Marcoux (1987), cette association caractérise les gîtes de type "zone de cisaillement aurifère" du socle hercynien.

Toutefois, dans certaines minéralisations aurifères de type veine, l'association As-Au peut être remplacée par d'autres associations de types Cu-Au (district de Chibougamau, Québec), W-Au (Salau) ou Mo-Au, etc. Cu, W, Mo constituant alors les accompagnateurs majeurs de la minéralisation. D'autre part, dans le socle briovérien, l'amas sulfuré de Rouez (Sarthe), à métaux de base et or (1,5 ppm), se caractérise par une paragenèse ne contenant pas d'arsénopyrite (Fe, Pb, Cu, Zn). Par ailleurs, dans les rares lentilles aurifères de l'amas de Sain-Bel, Au est associé à Zn (sans mispickel).

Ainsi, bien que très fréquent, l'arsenic ne constitue pas un accompagnateur universel des minéralisations aurifères. Par conséquent, avant d'entreprendre l'interprétation multivariée, le choix des variables (éléments géochimiques) est fondamental et implique une connaissance -même sommaire- de la signature de la minéralisation aurifère recherchée, ce qui peut poser des problèmes lorsque la région prospectée est vierge d'information.

En conclusion, la démarche empirique, fondée sur le comportement du titane dans les zones hydrothermalisées, propose un outil de prospection super-stratégique, scientifiquement valable, qui peut être amélioré en ce qui concerne le choix de certains critères (tabl. 5) :

- exclure l'ilménite et l'or des critères favorables ;
- comptabiliser les grains de leucoxène comme les grains de rutilé ou d'anatase, altérés, quand il s'agit de leucoxène résultant de processus d'altération météorique ;
- tenter de distinguer la brookite des autres oxydes de titane en fonction de l'habitus et /ou de la couleur des cristaux.

Cette analyse critique de la méthode permet de lancer une discussion en posant les problèmes encore à résoudre et en proposant des voies de recherches dont les résultats pourraient avoir une incidence sur la prospection.

5. DISCUSSION ET PROPOSITIONS

Au Châtelet, la spécificité de l'anatase et de la brookite par rapport au rutile, résultant de déstabilisations minéralogiques en cascades au cours de l'altération hydrothermale, pourrait servir de guides pour la recherche de nouvelles minéralisations aurifères d'intérêt économique dans ce district.

En effet, l'anatase et la brookite constituent des minéraux traceurs de l'altération hydrothermale centrée sur les lentilles de mispickel aurifère alors que le rutile joue le rôle de traceur stratégique de l'altération du stade précocé. De ce fait, alors que l'outil superstratégique permet de délimiter des zones probablement hydrothermalisées, une utilisation de la spécificité de l'anatase et de la brookite par rapport au rutile pourrait permettre de cerner des secteurs renfermant des minéralisations aurifères primaires.

Pour utiliser au mieux ces signatures minéralogiques dans un but de recherche minière, plusieurs pistes de recherche peuvent être envisagées.

5.1. UTILISATION DE L'ANATASE ET DE LA BROOKITE

Dans cette optique, différencier la brookite des autres oxydes de titane dans un concentré de batée devient alors un passage obligé. Pour réaliser cette distinction, il conviendrait de mettre au point une typologie des polymorphes de l'oxyde de titane en fonction des formes et des couleurs, ce qui apparaît pour l'instant difficile à réaliser compte tenu d'une grande similitude entre les espèces polymorphes.

Si toutefois une telle distinction macroscopique s'avère impossible à réaliser, l'utilisation de la sonde Raman permet facilement de différencier les trois grandes espèces d'oxyde de titane par le biais de leur spectre spécifique ... mais à un coût beaucoup plus élevé qu'une simple détermination macroscopique.

5.2. UTILISATION DU RUTILE

L'utilisation du rutile comme guide stratégique des zones hydrothermalisées implique une meilleure connaissance du stade d'altération précocé au cours duquel cet oxyde apparaît. A cet égard, plusieurs questions peuvent être posées :

- cette altération précocé se développe-t-elle préférentiellement au sein de zones de fractures ? d'autre part, les fluides hydrothermaux circulent-ils pendant ou après l'événement cisailant ?

ou

- s'agit-il plutôt d'une altération de type propylitique résultant du refroidissement du bâti migmatitique et se développant régionalement à l'échelle du massif ?

Pour répondre à ces questions, il serait souhaitable de caractériser la géométrie de la zone d'altération précoce (stade I) du Châtelet : altération homogène généralisée à l'échelle d'un massif ou préférentiellement le long de zones de fracture d'extension variable. Dans le cas d'une altération le long d'accidents jouant un rôle de drain : de quel type de fracture s'agit-il (faille ductile, cassante ou intermédiaire) ? Quand se développent-elles dans le bâti par rapport à l'altération (altération syn- ou post-tectonique) ? ces fractures portent-elles localement la minéralisation ? A ce stade de la réflexion, tenter de caler la phase d'altération précoce par rapport à la fracturation et à la mise en place de la minéralisation devient essentiel. Une telle étude devrait par ailleurs permettre de déterminer si il existe, en dehors de la proximité spatiale, une relation génétique entre la minéralisation et l'altération à rutile.

En parallèle et en guise de comparaison, on peut aborder cette problématique par le biais des altérations précoces à phengite-chlorite-oxyde de titane décrites dans un grand nombre de districts aurifères du Massif central (ex. : Villeranges, Saint-Yrieix) mais aussi dans des zones non minéralisées (ex. : Fombillou). A titre d'exemple :

- au Bourneix (Bouchot V., 1989), l'altération précoce se développe, de façon syntectonique, au sein de zones de cisaillement ductiles-cassantes d'extension décakilométrique, postérieurement à la mise en place de dykes de granite. Les mylonites renferment des concentrations aurifères non économique (< 1 ppm) et, de ce fait, cette altération apparaît génétiquement liée à la minéralisation ;
- à Villeranges (Boiron M.C., 1988), l'altération précoce présente une extension régionale, mais se développe à proximité de la zone de cisaillement ductile de la Marche. Elle affecte l'ensemble du bassin volcano-sédimentaire viséen (325 Ma) et partiellement son encaissant granitique : elle se manifeste par une altération diffuse des volcanites. Selon l'auteur, ce stade précoce n'aurait pas de rapport direct avec les stades de cristallisation des paragenèses sulfurées aurifères ;
- le granite de Fombillou (Aveyron) est affecté par une altération pervasive précoce de type propylitique qui apparaît diffuse et généralisée à l'échelle du batholite (Proust D., 1987). Celle-ci résulte probablement de l'effondrement thermique lié au refroidissement du granite.

A travers ces exemples, on mesure la diversité des mécanismes régissant ce type d'altération à phengite-chlorite (origine des fluides, type d'altération) ainsi que la variété des encaissants hydrothermalisés (paragneiss, migmatites, tufs, granites).

Dans un souci d'ouverture, on peut se demander si les guides de prospection (altérations) applicables sur le gîte du Châtelet sont extrapolables à d'autres types de minéralisations aurifères tels que les lentilles minéralisées à or libre du type Bourneix ou les amas sulfurés minéralisés à or de type Rouez ou Sain-Bel (Au-Zn) ? Plus globalement, les déstabilisations en cascade décrites au Châtelet :

- sont-elles spécifiques des altérations associées aux concentrations à mispickel aurifère ?

- sont-elles plus largement caractéristiques des minéralisations aurifères ?
- peuvent-elles caractériser des zones hydrothermales sans relation avec des concentrations aurifères ?

Pour tenter de répondre à ces questions, trois types d'approche complémentaires peuvent être envisagés :

- **Approche bibliographique concernant les domaines de stabilité des minéraux**

Une recherche bibliographique détaillée sur l'expression et la stabilité des différents oxydes de titane et minéraux titanifères en fonction des conditions pression-température (notamment en ce qui concerne les conditions régissant la mise en place des minéralisations aurifères), devrait permettre de mieux cerner l'origine -métamorphique, mésothermal, épithermal, supergène- de ces minéraux lorsqu'ils sont présents dans les roches comme dans les alluvions.

- **Approche géochimique**

La réalisation d'un bilan chimique, à partir de l'analyse en roche d'une structure aurifère et surtout de son encaissant hydrothermalisé et sain, doit permettre de cerner le comportement du titane (et son origine) au cours d'altération hydrothermale, par rapport à celui des autres éléments et notamment des éléments immobiles. Deux types de bilan peuvent être envisagés (cf. cas des amas sulfuré de Chessy - Poupon M., 1990) : un bilan à volume constant et un bilan par comparaison avec un élément immobile.

- **Approche minéralogique**

L'étude du comportement du titane dans différents districts aurifères de références, où la minéralisation primaire est bien connue, tels que certains gîtes hercyniens (Saint-Yrieix, Villeranges, Vigès, Rouez, Sain-Bel), ou protérozoïques (d'Afrique, du Canada, etc.), devrait permettre d'identifier, d'une part les caractéristiques communes de ces différents districts et, d'autre part leurs spécificités propres.

Une telle approche a déjà été initiée par J.C. Delille à la division de Clermont-Ferrand, en prenant comme terrain de référence des gîtes de type "zone de cisaillement aurifère" du Massif central français. Il montre que, dans les concentrés, les minéraux titanés accompagnateurs de la minéralisation aurifère présentent des caractéristiques spécifiques -nature, granulométrie, habitus des grains- en fonction du type de gîte dont ils dérivent :

- les minéraux spécifiques des gîtes de type Bourneix (à or libre) sont le rutile (± transformé en leucoxène) et le rutile magnétique, qui se présentent en grain "anormalement" grossier (> 1 mm). Les minéraux secondaires sont la scheelite et la cassitérite et les minéraux accessoires, l'anatase bleue ou jaune, la monazite, le xénotime et le sphène ;

- le minéral spécifique des gîtes de type Châtelet/Viges (or camouflé dans le mispickel) est l'anatase ($\pm$ transformé en leucoxène) qui se présente en grain fin. Les minéraux secondaires sont l'ilménite, le zircon "rose" atypique, la scheelite et la cassitérite et les minéraux accessoires, la monazite, l'apatite et le sphène.

Cette première approche typologique tend à montrer que le comportement du titane varie en fonction du type de gîte aurifère. Une telle typologie mériterait d'être détaillée et approfondie en prenant en compte d'autres types de gisements tels que les amas sulfurés à or.

Pour conclure, alors que l'outil **super-stratégique** prend en compte les caractères communs des différents types de gîtes aurifères (présence d'oxydes de titane plus ou moins identifié), ne serait-il pas judicieux de mettre au point un **outil tactique** propre à chacun des types de gîtes en se basant respectivement sur les caractéristiques spécifiques de ces gîtes ? Dans l'affirmative, pour être employé à bon escient, un tel outil devrait être utilisé sur un secteur où le type de minéralisation recherchée est d'avance connu. Pourtant, est-il opportun de proposer un outil de prospection tactique fondé sur la spécificité du rutil et de l'anatase alors que la géochimie en sol est généralement performante ?

En revanche, après avoir été affiné, l'outil **super-stratégique** mis au point par la division minière pourrait être testé sur de grands domaines, mal connus d'un point de vue minier (cas de certains pays en Afrique, etc.) : l'objectif étant de cerner très rapidement et à un coût peu élevé (compte tenu de la faible densité d'échantillonnage) des secteurs potentiellement aurifères. La zone explorée pourrait être limitée dans un premier temps aux accidents majeurs d'extension crustale, marqués par des linéaments satellitaires ou des discontinuités radar. On rappelle qu'une connaissance, même sommaire, de la géologie du bâti s'avère indispensable pour mener à bien une telle exploration.

ANNEXE 1

ANALYSE DETAILLEE DU COMPORTEMENT DU TITANE
ET DE QUELQUES MINERAUX ACCESSOIRES EN ROCHE

DANS LE GITE DU CHATELET

par P. PIANTONE et C. BENY

L'approche minéralogique du comportement du titane, entreprise sur la zone du Châtelet (Creuse, Massif central français), s'inscrit dans le cadre plus général de l'étude des altérations hydrothermales de ce gîte. Les résultats des études, concernant le comportement du titane, montrent qu'au cours des altérations hydrothermales (s.l.) mises en évidence au Châtelet (Piantone P. et al., 1990), les minéraux titanifères se transforment.

1. Nature et distribution des faciès hydrothermaux du Châtelet

Les migmatites, qui constituent l'essentiel de l'encaissant affecté par l'altération hypogène, montrent une minéralogie monotone. Les phases primaires les plus communément répandues sont le quartz xénomorphe, le plagioclase subautomorphe (An_{15-20}), la cordiérite et la biotite. L'orthose (Ab_{10-20}) et le mica blanc blastique, bien qu'assez ubiquistes, sont moins fréquents. La sillimanite, sous sa forme fibrolitique ou prismatique, apparaît de manière sporadique incluse dans les feldspaths ou aux dépens de la cordiérite. Les minéraux accessoires sont le zircon inclus dans les biotites, l'ilménite automorphe fréquente (qui sont avec la biotite les seuls minéraux titanifères primaires identifiés à ce jour) et des traces de pyrite automorphe, de pyrrhotite et de graphitoïde. L'ilménite est très fréquemment associée à des phosphates de terres rares (monazite et xénotime) et à du zircon.

L'étude de l'environnement des filons minéralisés en mispickel aurifère montre trois types d'altération plus ou moins pénétratifs (tabl. 4 in texte) dont les faciès sont localement recoupés par des filonnets plurimillimétriques à centimétriques composés de carbonates et de phyllosilicates.

Le premier type d'altération est représenté par un faciès chlorite-phengite (Faciès I) d'extension régionale comme le montre la figure 3 : les minéraux de cette altération sont distribués de manière sporadique dans les migmatites. Dans l'environnement du Châtelet, le développement de l'altération à phengite-chlorite-rutile paraît plus intense. Elle a été matérialisée sur la coupe schématique présentée dans la partie extérieure du système hydrothermal (fig. 4). Comme ce stade précède les autres altérations, il est parfois observé sous forme de "relique" dans les autres faciès. Cette altération se traduit par la chloritisation des biotites, par la pseudomorphose des cordiérites en illites-phengites, par la cristallisation de micas phengitiques sur le site du plagioclase, par l'apparition d'association micas phengitiques-chlorite dans la mésostase et par la formation de touffes de chlorites dans des microfilonnets.

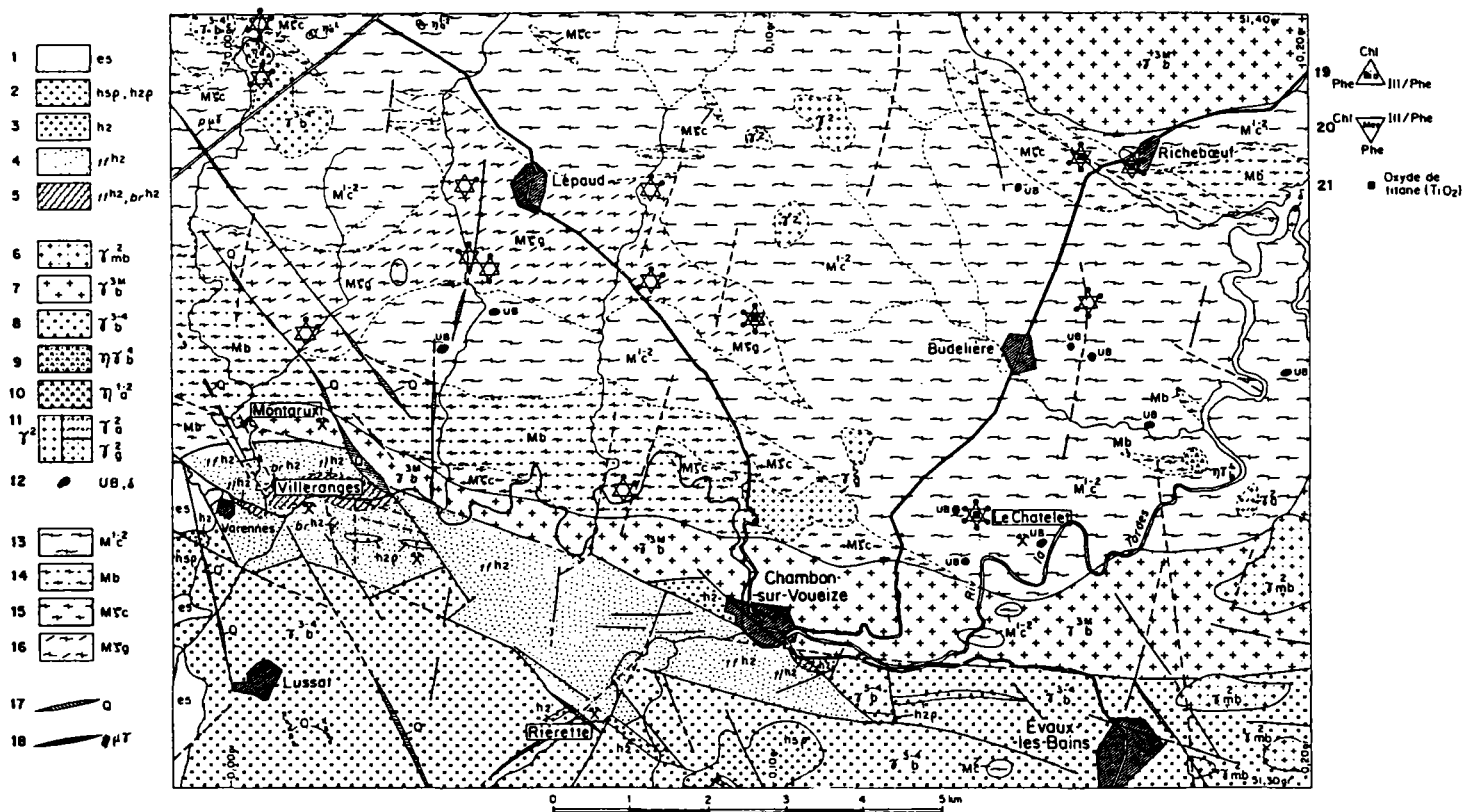


Fig. 3 - Carte géologique de la région des gîtes aurifères du Châtelet et de Villeranges (partie sud du massif de la Marche-Combraille).

Formations sédimentaires et volcano-sédimentaires: Eocène (1); Stéphanien, rhyolites (2), coulées (h5), corps intrusifs (h2); Viséen supérieur indifférencié (3), tufs volcaniques localement hydrothermalisés (4), tufs à cachet lavique (5-tl^{h2}) et brèches volcaniques (5-br^{h2}).

Roches plutoniques: leucogranite tardifs (6); monzogranites souvent porphyriques à biotite (7); granodiorite orientée à biotite (8); diorite à granodiorite orientée à biotite (9); diorite quartzique à amphibole et biotite (10); leucogranite (11- γ^2) à andalousite (11- β^2) et grenat (11- δ^2); roches ultrabasiques indifférenciées (12-UB), serpentinites en massifs, en essaim et blocs, blocs d'ultrabasites à clinopyroxène et grenat (lherzolites), blocs d'ultrabasites à amphibole et plagioclase.

Roches métamorphiques: diatexites sombres à cordiérite (aubussonites) et diatexites à cordiérite (13); migmatites à biotite (14); métatexites alumineuses à biotite, cordiérite et sillimanite (15); métatexites à biotite, cordiérite, sillimanite, grenat, antiperthites, reliques de disthène (16), amphibolites interstratifiées dans les métatexites (12- δ).

Roches filoniennes: quartz (17); microgranites porphyrique (18).

Néogénèses d'altération d'ampleur régionale: transformation de la biotite (19), cristallisations dans la mésostase et sur les plagioclases (20) (Chl., chlorite; Phe, micas phengitiques en lattes; Ill/Phe, micas phengitiques en touffes); oxydes de titane (21).

Les néoformations minérales propres au système hydrothermal du Châtelet montrent une distribution des associations minérales selon des zones grossièrement emboîtées de la partie externe vers le coeur des lentilles minéralisées (fig. 4). Ces associations caractérisent les types d'altération II et II'.

La première association minérale, la plus externe (éponte lointaine) par rapport au coeur du filon (Faciès II à argiles), se manifeste sur plusieurs mètres par une illitisation graduelle des biotites et par une altération progressive des plagioclases en une association de kaolinite et de tosudite. Cette altération se traduit également par un envahissement des plagioclases par de la sidérite.

La seconde association minérale, la plus interne (éponte proche) par rapport au coeur des lentilles minéralisées (Faciès II' à illite), se développe sur quelques dizaines de centimètres à quelques mètres de puissance autour des lentilles en générant localement, sur le site des plagioclases, des interstratifiés réguliers illite-smectite et des illites, localement associée à de la sidérite, qui remplacent progressivement toute la roche. Cette altération s'accompagne graduellement d'une silicification de la roche, qui passe progressivement à la lentille quartzeuse pro-parte par métasomatose siliceuse (silice laiteuse). Au cours de cette altération, les premiers mispickels envahissent la roche blanchie et silicifiée. Dans ce faciès, les sulfures métamorphiques sont totalement déstabilisés et la pyrite remplace la pyrrhotite.

2. Habitus des minéraux titanifères

Dans les faciès hydrothermalisés, les minéraux titanifères sont présents dans les biotites chloritisées ou illitisées et dans la mésostase où ils constituent des accumulations, parfois géodiques, de taille atteignant plusieurs centaines de microns (taille inhabituelle pour des migmatites leucocrates). Parfois, la forme de ces groupes évoquent une pseudomorphose de minéraux titanifères primaires.

Dans les biotites chloritisées, les minéraux titanifères sont exclusivement sous forme d'aiguille alors que dans les accumulations, ils se présentent en cristaux aux habitus variés : aiguilles à prismes en éventails, grains xénomorphes homogènes ou chagrinés et prismes trapus.

La distribution géographique de ces accumulations titanées montre qu'elles ne sont pas limitées au seul gîte du Châtelet. Elles ont été retrouvées d'une part, au nord de Chambon-sur-Voueize et d'autre part, à proximité du village de Richebeuf (fig. 3). Dans cette dernière zone, des accidents importants sont signalés par A.M. Hottin et C. Castaing (1989).

3. Caractérisation des espèces polymorphiques du titane

Deux types d'échantillons ont été analysés à la sonde Raman pour identifier les différents polymorphes de l'oxyde de titane. Il s'agit d'échantillons pris d'une part, en dehors de l'influence du système hydrothermal du Châtelet (Stades II, II') et d'autre part dans l'enveloppe hydrothermalisée.

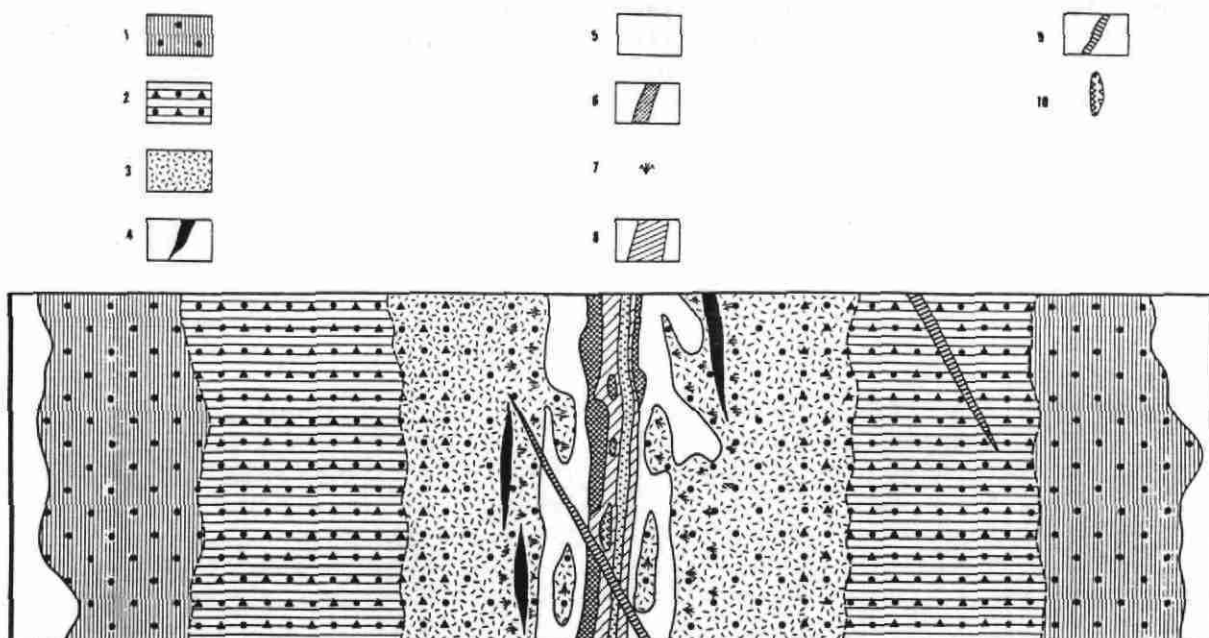


Fig. 4 - Schéma synthétique d'une colonne minéralisée. Pour faciliter la représentation, les dimensions réelles du système n'ont pas été respectées.

Faciès à chlorite-phengite (1), faciès à tosudite-kaolinite et sidérite (2), faciès à illite (3), flammes pyriteuses (4), quartz laiteux (5), quartz noir riche en mispickel aurifère (6), mispickel pervasif dans la roche et dans les microfractures (7), quartz gris à mispickel (8), filonnet tardif à carbonates ankéritiques et argiles (9), quartz en peigne plus ou moins géodique (10), oxydes de titane (ronds pleins), sidérite (triangles pleins).

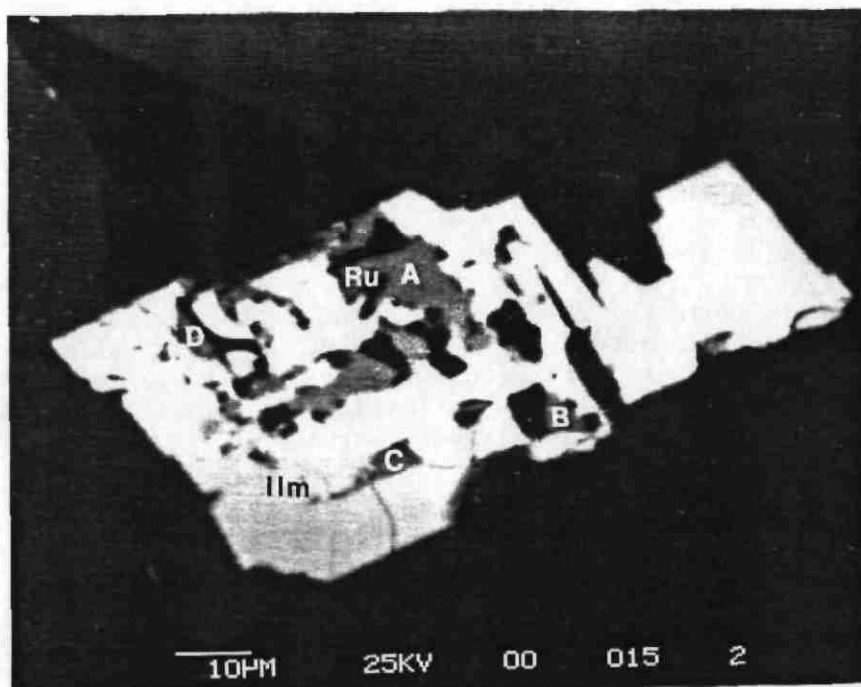


Fig. 5 - Faciès chlorite-phengite. Grain d'ilménite (Ilm) à bourgeonnement de rutile (Ru). A, B, C, D, points analysés à la microsonde RAMAM (Ech. Chat. 19-2) cf. tabl.1).

En dehors de l'enveloppe hydrothermalisée à argile-illite, seul le rutile est présent ; les bourgeons de rutile sur les ilménites (fig. 5) prouvent que la pseudomorphose de ce minéral est à l'origine des oxydes de titane formant des groupes.

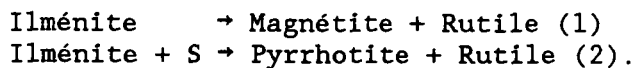
Les résultats obtenus sur les roches hydrothermalisées (fig. 6, 7 et 8) montrent (tabl. 4) :

- la présence de brookite seule pour les minéraux titanés des biotites altérées (fig. 9) ;
- l'association brookite-anatase-rutile pour les oxydes en groupe.

L'anatase et le rutile, très fréquemment associés sur une même plage (fig. 10 et 11), se présentent en plages xénomorphes ou en prismes trapus. En revanche, la brookite montre un habitus constant, en lamelles et apparaît bien individualisée au niveau des groupes titanés (fig. 10).

4. Origine et transformation des minéraux titanifères

Mis à part la brookite qui se forme dans la biotite pseudomorphosée par exsolution du titane contenu dans le réseau du phyllosilicate (fig. 9), le rutile des accumulations peut naître aux dépens des ilménites selon les réactions :



Dans l'état actuel des connaissances, seule la transformation n°(2) a été mise en évidence au Châtelet : elle se produit au cours du stade à phengite-chlorite. Ceci est étayé sur deux observations faites dans des faciès à chlorite-phengite (faciès I) :

- présence de bourgeons de rutile au sein de l'ilménite ;
- présence d'oxydes de titane dans la région de Richebeuf.

Puis dans l'emprise du système hydrothermal du Châtelet (faciès II et II'), le rutile est progressivement transformé en anatase et brookite comme le montre les analyses faites à la sonde Raman.

5. Discussions

Dans la région du Châtelet, l'altération à phengite-chlorite semble se développer préférentiellement au sein de zones de faille qui sont susceptibles de porter localement des concentrations aurifères. Compte tenu de l'extension régionale de ces fractures, cette altération ne permet en aucun cas de cerner précisément les lentilles quartzeuses minéralisées. De plus, le rutile, marqueur de ce stade d'altération, constitue un guide de prospection très indirect puisque les liens génétiques entre cette altération et la minéralisation aurifère sont encore loin d'être démontrés.

Dans le cas du Châtelet, la présence d'ilménite et de biotite dans l'encaissant sain suggère qu'un apport de titane véhiculé par les fluides dans les zones de fractures n'est pas nécessaire pour obtenir la cristallisation du rutile. A titre d'exemple, la mise en évidence de bourgeonnements de rutile sur de l'ilménite prouve que le titane de l'ilménite déstabilisé est transformé in situ. Mais, ces faits restent pour le moment seulement le cas spécifique d'un gisement et ne peuvent en aucun cas être extrapolés à d'autres gîtes sans une approche chimico-minéralogique : en effet, le titane peut sous certaines conditions être mobile (Gardner, 1980 - cf. chapitre §.4).

Quant à l'anatase et la brookite, ces espèces polymorphes d'oxyde de titane jouent le rôle de traceurs de la minéralisation aurifère dans le cas du Châtelet. La distinction entre les trois espèces (rutile, anatase, brookite) peut donc fournir un critère de sélection des cibles de prospection fondé sur la notion de maturité d'un système fracturé traversé par des fluides hydrothermaux.

Ces différentes transformations minéralogiques (ilménite → rutile → anatase/brookite) sont à rapprocher des résultats de F. Dachille et al. (1968) selon lesquels le rutile doit être considéré comme un minéral de haute pression et haute température alors que l'anatase et la brookite constitue des minéraux d'origine hydrothermale de conditions pression-température inférieures.

En résumé, sur la zone du Châtelet, les oxydes de titane constituent des minéraux caractéristiques des zones d'altération hydrothermale qui soulignent des zones de fractures. La caractérisation des polymorphes de l'oxyde de titane permet de différencier les zones hydrothermalisées d'extension régionale à rutile, des zones d'altération à anatase/-brookite potentiellement centrées sur les minéralisations aurifères.

L'intérêt pour la prospection apparaît alors évident :

ENCAISSANT MIGMATITIQUE	ALTERATION HYDROTHERMALE I	ALTERATION HYDROTHERMALE II-II'
Ilménite	Rutile	Anatase/Brookite
Minéral de l'encaissant migmatitique sain	Traceur stratégique des zones de fracture ayant servi de drain aux fluides hydrothermaux I	Traceurs tactiques et semi-stratégiques de la minéralisation aurifère du gîte du Châtelet et de son enveloppe hydrothermalisée
-----> Temps		

U 1000 INT.TIME : 1.000 Sec
 BENY INCREMENT : -1.00 Cm-1
 06/06/89 NB.SCAN : 2
 b:01C9045C.S00 lame #6904
 cercle repere 5
 point c dans cristal plutot rond

laser power : 488nm 200mw
 slit : 500microns
 objective : x100
 operator : p plantone
 sample : chatelet

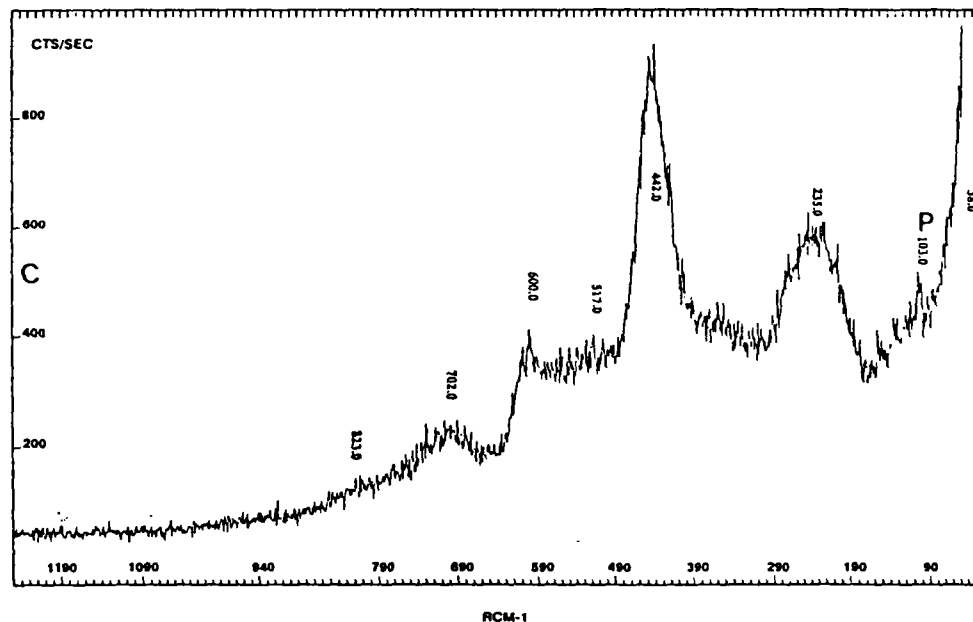


Fig. 6 - Spectre RAMAN de rutile. P: parasite. La lettre à gauche correspond au point analysé (Echantillon Chat. I).

U 1000 INT.TIME : 1.000 Sec
 BENY INCREMENT : -1.00 Cm-1
 06/06/89 NB.SCAN : 1
 b:01C9045D.S00 lame #6904
 cercle repere 5
 point d dans aiguille pres du petit cristal precedent

laser power : 488nm 200mw
 slit : 500microns
 objective : x100
 operator : p plantone
 sample : chatelet

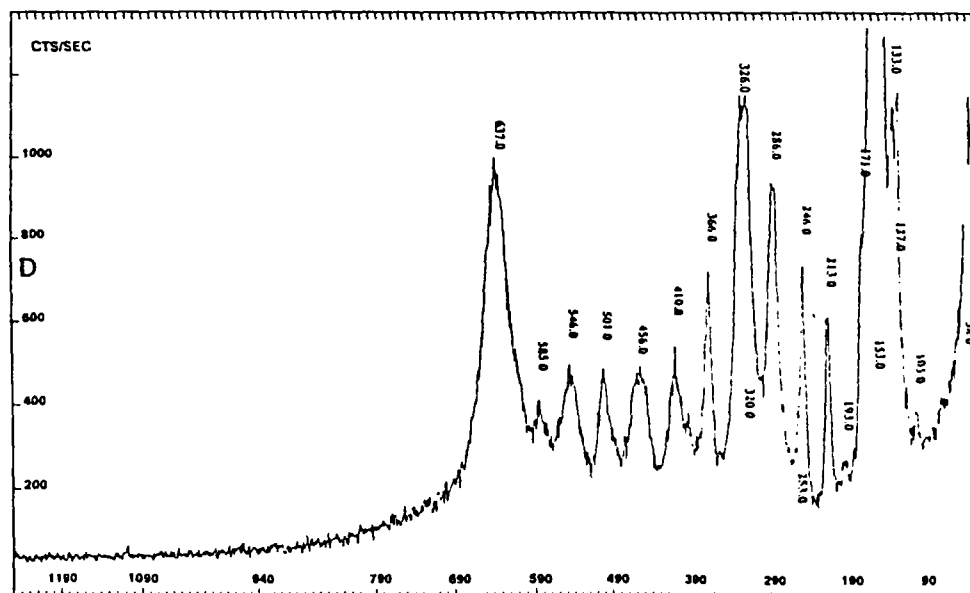


Fig. 7 - pectre RAMAN de brookite. P: parasite. La lettre à gauche correspond au point analysé (Echantillon Chat. I)

U 1000	INT.TIME :	1.000 Sec	laser power	: 488nm 200mw
BENY	INCREMENT :	-1.00 Cm-1	slits	: 500microns
06/06/89	NS.SCANS :	1	objective	: x100
b:01C9048E.800	lame 86904		operator	: p plantons
	cercle repere 5		sample	: chatelet
	point e dans petit cristal assez proche des autres cristaux			

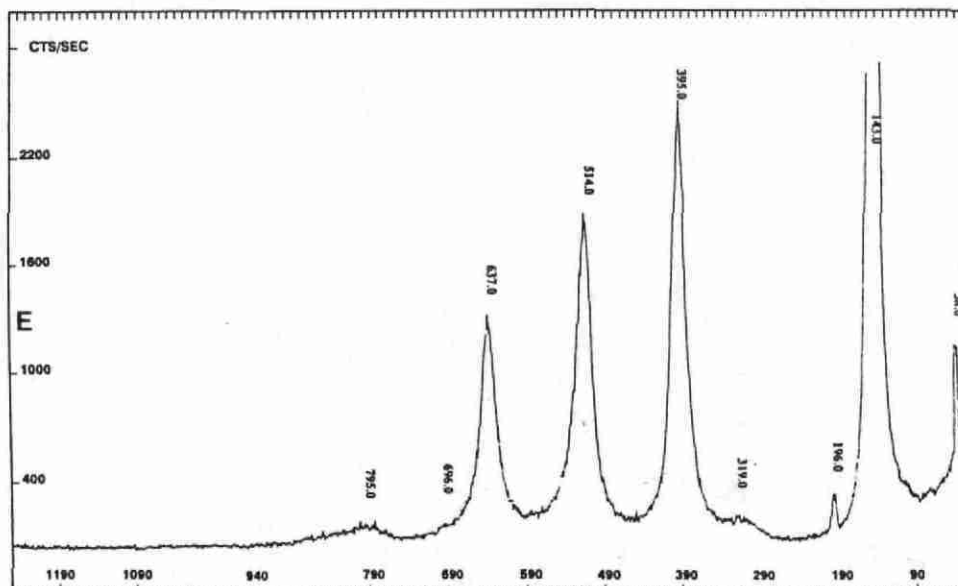


Fig. 8 - Spectre RAMAN d'anatase. P: parasite. La lettre à gauche correspond au point analysé (Echantillon Chat. I)

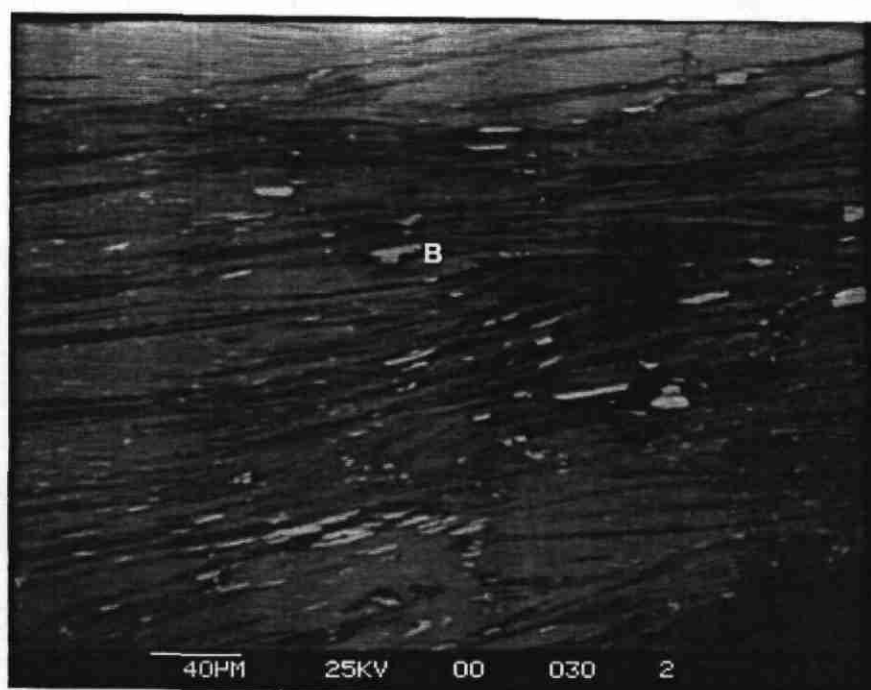


Fig. 9 - Néoformation de brookite dans les feuillets d'une biotite chloritisée (échantillon Chat. I). Image M.E.B, électrons rétrodiffusés.

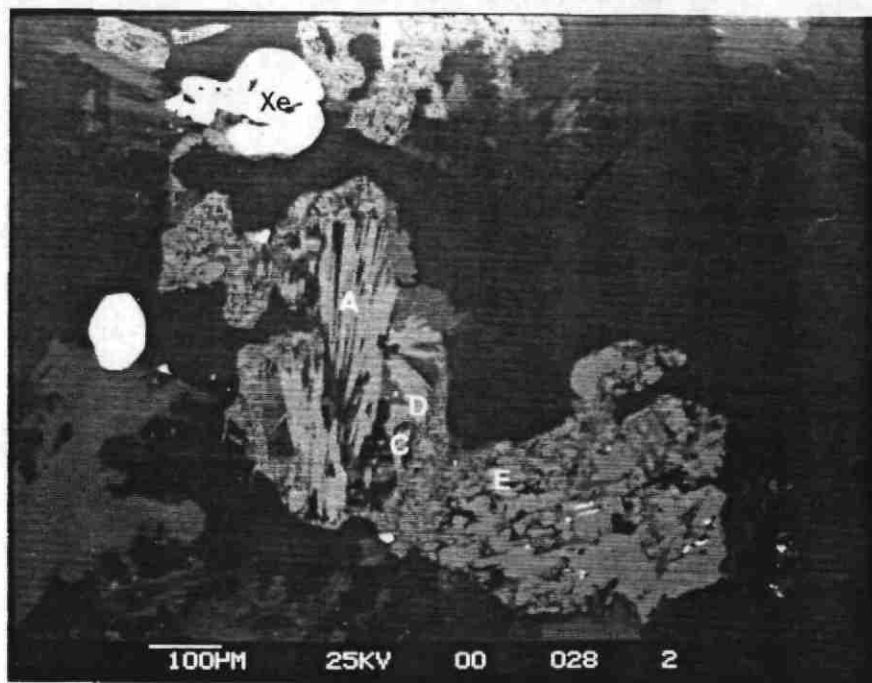


Fig. 10 -Groupe d'oxydes de titane. Xe: xénotime. Points analysés à la microsonde RAMAN :A, brookite; C, rutile; D, brookite; E, anatase. (Echantillon Chat. I, c.f Tab. 11). Image M.E.B, électrons rétrodiffusés.

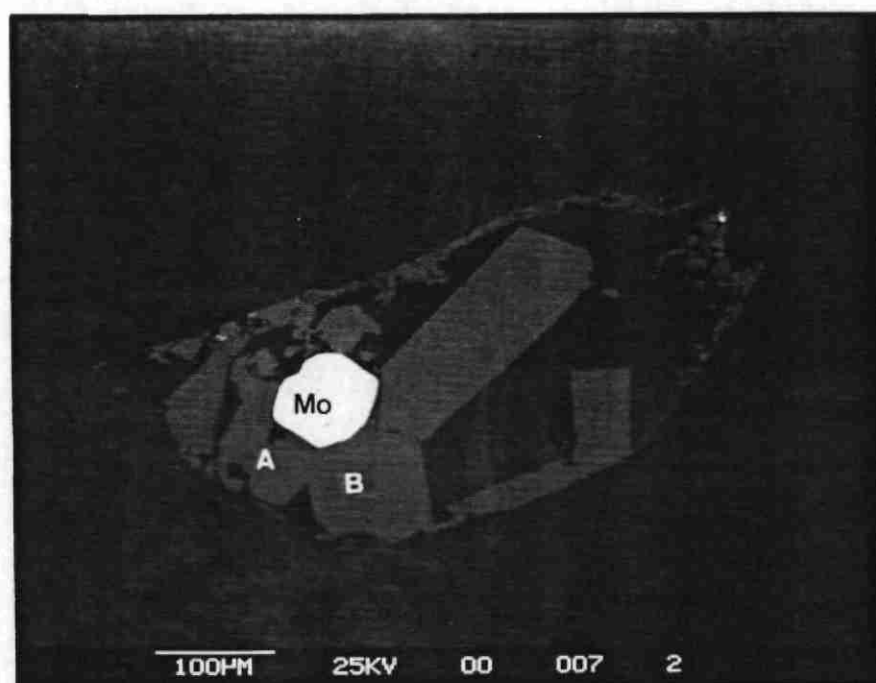


Fig. 11 -Groupe d'oxydes secondaires de titane sur l'emplacement d'un minéral titané primaire. Mo: monazite. A: rutile. B: anatase. Image M.E.B., électrons rétrodiffusés. (Echantillon Chat IV) c.f. tab. 11).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOIRON M.C. (1987) - Minéralisations à Au, As, Sb, altérations hydrothermales et fluides associés dans le bassin de Villeranges (Combrailles, Massif central français). Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 240 p.

BOUCHOT V. (1989) - Contexte géologique et structural des minéralisations aurifères du district de Saint-Yrieix. Thèse de Doctorat de l'Université Orléans. Documents BRGM n° 189, 284 p.

BONNEMAISON M., MARCOUX E. (1987) - Les shear zones aurifères, proposition d'un modèle conceptuel. Rap. BRGM 87 DAM 016 DEX.

BONNEMAISON M., MARCOUX E. (1990) - Auriferous mineralization in some shear zones: a three-stage model of metallogenesis. Mineralium Deposita, vol. 25, pp. 96-104.

COLVINE A.C., FYON J.A., HEATHER K.B., SOUSSAN MARMONT, SMITH P.M., TROOP D.G. (1988) - Archean lode gold deposit model in Ontario, Ontario Geol. Survey, Miscellaneous, Paper 139, 136 p.

CZAMANSKE G.K., FORCE R.E., MOORE W.J. (1981) - Some geologic and potential resource aspects of rutile in porphyry copper deposits. Econ. Geol., vol. 76, pp. 2240-2256.

DACHILLE F., SIMONS P.Y., ROY R. (1968) - Pressure-temperature studies of anatase, brookite, rutile and TiO_2 -II. Amer. Miner., vol. 53, pp. 1929-1939.

DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. (1965) - Rock-forming minerals. vol. 1 et 5, Ed. Longmans.

GARDNER (1980) - Mobilization of Al-Li and Ti during the weathering isovolumetric geochemical evidence. Chemical. Geol., vol. 30, pp. 151-165.

HOTTIN A.M., CASTAING C. (1989) - Carte géologique à 1/50 000 - Evaux-les-Bains et notice. Ed. BRGM.

PIANTONE P., HOTTIN A.M., PILLARD F., BENY C. (1990) - Minéralogie et cristallogénèse des altérations hydrothermales du gîte du Châtelet. Rap. BRGM R. 31 055 (à paraître).

PICOT P., MARCOUX E. (1987) - Nouvelles données sur la métallogénie de l'or. C.R. Acad. Sci. Fr., t. 304, série II, n°6.

POUPON M. (1990) - Les altérations hydrothermales associées aux amas sulfurés de Chessy et de Sain-Bel (Paléozoïque, série de la Brévenne, Massif central français). Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Documents du BRGM n°177, 215 p.

PROUST D. (1987) - Etude pétrographique du granite de Fombillou : massif d'Entraygues-Truyère (Aveyron). Rapport de l'Univ. de Poitiers.

ROBINSON G.W. (1978) - The occurrence of rare earth elements in zircon. Ph. D. dissertation, Queen's Univ., Kingston, Ontario, Canada.

ZIV E.F. (1956) - Rutilization of ilmenite under supergene conditions. Izvest. Akad. Nauk SSSR. Serv. Geol., n° 12, 57 p.

Rapport BRGM R 31271 DEX-DAM-90

Liste des illustrations

- Fig. 1 - Carte de synthèse de Saint-Etienne à 1/200 000 : visualisation des secteurs potentiellement hydrothermalisés, délimités par des courbes isoclasses A, B et/ou C+ et superposition des anomalies alluvionnaires en or et des données géochimiques en arsenic.
- Fig. 2 - Exemple d'application de la méthode : visualisation, sur carte à 1/50 000, des secteurs potentiellement hydrothermalisés, délimités par des courbes isoclasses A, B et C+.
- Fig. 3 - Carte géologique de la région des gîtes aurifères du Châtelet et de Villeranges (partie sud du massif de la Marche-Combraille).
- Fig. 4 - Schéma synthétique d'une colonne minéralisée. Pour faciliter la représentation, les dimensions réelles du système n'ont pas été respectées.
- Fig. 5 - Faciès I à chlorite-phengite. Grain d'ilménite à bourgeonnement de rutile.
- Fig. 6 - Spectre RAMAN de rutile.
- Fig. 7 - Spectre RAMAN de brookite.
- Fig. 8 - Spectre RAMAN d'anatase.
- Fig. 9 - Néoformation de brookite dans les feuillets d'une biotite chloritisée (image MEB, électrons rétrodiffusés).
- Fig. 10 - Groupe d'oxydes de titane (image MEB, électrons rétrodiffusés).
- Fig. 11 - Groupe d'oxydes de titane secondaires sur l'emplacement d'un minéral titané primaire (image MEB, électrons rétrodiffusés).
- Tabl. 1 - Caractérisation des critères sélectionnés et leur classement en fonction du type auquel ils appartiennent.
- Tabl. 2 - Réalisation de la carte d'identité d'un concentré par le biais de l'identification des critères propres à chacun des minéraux symptomatiques du concentré (cf. tabl. 1).
- Tabl. 3 - Attribution des points en fonction du type de critère identifié (1-2-3) pour chacun des concentrés, réalisation du total de points puis évaluation semi-quantitative du potentiel hydrothermal de chaque concentré par le biais des classes A, B, C, D ou E.
- Tabl. 4 - Synthèse des principaux résultats obtenus sur le Châtelet, températures estimées à partir des associations paragenétiques. (Piantone *et al.*, 1990).
- Tabl. 5 - Critères retenus suite à la critique de la méthode.