



TAO

Traçabilité analytique de l'or de Guyane



Etude technique (réalisation BRGM)

Faisabilité technique d'une traçabilité physico-chimique de l'or de Guyane

Octobre 2015



Le projet TAO est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en Guyane avec le FEDER.

Document public

Faisabilité technique d'une traçabilité physico-chimique de l'or de Guyane

Rapport final

BRGM/RP-64880-FR

Juillet 2015

Augé T., Bailly L., Bourbon P., Guerrot C., Viprey L.

Avec la collaboration de

Phillipe Telouk (ENS-Lyon)

Vérificateur :

Nom : B. Martel-Jantin
Direction du Développement
Date :

Signature

Vérificateur :

Nom : B. Martel-Jantin
Direction du Développement
Date :

Signature

Approbateur :

Nom : J.C. Guillaneau
Direction des Géorressources,
Directeur
Date :

Signature

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Minéralisation primaire, Minéralisation alluvionnaire, Or, Éléments en trace, Isotopes du plomb, Isotopes du cuivre, Isotopes de l'argent, Traçabilité physico-chimique, Surinam, Guyane

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

Augé T., Bailly L., Bourbon P., Guerrot C., Viprey L. avec la collaboration de **P. Telouk** (2015) - Faisabilité technique d'une traçabilité physico-chimique de l'or de Guyane. Rapport WWF-BRGM/RP-64880-FR, 145 p., 102 fig., 8 tabl., 3 ann., 1 CD-ROM.

Synthèse

L'objectif de ce projet, à l'initiative du WWF, était de tester la possibilité de caractériser et d'identifier les sites de provenance de concentrés aurifères (primaires, éluvionnaires, alluvionnaires) et de « dorés » de Guyane, pour ensuite idéalement certifier une production qui se retrouve sur le marché. La finalité est donc une meilleure transparence des filières aurifères en Guyane et dans la région, et la limitation du blanchiment et de l'écoulement des productions illégales. L'enjeu pour la profession et pour la puissance publique est d'abord socio-économique, en restreignant l'exploitation des gîtes d'or à des secteurs et des pratiques autorisées mais également en valorisant d'éventuelles productions traçables et responsables, par exemple au moyen d'une certification ou d'un label d'origine.

L'approche mise en œuvre sur des concentrés et les dorés de Guyane et du Suriname est relativement exploratoire, et différentes techniques ont été utilisées :

- la microscopie optique couplée au microscope électronique à balayage (MEB) ;
- des analyses in-situ à la microsonde électronique ;
- des analyses in-situ en ICP/MS-Ablation laser ;
- des analyses isotopiques du plomb, du cuivre et de l'argent.

Les observations réalisées en microscopie optique se sont attachées à la morphologie des grains d'or, à la présence d'éventuelles zonations chimiques et à la localisation d'inclusions minérales. Il apparaît possible de distinguer les concentrés primaires des concentrés alluvionnaires. Les premiers montrent fréquemment des faces planes et les empreintes des minéraux accompagnateurs. Ils ne montrent généralement pas de zonations chimiques. Les seconds sont caractérisés par des morphologies plus arrondies et une zonation chimique typique avec des bordures enrichies en or par rapport au cœur des grains. Les concentrés éluvionnaires partagent des caractéristiques rencontrés dans les deux familles précédentes. Les surfaces planes et les empreintes de minéraux accompagnateurs sont fréquentes et des enrichissements en or sont également visibles. Les grains d'or du Surinam sont difficilement comparables à ceux de Guyane dans la mesure où ils ont subi une amalgamation au mercure à l'origine d'une texture caractéristique en « chou-fleur » avec de nombreux vermicules d'or en bordure des grains.

Les caractérisations au MEB ont permis de localiser les micro-inclusions minérales présentes dans les grains d'or et d'obtenir leur composition chimique qualitative. L'abondance des inclusions est variable d'un grain à l'autre au sein d'un même concentré. Certains dorés montrent une grande abondance d'inclusions en liaison possible avec le caractère impur du concentré fondu, la présence d'une pollution par des plombs de chasse est ainsi fortement suspectée pour les dorés de Saint-Élie. Compte-tenu de la nature et de l'abondance de ces micro-inclusions, il apparaît possible de distinguer le district de provenance des concentrés et dans certains cas le site d'extraction. Il est également possible de distinguer la « marque de fabrique » des exploitants et producteurs de dorés. Il existe en revanche peu de relation entre les caractéristiques des concentrés et des dorés correspondants.

Les analyses à la microsonde électronique se sont focalisées sur les teneurs en Cu et Hg en plus des teneurs en Au et Ag. Sur la base des analyses du cœur des grains d'or, il est possible de distinguer les concentrés primaires des concentrés alluvionnaires considérant la variabilité des teneurs en Au et Ag (Figure 2). La variabilité des teneurs des concentrés

primaires est limitée en comparaison de celle observée pour les concentrés alluvionnaires, suggérant pour ces derniers des provenances différentes. La seule exception concerne l'échantillon B4, qualifié de primaire, mais qui montre une variabilité des teneurs en Au et Ag comparable voire plus forte que celle des alluvionnaires. Le seul concentré éluvionnaire étudié est caractérisé, comme les concentrés primaires, par une variabilité limitée des teneurs en Au et Ag.

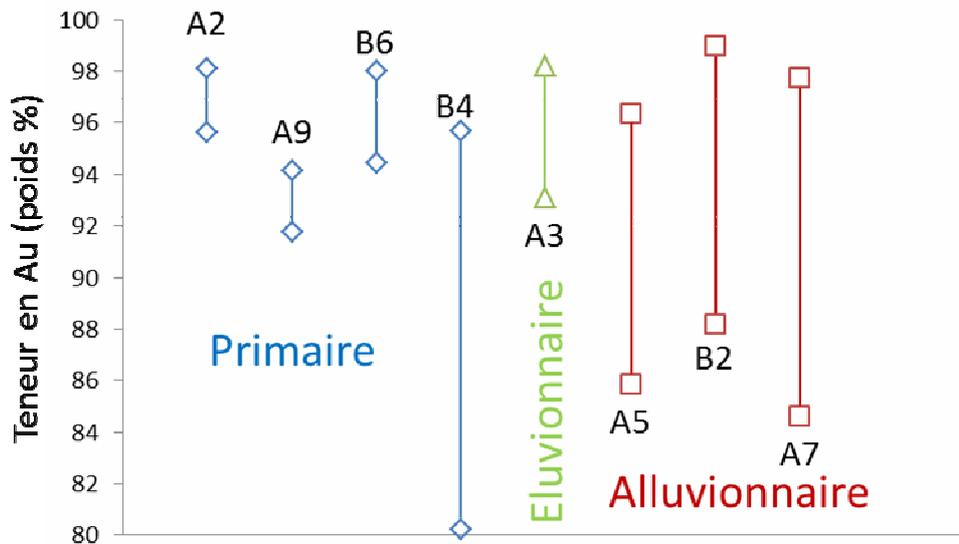


Figure 1 : Teneur minimale et maximale en Au des grains des différents types de concentré.

Les teneurs en mercure des échantillons de Guyane (concentrés et dorés) sont nulles ou inférieures au seuil de détection dans les conditions analytiques choisies. Au contraire, les échantillons du Surinam, qui correspondent à des grains d'or amalgamés au mercure, présentent des teneurs fréquemment élevées au niveau des bordures des grains. L'utilisation du mercure restera donc gravée dans les grains d'or.

Pour les concentrés primaires, il est possible de distinguer les échantillons de Saint-Élie de ceux provenant de Dagobert, sur la base des teneurs en Au, plus élevées à Saint-Élie qu'à Dagobert (Figure 2). Il est plus difficile de distinguer les concentrés alluvionnaires les uns des autres, on observe, en moyenne des teneurs plus élevées en Ag et plus pauvres en Cu pour le concentré A5 (Montagne Tortue) en comparaison des concentré B2 et A7 qui montrent logiquement des teneurs voisines en Ag, Au et Cu puisqu'ils proviennent tout deux du site de Crique Marc (Figure 3). La provenance des dorés est relativement bien discriminée sur la base des teneurs en Au, Ag et Cu (Figure 4). Il est à noter que les dorés produits par Auplata (A8bis et A7bis) sont systématiquement plus riches en Cu que les autres dorés.

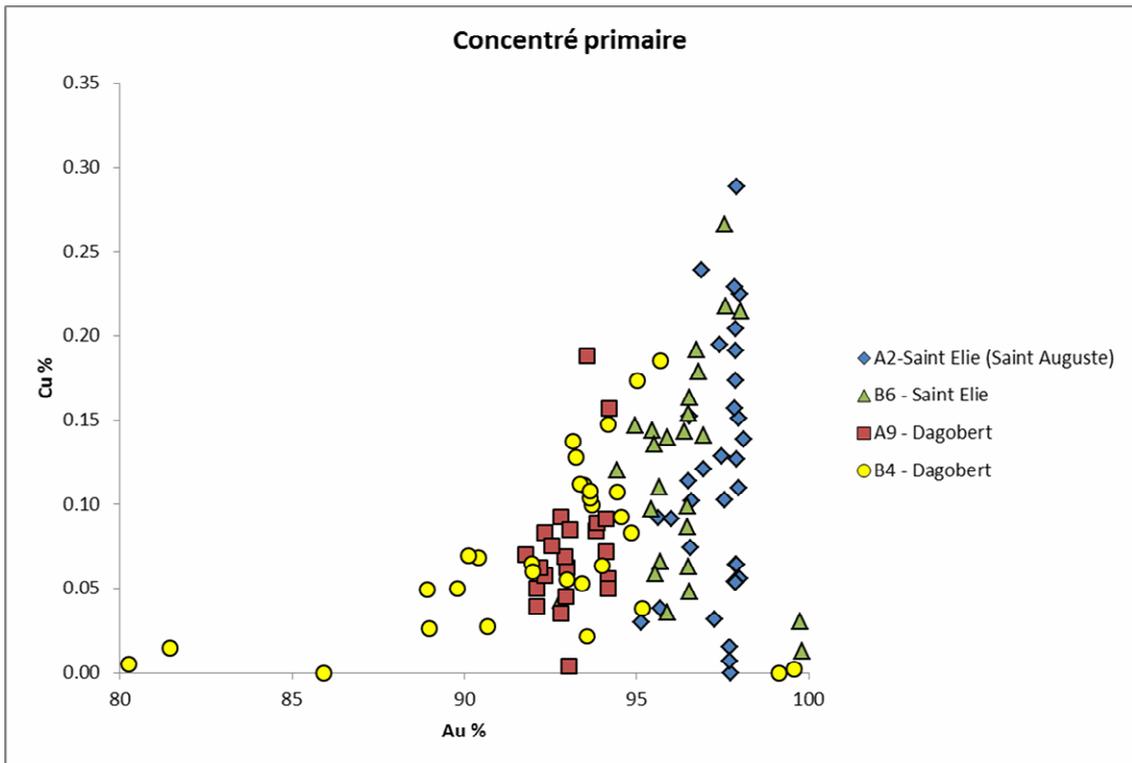


Figure 2 : Cu versus Au pour les concentrés primaires. Les concentrés de Dagobert se distinguent aisément de ceux de Saint-Élie.

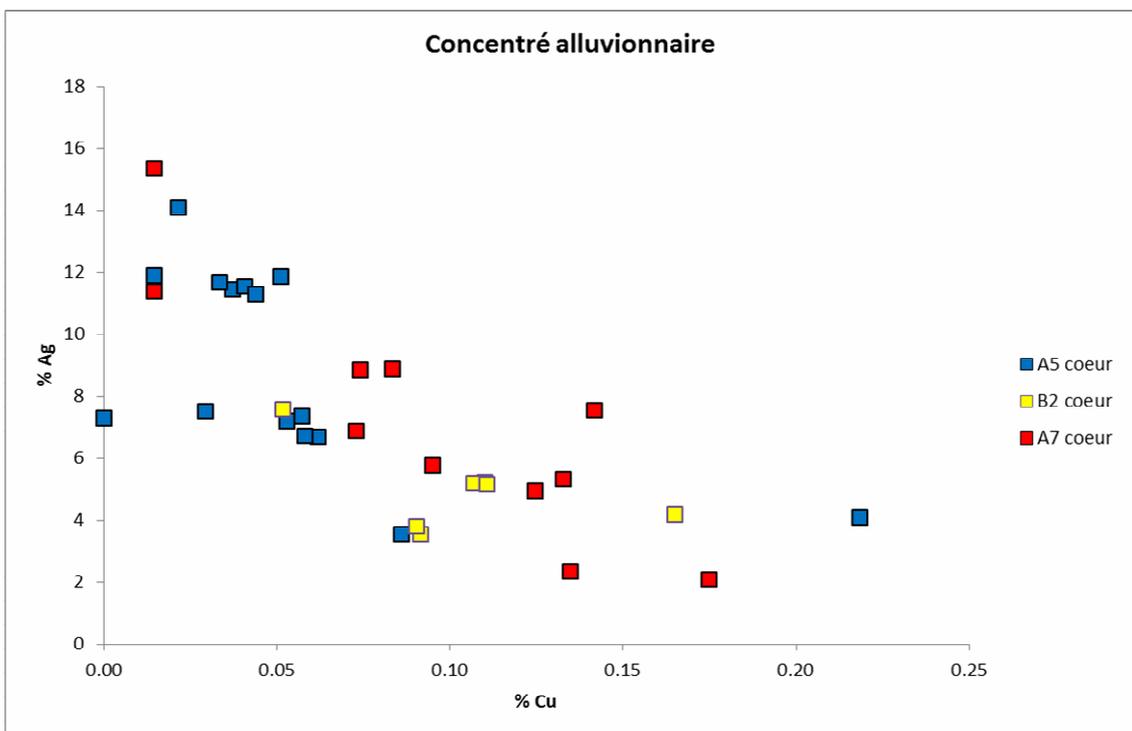


Figure 3 : Variations des teneurs en Ag et Cu des concentrés alluvionnaires.

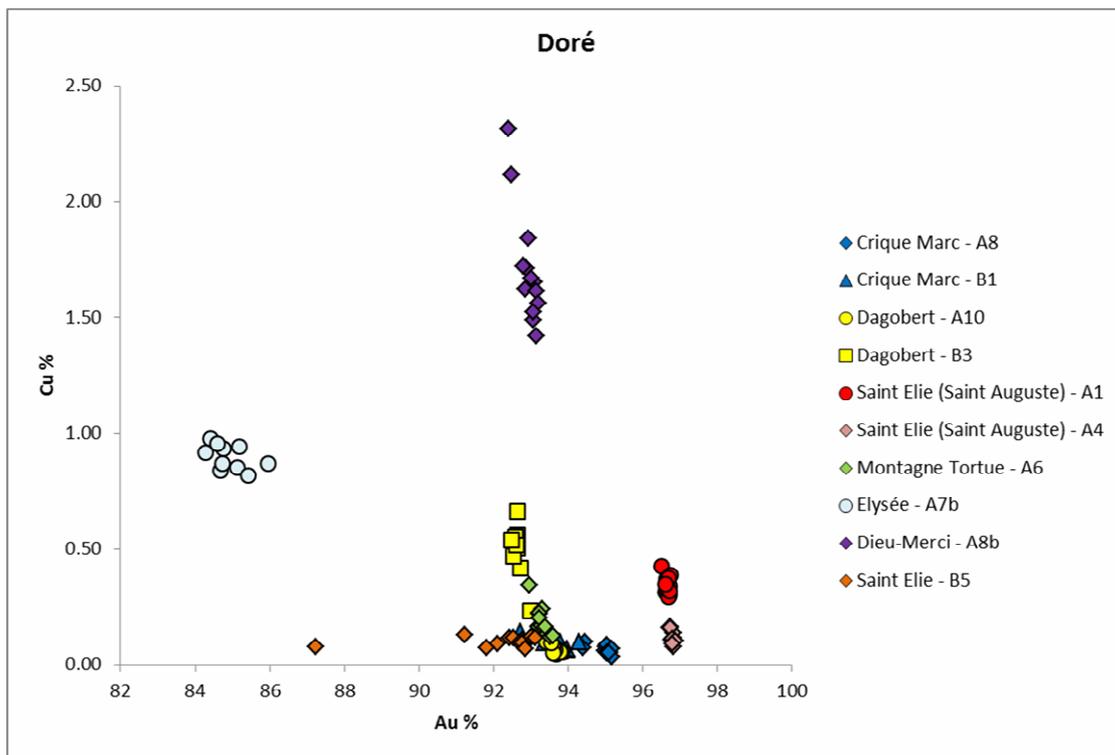


Figure 4 : Variations des teneurs en Cu et Au des dorés des différents sites échantillonnés.

Les analyses par ICP/MS avec ablation laser ont été réalisées sur les grains auparavant analysés à la microsonde électronique. Comme il n'a pas été possible d'obtenir un échantillon standard dont la composition se rapproche de celle des grains à analyser, nous n'avons obtenu que des valeurs relatives sur les éléments mineurs et en traces des grains analysés, ce qui n'est pas réellement pénalisant, dans la mesure où notre démarche consistait à comparer des valeurs pour différents sites. Malgré tout, cette approche ne s'est par révélée discriminante.

Les isotopes du plomb sont couramment utilisés pour tracer la source des minéralisations. Contrairement aux techniques décrites précédemment, cette analyse nécessite la mise en solution des grains d'or. Cette technique n'a été appliquée que sur les concentrés, les dorés montrant des évidences de pollution anthropique par le plomb. Les solutions obtenues ont été analysées non seulement pour les isotopes du plomb mais également, en ICP/MS, pour leurs teneurs en Au, Ag, Cd, Zn, Pb, Cu, Th, U, Bi, Fe, Pt, Te, Sb, Tl. Les teneurs en Cu, Te et Zn permettent de discriminer les concentrés provenant des districts de Saint-Elie, de Saül et de Régina. En revanche, le concentré de Régina (concentré alluvionnaire de Montagne Tortue) présente des teneurs très proches des deux échantillons du Surinam testés. Quant aux isotopes du plomb, il semble que l'on puisse effectuer des regroupements par district, en fonction du caractère radiogénique des concentrés (Figure 5). Il est assez probable cependant que cette signature reflète plutôt celle des inclusions dans les grains d'or (dont on a vu qu'elles étaient relativement spécifiques d'un district à l'autre), plutôt que la signature des grains d'or eux-mêmes.

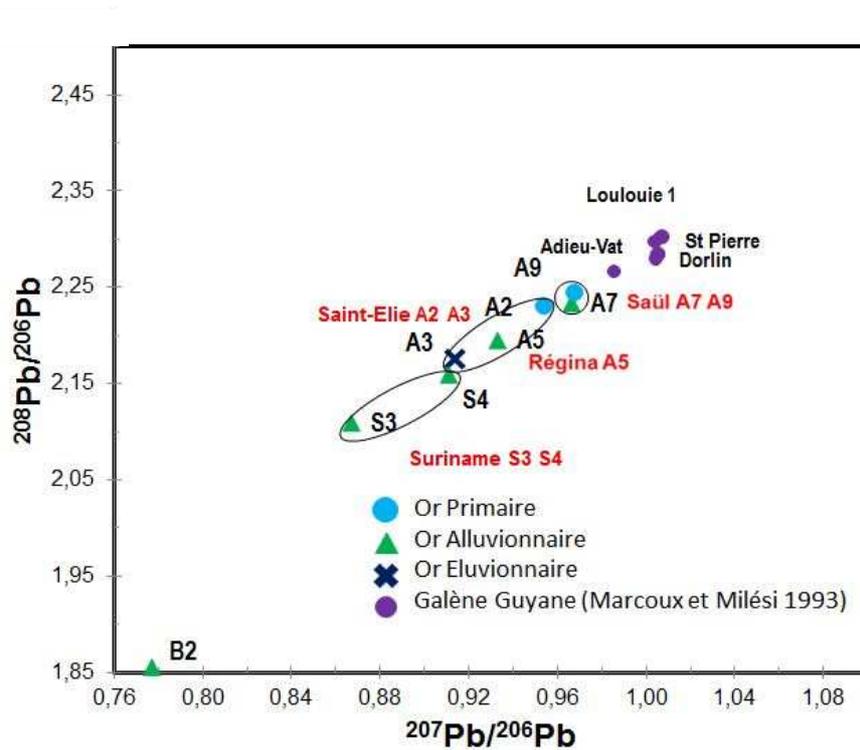


Figure 5 : Compositions isotopiques du plomb des échantillons d'or de Guyane par district. Les rapports isotopiques de galènes de différents gisements aurifères de Guyane (Marcoux et Milési, 1993) ont également été reportés pour comparaison.

La mesure des rapports isotopiques du cuivre et de l'argent permet de faire une présélection assez fine des échantillons de provenance guyanaise. Il faut utiliser cette méthode pour exclure des origines plutôt que d'en définir la provenance. Dans un certain nombre de cas, les concentrés et les dorés d'une même provenance indiquent une correspondance parfaite (Figure 6); dans d'autres cas, ils ne donnent pas du tout les mêmes résultats ce qui pourrait *a priori* s'expliquer par une pollution de l'un ou l'autre des échantillons (cf. pollution par du Pb dans les dorés).

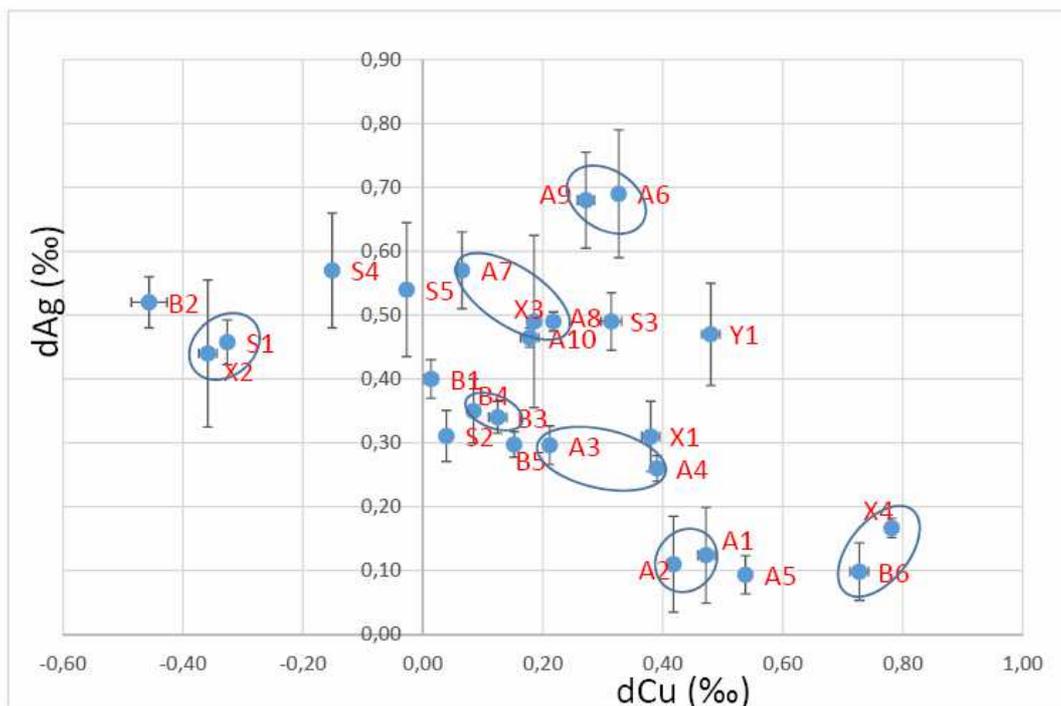


Figure 6 : Corrélation dCu (‰) vs dAg (‰) pour l'ensemble des échantillons.

Enfin, concernant l'exercice qui consistait à retrouver cinq concentrés « inconnus » de Guyane parmi les huit fournis, on estime avec certitude en avoir identifié trois et, de manière moins certaine, deux. Ces résultats sont partiellement corroborés par les données isotopiques du cuivre et de l'argent. À l'issue de cette étude, le WWF nous a communiqué l'origine des échantillons inconnus. Ce travail nous a effectivement permis de tous les identifier.

Ainsi donc les approches les plus simples à mettre œuvre, c'est-à-dire l'étude morphoscopique des grains, l'étude des inclusions de minéraux dans les grains d'or et la composition chimique ponctuelle (Au, Cu, Ag, Hg) obtenue par microsonde électronique à balayage permettent de discriminer de manière satisfaisante la nature et l'origine géographique des concentrés.

Sommaire

1. Introduction	19
1.1. L'OFFRE WWF	19
1.2. PROBLEMATIQUE ET OFFRE BRGM : LE PROJET	19
1.2.1. Contexte et cadre du projet.....	19
1.2.2. Etudes antérieures.....	20
1.2.3. Approche	20
1.2.4. Phase 1 – Échantillonnage et caractérisation morphoscopique et chimique des grains.....	21
1.2.5. Phase 2 – Caractérisation des signatures chimiques et isotopiques	21
2. Échantillonnage.....	23
3. Préparation des échantillons.....	27
4. Caractérisation des grains d'or et des microinclusions.....	29
4.1. METHODE	29
4.2. RESULTATS.....	31
4.2.1. Saint-Élie	31
4.2.2. Saint-Élie (Saint-Auguste).....	34
4.2.3. Dieu-Merci	41
4.2.4. Montagne Tortue	46
4.2.5. Crique Marc	49
4.2.6. Dagobert.....	56
4.2.7. Élysée (Paul-Isnard)	62
4.2.8. Les échantillons du Surinam	64
4.3. CONCLUSION SUR LA METHODE D'OBSERVATION MICROSCOPIQUE DES MICRO-INCLUSIONS.....	64
5. Analyse des grains d'or à la microsonde électronique	71
5.1. PRESENTATION DE LA METHODE	71
5.2. HISTOGRAMMES MONTRANT LA VARIATION EN AU DE CHAQUE LIEU D'EXTRACTION	72
5.2.1. Saint-Élie	72
5.2.2. Montagne Tortue	74
5.2.3. Dagobert.....	74
5.2.4. Crique Marc	76
5.2.5. Élysée (Paul-Isnard)	77

5.2.6. Corrélation entre les teneurs en or des grains de Crique Marc et ceux de Dagobert	77
5.3. CONCLUSION SUR L'ETUDE DE LA TENEUR EN OR DES ECHANTILLONS POUR CARACTERISER LES LIEUX D'EXTRACTION	78
5.3.1. Les concentrés	78
5.3.2. Les dorés	80
5.4. LES GALETTES DU SURINAM	81
5.4.1. Conclusion sur les teneurs en or des galettes du Surinam	83
5.5. CORRELATION Ag-Au ET Cu-Au	83
5.5.1. Les concentrés primaires	83
5.5.2. Les concentrés alluvionnaires	85
5.5.3. Les dorés	86
5.6. CONCLUSION	92
6. Analyse des grains d'or par ICP/MS	93
7. Analyses des grains d'or par ablation laser (LA-ICP-MS)	97
7.1. PRESENTATION DE L'ABLATION LASER COUPLEE A UN SPECTRO-METRE DE MASSE PLASMA (LA-ICP-MS)	97
7.2. RESULTATS	98
7.2.1. Traitement des résultats par éléments	98
7.2.2. Traitement des résultats par lieu d'extraction	101
7.2.3. Limite de la méthode	104
7.3. CORRELATION ENTRE LA METHODE ICP-MS ET LA-ICP-MS	104
8. Géochimie isotopique du plomb	105
8.1. RESULTATS D'ANALYSES ISOTOPIQUES DU PLOMB COMMUN SUR DES CONCENTRES D'OR DE GUYANE ET DU SURINAME	105
8.1.1. Échantillons	105
8.1.2. Méthode analytique	109
8.1.3. Résultats	110
9. Géochimie isotopique du cuivre et de l'argent	113
9.1. INTRODUCTION	113
9.2. METHODE	113
9.3. RESULTATS	114
9.3.1. Correspondance provenance – type	114
9.3.2. Correspondance concentrés – dorés	115
9.3.3. Correspondance connus – inconnus	115

9.4. CONCLUSIONS.....	116
10. Identification des échantillons inconnus.....	117
11. Conclusions et perspectives	121
12. Bibliographie	125
12.1. REFERENCES CITEES.....	125
12.2. COMPLEMENTS BIBLIOGRAPHIES.....	125
12.2.1. Microsonde électronique.....	125
12.2.2. ICP/MS-LA	126
12.2.3. Caractérisation isotopique	126
12.2.4. Étude de cas.....	126

Liste des illustrations

Figure 1 : Teneur minimale et maximale en Au des grains des différents types de concentré.	4
Figure 2 : Cu versus Au pour les concentrés primaires. Les concentrés de Dagobert se distinguent aisément de ceux de Saint-Élie.	5
Figure 3 : Variations des teneurs en Ag et Cu des concentrés alluvionnaires.	5
Figure 4 : Variations des teneurs en Cu et Au des dorés des différents sites échantillonnés.	6
Figure 5 : Compositions isotopiques du plomb des échantillons d'or de Guyane par district. Les rapports isotopiques de galènes de différents gisements aurifères de Guyane (Marcoux et Milési, 1993) ont également été reportés pour comparaison.	7
Figure 6 : Corrélation dCu (‰) vs dAg (‰) pour l'ensemble des échantillons.	8
Figure 7 : Résumé de la démarche et des techniques mises en œuvre.	22
Figure 8 : Localisation des lieux d'extraction étudiés.	24
Figure 9 : Photographie de différents grains caractéristiques : (A) grain primaire avec des bordures rectilignes, (B) grain primaire sans enrichissement en or sur les bordures, (C) grain alluvionnaire avec des bords arrondis, (D) grain alluvionnaire avec des bordures enrichies en or entourées en noir, (E,F) grain provenant du Surinam montrant des zones appauvries ou enrichies en or entourées en noir et des textures en « choux-fleurs » (photographies réalisées au microscope optique en lumière réfléchie).	30
Figure 10 : Photographie du grain aux bords rectilignes (gauche) ; (B) photographie du grain arrondi (droite).	31
Figure 11 : Photographie d'un grain contenant d'abondantes inclusions de Bi (gauche) ; détail du grain et de sa bordure enrichie en or (droite).	32
Figure 12 : Diagramme de distribution des micro-inclusions contenues dans les grains de l'échantillon B6 après pondération.	32
Figure 13 : (A) Photographie en lumière réfléchie du grain étudié; (B) veines et micro- inclusions de sulfure de fer (entourée en noir) contenues dans le grain. Les veines de plomb (ou d'alliage Pb, Au) apparaissent gris clair au microscope et les sulfures de fer sont gris clair violet.	33
Figure 14 : Cartographie au MEB des veines de Pb (ou d'alliage Pb, Au). BSE : image en mode électrons rétrodiffusés.	34
Figure 15 : (A) Photographie en lumière réfléchie d'un exemple de grain émoussé ; (B) photographie du grain exemple d'un grain aux bordures rectilignes.	35
Figure 16 : (A) Photographie en lumière réfléchie du grain de l'échantillon A2 présentant des bordures enrichies en or; (B) photographie en lumière réfléchie du grain de l'échantillon A2 présentant des bordures enrichies en argent.	35
Figure 17 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains du concentré A2.	36
Figure 18 : Photographie du grain étudié parmi les copeaux de l'échantillon de doré A1.	36
Figure 19 : Diagramme de distribution des micro-inclusions majoritaires dans le grain de l'échantillon de doré A1.	37
Figure 20 : Carte des inclusions du doré A1 mettant en évidence des sulfures de fer (en rouge) entourés de tellure de plomb (vert), d'un alliage riche en PbBi ou Pb ou Bi (bleu foncé) et d'un alliage pauvre en Pb (bleu clair).	38
Figure 21 : (A) Photographie en lumière réfléchie d'un grain massif et arrondi ; (B) photographie du grain emprisonné dans la relique de la gangue quartzeuse.	38
Figure 22 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains de concentré A3.	39

Figure 23 : Photographie du grain étudié dans l'échantillon A4, les flèches pointent les micro-inclusions.	40
Figure 24 : Photographie de 3 inclusions analysées au MEB.	40
Figure 25 : Photographie des micro-inclusions 13 et 14 qui sont des alliages AuPb englobant un tellure de plomb automorphe.	41
Figure 26 : Diagramme de distribution des micro-inclusions observées dans le grain de l'échantillon de doré A4.	41
Figure 27 : Photographie du fragment 1 (microscope optique en lumière réfléchi).	42
Figure 28 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans le doré A8 bis.	43
Figure 29 : (A) Photographie en lumière réfléchi du grain 70 vermiforme ; (B) photographie du grain 75 ayant une morphologie en chou-fleur.	46
Figure 30 : Photographies en lumière réfléchi de grains dont les bordures sont localement enrichies en or, elles sont entourées en noir sur les photographies : (A) photographie d'une partie du grain 90; (B) photographie d'une partie du grain 75.	46
Figure 31 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans l'échantillon A5 après pondération.	47
Figure 32 : Photographie du copeau 31.	48
Figure 33 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans l'échantillon A6 après pondération.	48
Figure 34 : Micro-inclusions d'aluminium vu dans le grain 30. Les micro-inclusions d'aluminium apparaissent blanches au microscope, on peut ainsi les différencier des oxydes d'aluminium qui sont de couleur gris foncé.	49
Figure 35 : Photographie en lumière réfléchi du grain 33 de l'échantillon A7 montrant des bordures enrichies en Au.	50
Figure 36 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains de l'échantillon A7.	51
Figure 37 : Photographie (en lumière réfléchi) du grain 2 de l'échantillon A8.	52
Figure 38 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans le doré A8 après pondération.	52
Figure 39 : Grain 21 avec des inclusions d'aluminium au cœur du grain et dans des trous.	53
Figure 40 : Photographie (lumière réfléchi) du grain 15.	53
Figure 41 : (A) photographie du grain 18 ; (B) photographie de la bordure enrichie en or du grain 18.	54
Figure 42 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans l'échantillon B2.	55
Figure 43 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains du concentré A9.	56
Figure 44 : Photographie du grain 48 de l'échantillon A9.	57
Figure 45 : Photographie de la particule 8.	57
Figure 46 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans le doré A10 après pondération.	58
Figure 47 : Photographie du grain 11 de l'échantillon B4.	59
Figure 48 : Photographie du grain 58 de l'échantillon B4: Les minéraux cerclés en blancs sont des oxydes de fer et des ilménites, les autres des cristaux de quartz.	59
Figure 49 : Inclusions d'oxyde de fer avec des phases plus claires contenant des tellures de bismuth. Les BiTe ne sont pas visibles sur cette photographie.	60
Figure 50 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains de l'échantillon B4 après la pondération des données.	61
Figure 51 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans la partie du grain B3 étudiée.	62

Figure 52 : Photographie de la section polie contenant l'échantillon A7bis à gauche et X4 à droite; cette photo montre bien la différence de couleur entre l'échantillon A7bis et un autre échantillon.	63
Figure 53 : Photographie du grain 2 de l'échantillon A7bis montrant l'abondance de micro-inclusions.	63
Figure 54 : Diagramme de distribution des micro-inclusions de 2 grains représentatifs de l'échantillon A7b.	64
Figure 55 : Modèle d'évolution du concentré riche en tellure de bismuth en doré riche en alliage or plomb (bismuth) et tellure de plomb à partir des observations microscopiques.	67
Figure 56 : Graphique récapitulatif des micro-inclusions et des éléments signatures de chaque échantillon et lieu d'extraction	68
Figure 57 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A2 et du doré A1 provenant de Saint-Élie (Saint-Auguste).	72
Figure 58 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A3 et du doré A4 provenant de Saint-Élie (Saint-Auguste).	73
Figure 59 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré B6 et du doré B5 provenant de Saint-Élie.	73
Figure 60 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du doré A8bis provenant de Saint-Élie (Dieu-Merci).	73
Figure 61 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A5 et du doré A6 provenant de la Montagne Tortue.....	74
Figure 62 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A9 et du doré A10 provenant de Dagobert.	75
Figure 63 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré B4 et du doré B3 provenant de Dagobert.	75
Figure 64 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré B2 et du doré B1 provenant de la Crique Marc.	76
Figure 65 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A7 et du doré A8 provenant de Crique Marc.	77
Figure 66 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du doré A7bis provenant d'Élysée (Paul-Isnard).	77
Figure 67 : Récapitulatif des teneurs en Au majoritairement mesurées à la microsonde électronique au cœur des grains de concentrés des sites de Saint-Élie, Montagne Tortue, Dagobert et Crique Marc	78
Figure 68 : Récapitulatif des teneurs en Au majoritairement mesurées à la microsonde électronique au cœur des grains de dorés des sites de Saint Elie, Montagne Tortue, Dagobert, Crique Marc et Élysée (Paul-Isnard).	80
Figure 69 : Variation de la teneur en Au des échantillons de galettes provenant du Surinam.	82
Figure 70 : Graphiques illustrant la variation des teneurs en argent (graphique A) et en cuivre (graphique B) en fonction des teneurs en or des grains de concentrés primaires provenant de Dagobert et Saint-Élie.	84
Figure 71 : Graphiques illustrant la variation des teneurs en cuivre (graphique A) et en argent (graphique B) en fonction des teneurs en or dans des grains de concentrés alluvionnaires provenant de Montagne Tortue (MT) et de Crique Marc.	86

Figure 72 : Graphiques illustrant la variation des teneurs en cuivre (graphique A), en argent (graphique B) et en Ag+Cu (graphique C) en fonction des teneurs en or dans des copeaux de dorés provenant de Crique Marc, Dagobert, Saint-Élie (Saint-Auguste), Saint-Élie, Dieu-Merci, Montagne Tortue, Élysée. La corrélation linéaire Ag+Cu en fonction de Au sur le graphique C permet de mettre en évidence les échantillons ne contenant pas que de l'or, de l'argent ou du cuivre.	90
Figure 73 : Graphiques illustrant la variation des teneurs en cuivre (graphique A) et en argent (graphique B) en fonction des teneurs en or dans des galettes provenant du Surinam.	91
Figure 74 : Corrélation des teneurs en Au et Cu obtenues à la microsonde électronique et en ICP/MS. La droite en pointillés matérialise une corrélation parfaite entre les deux techniques.	93
Figure 75 : Diagrammes de représentation des analyses ICP/MS des grains d'or sélectionnés pour l'analyse isotopique.	95
Figure 76 : Diagrammes de corrélation binaire pour les dorés des différents sites.	99
Figure 77 : Diagramme de corrélation Bi versus Pb pour les concentrés et les dorés des différents sites (a à e) et Pb/Bi versus Bi (f) et Bi versus Te pour les dorés (g à h).	100
Figure 78 : Spectres des Gold Normalized Intensity (GNI) des grains du concentrés B2, du doré B3 et des galettes du Surinam S1 caractéristiques des échantillons de concentrés, de dorés de Guyane et des galettes du Surinam.	101
Figure 79 : Spectre GNI des échantillons A7, B6, S3 et A9.	103
Figure 80 : Localisation des échantillons analysés pour les isotopes du plomb.	106
Figure 81 : Concentrés d'or (A : A2 ; B : A3 ; C : A5 ; D : A7 ; E : A9 ; F : B2 ; G : S3 ; H : S4).	108
Figure 82 : Compositions isotopiques du plomb des échantillons d'or de Guyane. Sont également reportées les valeurs obtenues sur des galènes de Guyane associées à des gisements d'or (Marcoux et Milési, 1993).	111
Figure 83 : Corrélation dCu (‰) vs dAg (‰) pour l'ensemble des échantillons.	115
Figure 84 : Comparaison des « teneurs en GNI » en Bi et Pb des concentrés des différents sites et des échantillons inconnus.	117
Figure 85 : Rapport Au/Ag versus Cu des concentrés alluvionnaires et de l'échantillon inconnu X2.	117
Figure 86 : Au/Ag versus Cu des concentrés primaires comparés aux échantillons inconnus.	118
Figure 87 : Cu versus Au des concentrés primaires comparés aux échantillons inconnus X3 et X4.	119
Figure 88 : Photographie d'inclusions d'oxyde de fer. Les oxydes de fer ont une couleur gris foncé violet trouvées dans un grain de l'échantillons B6.	130
Figure 89 : Photographie en lumière réfléchiée et au MEB et spectre d'une micro-inclusion d'oxydes de fer. Les oxydes de fer sont de couleur gris foncé violet au microscope et noirs au MEB.- vu dans l'échantillon A2.	130
Figure 90 : Photographie au microscope en lumière réfléchiée et au MEB et spectre d'une micro-inclusion d'ilménite. Les micro-inclusion d'ilménite sont de couleur gris foncé au microscope et sont visibles au MEB. - vu dans l'échantillon A7.	131
Figure 91 : Photographie en lumière réfléchiée et au MEB et spectre d'une micro-inclusion d'oxyde d'aluminium. Les oxydes d'aluminium apparaissent gris violet au microscope et sont noirs au MEB. - vu dans l'échantillon B6.	132
Figure 92 : Photographie en lumière réfléchiée et au MEB d'une micro- inclusion de Bi (ou d'un alliage Au ₂ Bi). Les micro-inclusions de Bi peuvent apparaître gris clair au microscope et sont le plus souvent invisibles au MEB. - vu dans l'échantillon B6.	133

- Figure 93 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB d'une micro-inclusion de Bi (n° 50 sur la photographie). Les micro-inclusions de Bi peuvent apparaître gris foncé bleu ou gris foncé violet au microscope et dans ce cas le signal en bismuth est plus intense. - vu dans l'échantillon B6..... 135
- Figure 94 : Analyses au MEB : (A) veine contenant peu de plomb. Les veines à faible teneur en plomb apparaissent blanches au MEB et avec des délimitations diffusent (B) TePb. Les tellures de plomb apparaissent gris clair au MEB (C) veine contenant de forte teneur en Pb. Les veines à fortes teneurs en Pb apparaissent grises au MEB ; elles sont de même couleur que les tellures de Pb. – vus dans le copeau étudié de l'échantillon B5. 136
- Figure 95 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre de la micro-inclusion n°2 de tellure de bismuth. Les micro-inclusions de tellures de bismuth apparaissent gris clair au microscope et sont bien visible au MEB. - vu dans l'échantillon A2. 137
- Figure 96 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion de tellure de plomb. Les micro-inclusions de tellure plomb apparaissent gris clair au microscope et sont visibles au MEB. - vu dans l'échantillon A1. 139
- Figure 97 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre de deux inclusions AuPbBi. L'alliage à forte teneur en PbBi apparaît gris lin foncé au microscope et est visible au MEB. L'alliage à faible teneur en PbBi apparaît gris lin clair au microscope et est peu distinguable de l'or au MEB.- vu dans l'échantillon A1. 140
- Figure 98 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB d'une micro-inclusion contenant un alliage AuPbBi et AuBi. L'alliage AuPbBi à faible teneur en Pb et Bi apparaît gris lin clair au microscope et est peu distinguable de l'or au MEB. L'alliage AuBi à forte teneur en Bi apparaît gris lin foncé et est visible au MEB. – vu dans l'échantillon A1. 141
- Figure 99 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion de FeCoNiAsS (arsenopyrite(CoNi) ou cobalto-gersdorffite) automorphe. Ces micro-inclusions apparaissent gris clair au microscope et noir au MEB.- vu dans l'échantillon A3. 142
- Figure 100 : Photographie au microscope en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion de galène. Les micro-inclusions de galène apparaissent de couleur gris claire au microscope et sont visibles au MEB..... 143
- Figure 101 : Photographie de la micro-inclusion n°2 au microscope en lumière réfléchie et spectre d'une micro-inclusion d'arsenopyrite. Les micro-inclusions d'arsenopyrite apparaissent gris clair légèrement violet au microscope et noirs au MEB. Elles sont visuellement difficilement différenciable avec une inclusion de sulfure de fer comme la n° 1 sur la photo au microscope. 144
- Figure 102 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre de deux micro-inclusions de tungstène (le plomb qui apparaît sur le spectre n'est pas présent dans ces micro-inclusions, l'opérateur l'a inséré par erreur dans le spectre). Le tungstène apparaît blanc en lumière réfléchie et est peu visible au MEB.- vu dans l'échantillon A7bis. 145

Liste des tableaux

Tableau 1 : Origine et caractéristiques des échantillons.....	25
Tableau 2 : Analyses géochimiques par ICP/MS des grains d'or des concentrés testés en isotopie du plomb.....	94
Tableau 3 : Description des échantillons (voir photos Figure 81).	107
Tableau 4 : Rapports isotopiques du plomb sur l'or de Guyane et du Surinam.....	110
Tableau 5 : Résultat des données isotopiques Ag et Cu pour chaque échantillon.....	114
Tableau 6 : Correspondances suggérées connus – inconnus sur la base des données isotopiques Ag – Cu.	116
Tableau 7 : Origine des échantillons inconnus.....	119
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des observations microscopiques et des signatures de chaque échantillon.	146

Liste des annexes

Annexe 1 Caractérisation des inclusions minérales dans les grains d'or	129
Annexe 2 Résultats des analyses microsondes (sur CD ROM)	
Annexe 3 Résultats des analyses ICP/MS ablation laser (sur CD ROM)	

1. Introduction

1.1. *l'offre WWF*

En juin 2013, le WWF a lancé un appel d'offre (AO) dont l'objet était une « prestation d'échantillonnage et de caractérisation physico-chimique et minéralogique de l'or ». La finalité de la mission telle que décrite dans l'AO est une action qui s'inscrit dans le cadre des actions du WWF qui visent à atténuer les impacts négatifs de l'orpaillage illégal sur le Plateau des Guyanes. En favorisant une meilleure traçabilité de l'or, il s'agit de contribuer à la transparence des filières aurifères en Guyane et dans la région, et ainsi limiter le blanchiment et l'écoulement des productions illégales.

Le prestataire devait élaborer un protocole d'échantillonnage sur les gisements aurifères de Guyane française, du Suriname et de l'Amapa (Brésil), participer à cet échantillonnage, réaliser les analyses physico-chimiques et les interpréter dans le but d'estimer le potentiel de cette approche pour une traçabilité analytique de l'or en Guyane.

La durée de la prestation devait être de 12 mois, avec un début des travaux en août 2013, l'offre du prestataire devant être remise le 1^{er} juillet 2013.

Le BRGM a remis son offre le 24 juin 2013, offre qui a été acceptée par le WWF. Un contrat de prestation de service entre le WWF Cayenne et le BRGM Guyane a été signé le 7 septembre 2013, pour une durée d'un an. Il était prévu que l'échantillonnage soit réalisé conjointement par le WWF et le BRGM.

Cependant, l'essentiel des échantillons étant parvenu au BRGM Orléans fin octobre 2014 en raison de difficultés d'échantillonnage liées à certains exploitants miniers, un avenant au contrat, fixant la fourniture des livrables au 15 juin 2015 a été signé le 8 décembre 2015.

1.2. *Problématique et offre BRGM : le projet*

1.2.1. **Contexte et cadre du projet**

Est-il possible d'établir une « carte d'identité » des grains d'or, permettant de caractériser et de s'assurer de leur provenance géographique ? En République démocratique du Congo, environ 40 t d'or ont été produites en 2010 mais la moitié a quitté le pays de façon illégale. Ainsi, après avoir concerné le marché de l'étain et du niobium, la problématique de la traçabilité des minerais doit maintenant viser l'or et, in fine, le secteur de la bijouterie.

Les implications sont majeures dans un secteur où la filière légale côtoie la filière illégale. Les défis techniques et technologiques de la traçabilité sont à la hauteur des enjeux. L'action de recherche proposée est ambitieuse, car idéalement elle devrait permettre, partant de la connaissance détaillée des gîtes d'or de Guyane, de mettre en œuvre les techniques sophistiquées de caractérisation minérale, au service de la traçabilité.

Renseigner la provenance géographique d'un minerai aurifère, qu'il soit alluvial, éluvial ou primaire, suppose que ce dernier possède une signature minéralogique et chimique propre, qui le distingue d'autres provenances, ou qu'il soit associé à un ensemble de minéraux (paragenèse) caractéristique. Caractériser la chimie d'un grain d'or primaire n'est pas simple. Cette chimie peut varier au sein du gisement en fonction de la profondeur et/ou des différents stades de dépôt.

Le chimisme des grains d'or alluviaux peut également varier au cours de son transport. L'appauvrissement en Ag des bordures des grains alluviaux est un phénomène communément observé. Au cours de son transit dans les cours d'eau, il peut également amalgamer des phases absentes du gisement dont il dérive et évoluer lors du phénomène de « pépétisation ».

1.2.2. Etudes antérieures

De nombreuses publications concernent la traçabilité de l'or dans les domaines de l'archéométaballurgie, de l'exploration minière (localisation des gisements primaires aurifères dont dérivent les grains d'or alluviaux), l'identification de lots de minerai aurifère (identification de lots volés, « salage de prospect »,... ; cf. liste des références bibliographiques).

Les protocoles utilisés dans ces études sont basés sur :

- la caractérisation des micro-inclusions minérales (arsénopyrite, pyrrhotite, pyrite, galène, chalcopryrite, sphalérite, cobaltite, Sb gersdorffite, arséniures de Ni, éléments du groupe du platine (EGP), oxydes de Cu, séléniures de Pb, Hg et Cu) piégées dans les grains d'or (Leake *et al.* 1998 ; Chapman *et al.* 2000) ;
- la caractérisation chimique des grains d'or au moyen de techniques montrant des sensibilités, donc des limites de détection de plus en plus basses.

Les techniques de caractérisation chimique utilisées sont :

- la microsonde électronique avec, dans les conditions optimales d'utilisation, des limites de détection de l'ordre de quelques centaines de ppm ;
- le micro-PIXE (Particle Induced X-ray Emission) qui permet d'atteindre des limites de détection inférieures à la dizaine de ppm mais pas pour l'or ni les EGP en raison de problèmes d'interférence ;
- la SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) qui permet d'atteindre des limites de détection de l'ordre de quelques centaines de ppb ;
- la LAM-ICP-MS (Laser-Ablation microprobe coupled plasma mass spectrometry) avec des limites de détection de quelques dizaines de ppb.

Ces méthodes permettent de doser les éléments en traces dans les grains d'or tels que : Ag, Cu, Fe, Pb, Zn, Ti, Sn, Sb, Ru, Pd, Pt, Ga, Te, terres rares et ainsi de pouvoir distinguer la provenance géographique de grains d'or de gisements différents.

1.2.3. Approche

Afin de vérifier que les techniques de caractérisation de l'or déjà mises en œuvre dans d'autres contextes sont transposables à la Guyane, on propose donc de :

- 1) caractériser le minerai guyanais et voir comment évolue un signal (ou plusieurs signaux caractéristiques) d'un minerai primaire vers les placers ;
- 2) voir comment évolue un signal au sein de la filière de traitement (concentré – doré) ; et
- 3) étendre cette caractérisation à des minerais du Suriname.

Pour cette étude exploratoire, il était envisagé de tester plusieurs sites « pilotes » géographiquement distincts où on trouverait idéalement sur le même site du minerai « primaire », exploité dans la zone oxydée, du minerai en placer peu transporté puis des placers distaux pour lesquels la source de l'or ne serait pas établie (mélange probable de différentes sources). Pour les mêmes sites de prélèvement le produit à la sortie de l'affinage (doré) quand disponible, sera échantillonné. Le choix des sites devait être réalisé en croisant des critères géologiques et, localement, d'acceptabilité de la démarche.

Ce projet représente un challenge certain tant du point de vue conceptuel que du point de vue analytique, avec un fort taux d'incertitude. L'enjeu pour la profession et pour la puissance publique est d'abord socio-économique, visant à limiter l'exploitation des gîtes d'or à des secteurs et des pratiques autorisées et à valoriser d'éventuelles productions traçables et responsables, par exemple au moyen d'une certification ou d'un label d'origine.

Trois phases ont été mises en œuvre pour la réalisation du projet, chacune consistant en plusieurs tâches telles que décrites ci-dessous :

1.2.4. Phase 1 – Échantillonnage et caractérisation morphoscopique et chimique des grains

- Tâche 1 : synthèse bibliographique sur la typologie et la minéralogie des gisements aurifères de Guyane (l'annexe 1 montre la richesse de l'information disponible).
- Tâche 2 : échantillonnage des différents sites sélectionnés après obtention des autorisations nécessaires. La phase échantillonnage est critique dans la démarche.

Afin de caractériser les gisements et les types de minerai, des échantillons issus de différentes provenances guyanaises ont été testés. La caractérisation de minerais alluvionnaires de zones limitrophes (Suriname) devant permettre de tester une signature géographique et les possibilités de tracer une origine géographique.

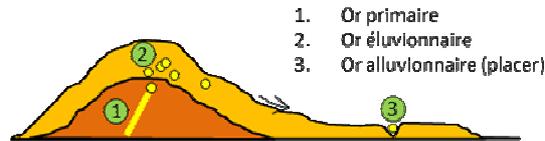
- Tâche 3 : caractérisation morphoscopique des grains de différentes provenances au microscope électronique à balayage.
- Tâche 4 : étude au microscope optique en lumière réfléchiée sur section polie couplée à une étude au microscope électronique à balayage afin de caractériser la nature des micro-inclusions.
- Tâche 5 : étude de la composition chimiques des grains à la microsonde électronique (les éléments dosés ayant été préalablement sélectionnés après une analyse qualitative). Dans cette première phase, cette méthode est privilégiée car plus rapide à mettre en œuvre et moins couteuse que le PIXE ou le LAM-ICP-MS.

1.2.5. Phase 2 – Caractérisation des signatures chimiques et isotopiques

- Tâche 6 : caractérisation de la signature chimique fine des grains d'or par LAM-ICP-MS (Laser-Ablation microprobe coupled plasma mass spectrometry) permettant d'atteindre des limites de détection de quelques dizaines de ppb et ainsi d'affiner la signature chimique des grains.
- Tâche 7 : détermination de la signature isotopique du plomb, du cuivre et de l'argent afin de vérifier l'existence de signatures propres à chaque site et l'évolution de cette signature au cours du transfert des grains dans la sphère supergène.

Le schéma ci-dessous résume la démarche et les techniques mises en œuvre

ECHANTILLONNAGE



CARACTERISATION

Optique	Chimique	Isotopique
Microscopie optique Microscope électronique à balayage (MEB)	Microsonde électronique ICP/MS – Ablation laser ICP-MS sur grains mis en solution	Isotopes du Plomb
Morphoscopie des grains Identification des inclusions minérales	Chimisme des grains pour éléments majeurs et traces	Signature isotopique des grains Identification des sources

Figure 7 : Résumé de la démarche et des techniques mises en œuvre.

2. Échantillonnage

Dans le cadre du projet, il était prévu que l'or soit fourni par le WWF, qui devait superviser l'échantillonnage avec le BRGM Guyane. En effet, pour le projet, il était fondamental que la provenance de l'or soit garantie. L'achat des échantillons aux producteurs a pris beaucoup plus de temps que prévu. Un premier lot de huit échantillons est parvenu au BRGM le 18 avril 2014. Des problèmes de dédouanement et de taxes se sont greffés aux difficultés initiales. Un second lot contenant les 20 échantillons restants est arrivé au BRGM le 21 octobre 2014. Au total, nous avons disposé de 18 échantillons identifiés de Guyane, cinq du Surinam, et cinq « aveugles » que le WWF a souhaité inclure dans l'étude. Ces derniers sont pour quatre d'entre eux des duplicats des précédents qu'il faudrait identifier à l'issue du projet (Tableau 1) ainsi qu'un échantillon dont l'exploitant, travaillant sur plusieurs secteurs, n'a pu certifier la provenance.

Les échantillons sont soit des concentrés, soit des dorés, pour ceux provenant de Guyane et des « galettes », pour ceux provenant du Surinam. Les concentrés sont issus de minéralisation « primaire », de minéralisation éluvionnaire, et de minéralisation alluvionnaire (Figure 7). La notion de minéralisation primaire doit être ici prise avec circonspection dans la mesure où en général il ne s'agit pas d'une minéralisation en roche dure non altérée comme on l'entend habituellement mais d'une minéralisation dans des zones oxydées, affectée par l'altération latéritique. Les dorés sont les produits de fusion des concentrés. Ainsi, afin de vérifier si la traçabilité potentiellement mise en évidence sur les concentrés était transférable aux dorés, 8 « paires » concentré-doré ont été obtenues, les dorés étant idéalement les produits de fusion de l'or des concentrés associés. Seuls 2 dorés sans concentré associés ont été obtenus. Les « galettes » du Surinam sont des concentrés qui ont très probablement été partiellement amalgamés.

Sept sites guyanais ont été étudiés : Crique Marc et Dagobert (commune de Saül), Montagne Tortue (Régina), Dieu-Merci, Saint-Élie et Saint-Élie-Saint Auguste (Saint-Élie) et Elysée-Paul Isnard (Saint-Laurent du Maroni), et cinq sites du Surinam provenant de la zone de Benzdorp (important secteur de production aurifère). Pour la Guyane et par commodité, on a regroupé les sites de prélèvement en « district » (Saül, Régina, Saint-Élie, et Saint-Laurent du Maroni). Il n'a pas été possible d'obtenir des échantillons du Brésil.

Il n'a donc pas été possible de réaliser un échantillonnage selon le schéma théorique initialement proposé (Figure 7). Dans certain cas, il a été possible d'obtenir pour un même site du minerai « primaire » et du minerai alluvionnaire, ainsi que les dorés correspondants. On valide cependant l'échantillonnage obtenu et l'on pourra raisonner plus globalement par district ou chantier d'exploitation, ce qui correspond bien à la problématique du projet (Figure 8).

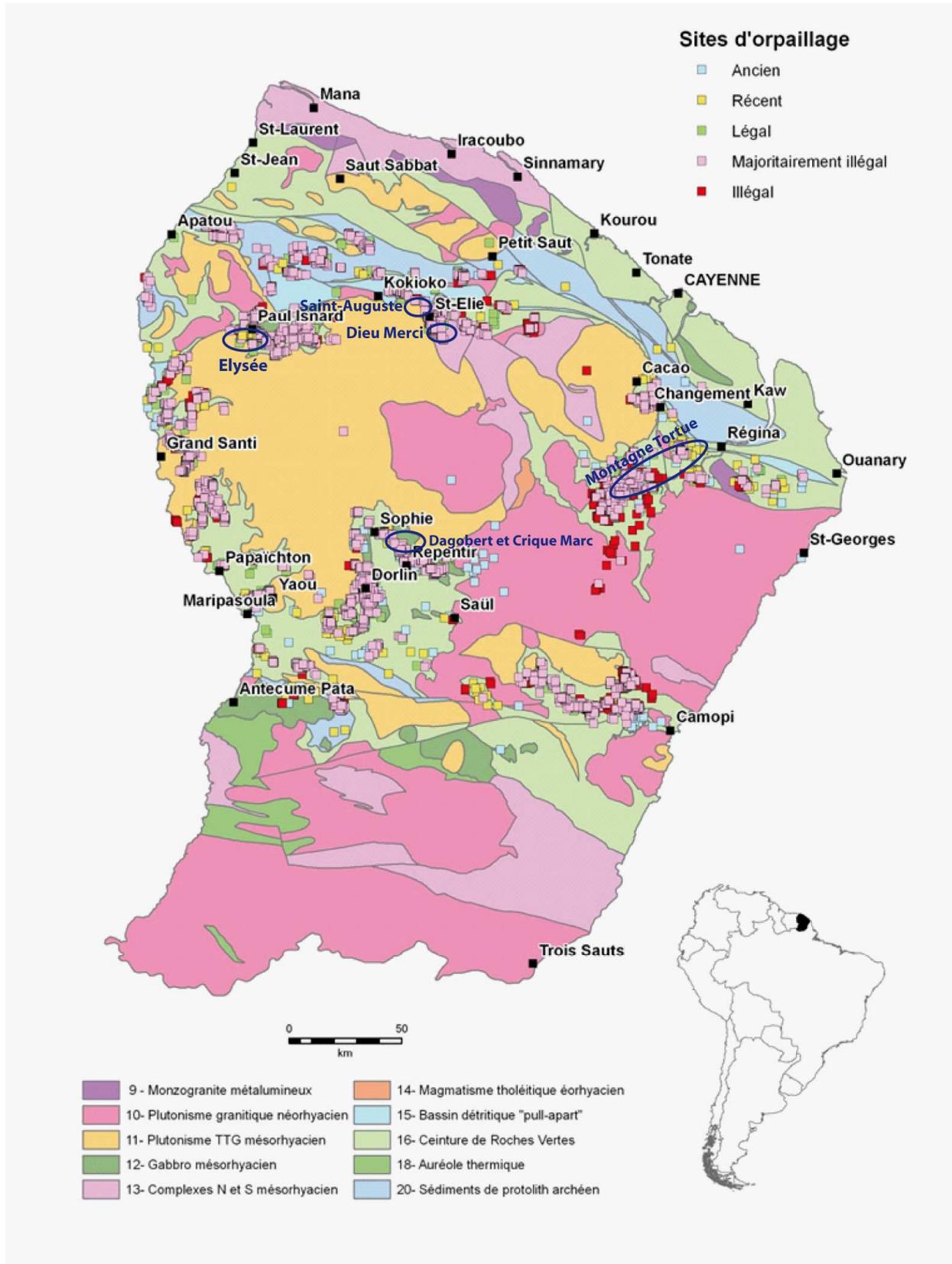


Figure 8 : Localisation des lieux d'extraction étudiés.

Traçabilité de l'or en Guyane

Code échantillon	Site (lieu-dit)	Commune	Exploitant	Titre minier	Date achat	Production	Minéralisation	Type
A7	Crique Marc	Saül	Ermina	AEX 14/2010	08/04/2014		alluvionnaire	concentré
A8	Crique Marc	Saül	Ermina	AEX 14/2010	08/04/2014		alluvionnaire	doré
B1	crique Marc	Saül	Ermina	AEX n°09_2013 / DEAL du 21/11/2013	18/08/2014	18/08/2014	alluvionnaire	doré
B2	crique Marc	Saül	Ermina	AEX n°09_2013 / DEAL du 21/11/2013	18/08/2014	18/08/2014	alluvionnaire	concentré
A9	Dagobert	Saül	Ermina	procédure accélérée	08/04/2014		primaire	concentré
A10	Dagobert	Saül	Ermina	procédure accélérée	08/04/2014		primaire	doré
B3	Dagobert	Saül	UMS	Concession UMS n°250	03/09/2014	01/09/2014	primaire	doré
B4	Dagobert	Saül	UMS	Concession UMS n°250	03/09/2014	01/09/2014	primaire	concentré
A7bis	Elysée (Paul Isnard)	Saint-Laurent du M	Auplata		16/05/2014		primaire	doré
A5	Montagne Tortue	Régina	Mydas (Costa)	AEX Prego 11/11/2011	02/03/2014		alluvionnaire	concentré
A6	Montagne Tortue	Régina	Mydas (Costa)	AEX Prego 11/11/2012	02/03/2014		alluvionnaire	doré
A8bis	Dieu-Merci	Saint-Elie	Auplata		16/05/2014		primaire	doré
B5	Saint-Elie	Saint-Elie	SMSE	Concession SE	15/09/2014	15/09/2014	primaire	doré
B6	Saint-Elie	Saint-Elie	SMSE	Concession SE	15/09/2014	15/09/2014	primaire	concentré
A1	Saint-Elie (Saint-Auguste)	Saint-Elie	SMSE	Concession SE	25/03/2014		primaire	doré
A2	Saint-Elie (Saint-Auguste)	Saint-Elie	SMSE	Concession SE	25/03/2014		primaire	concentré
A3	Saint-Elie (Saint-Auguste)	Saint-Elie	SMSE	Concession SE	25/03/2014		éluvionnaire	concentré
A4	Saint-Elie (Saint-Auguste)	Saint-Elie	SMSE	Concession SE	25/03/2014		éluvionnaire	doré
S1	Yellow star	Benzdorp	Yellow Star		02/10/2014			galette
S2	Baixaõ do Benzdorp	Benzdorp	chantier indépendant		02/10/2014		alluvionnaire a priori	galette
S3	Pois-é	Benzdorp	chantier indépendant		02/10/2014		alluvionnaire a priori	galette
S4	Benzdorp (à quelques centa	Benzdorp	chantier indépendant		02/10/2014		alluvionnaire	galette
S5	Baixaõ da onça	Benzdorp	chantier indépendant		02/10/2014		alluvionnaire a priori	galette
Aveugle								
X1								
X2								
X3								
X4								
Y1								

Tableau 1 : Origine et caractéristiques des échantillons.

3. Préparation des échantillons

Les concentrés sont constitués de grains en général très hétérogènes en taille et, en plus des grains d'or, ils contiennent d'autres minéraux tels que des silicates, des sulfures ou des oxydes de fer, ainsi que des particules d'origine anthropique.

Les dorés qui se présentaient sous forme de gouttes ont été fragmentés. D'autres nous sont parvenus sous forme de copeaux.

Dans un premier temps, afin de faire des observations morphoscopiques au microscope électronique à balayage, les grains d'or (et fragments de dorés) ont été prélevés à l'aide d'une pointe métallique et déposés sur un plot métallique recouvert d'un carbone adhésif.

Par ailleurs, afin de préparer des montages polis, les grains ont été avec la même technique déposés selon des alignements sur un adhésif double face fixé sur une lame de plastique. Un anneau métallique a ensuite été placé autour de ce montage, puis une résine a été coulée dans l'anneau. Après l'avoir décollé l'anneau du scotch, le montage a ensuite été poli. Un montage, correspondant à un échantillon est constitué de 50 à 100 grains.

Ces montages ont été utilisés pour faire des observations au microscope par réflexion et au microscope électronique à balayage, puis pour réaliser les analyses à la microsonde électronique, et enfin pour les analyses ICP-MS par ablation laser.

Enfin, il a aussi été nécessaire de réaliser une séparation très fine à la main sous loupe binoculaire des grains avant leur mise en solution pour la chimie avant les analyses isotopiques, afin d'éviter toute contaminations par des sulfures et éléments anthropiques notamment. De plus les grains présentant des inclusions d'autres minéraux ont dû être écartés.

4. Caractérisation des grains d'or et des microinclusions

4.1. méthode

Les grains d'or des différents concentrés et des copeaux des différents dorés ont été montés en sections polies. L'étude microscopique des grains d'or permet d'étudier leur morphologie, les éventuelles zonations, la nature et l'abondance des micro-inclusions. Ces caractéristiques ont été établies à partir d'observation en microscopie optique en lumière réfléchie complétées par des caractérisations au microscope électronique à balayage (MEB).

De simples observations microscopiques sur la morphologie des grains peuvent donner des informations importantes sur le lot de grain d'or en cours d'observation. Des grains massifs, aux bordures rectilignes et non enrichies en or sont symptomatiques de grains primaires (Figure 9A et B). Au contraire, les grains d'or alluvionnaires montrent fréquemment des morphologies arrondies et des bordures enrichies en Au (Figure 9C et D). Une nuance doit être apportée car nous avons observé, dans de rares cas des grains qualifiés de primaires montrant des bordures enrichies en Au. Dans la zone oxydée de filons aurifères, il n'est pas rare d'observer ces enrichissements en bordure de grains. Ces phénomènes ont par exemple été observés sur l'or primaire du site de Changement (Chamel, 2014) et dans le cadre de gisements épithermaux (Greffié *et al.* 2002). Enfin, les galettes de grains d'or du Surinam montrent une morphologie en « chou-fleur » (Figure 9E) et des bordures enrichies ou appauvries en or (Figure 9F). Ces dernières sont caractéristiques d'une amalgamation au mercure (Marquez-Zavalía, 2004).

Après ces caractérisations morphologiques, les études se sont focalisées sur la nature et l'abondance des micro-inclusions dans chaque grain afin de rechercher la signature minéralogique de chaque échantillon. L'identification des micro-inclusions est réalisée au MEB.

Pour les concentrés, seules les micro-inclusions contenues dans les grains ont été comptabilisées ; les inclusions en bordure de grain n'ont pas été prises en compte car elles auraient pu avoir une origine secondaire (donc être acquise lors du transport). Pour les dorés, toutes les micro-inclusions, y compris celles en bordure des particules, ont été prises en compte.

Les micro-inclusions ne sont pas toujours réparties de façon homogène dans un lot de grains constituant un échantillon. Dans de nombreux cas, elles sont concentrées dans quelques grains. Pour tenir compte de la répartition des micro-inclusions parmi les grains d'un échantillon et valoriser les micro-inclusions réparties entre plusieurs grains plutôt que celles concentrées dans un unique grain, le nombre de micro-inclusion a été pondéré avec la formule suivante :

$$\text{Pondération A} = Ni * \frac{Ng}{Ngt}$$

Où : A : la micro-inclusion étudiée (sulfure de fer, tellurure...)

Ni : Nombre total d'inclusions A dans l'échantillon

Ng : Nombre de grains contenant des inclusions A

Ngt : Nombre total de grains dans l'échantillon

Ces données pondérées sont ensuite converties en pourcentage et insérées dans un diagramme circulaire.

Les micro-inclusions de quartz sont présentes en quantité dans les tous les grains de concentrés et de dorés. Cette espèce étant commune à tous les grains elle n'est pas prise en compte dans notre recherche de signature, et ne sera jamais comptabilisée dans cette étude. Notons cependant que les dorés contiennent généralement moins de cristaux de quartz que les concentrés.

Les résultats de cette méthode sont présentés pour chaque provenance pour faciliter la recherche de points communs entre les échantillons d'une même localité.

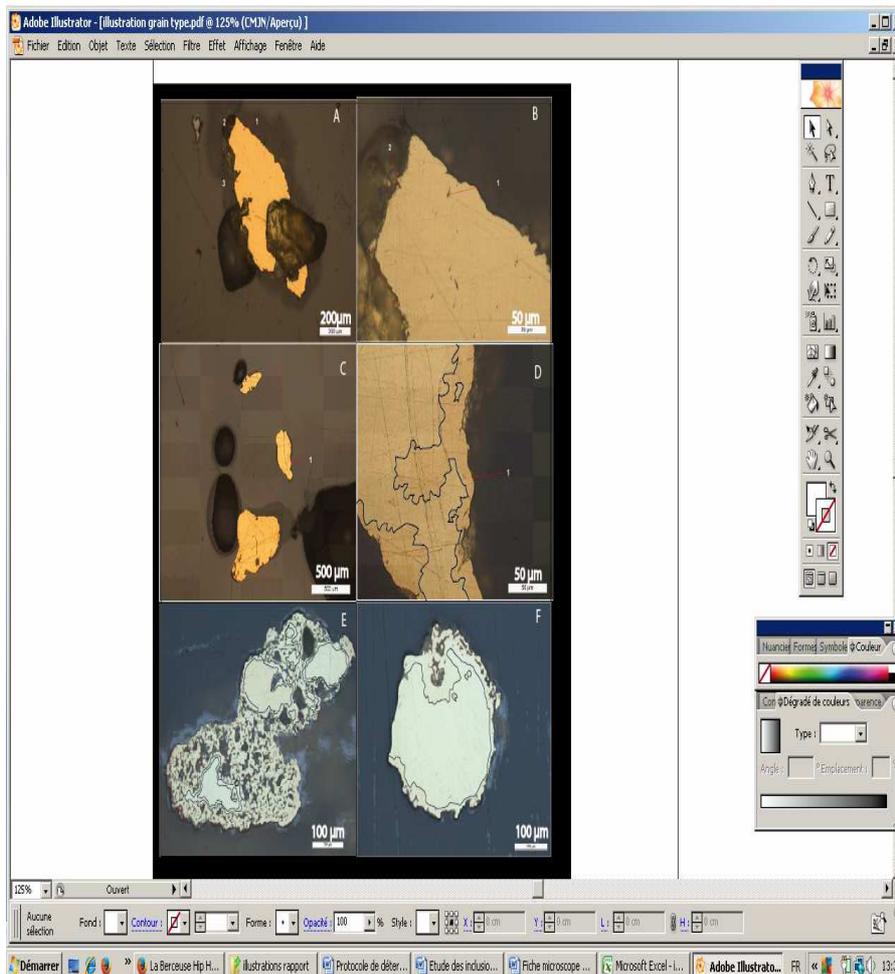


Figure 9 : Photographie de différents grains caractéristiques : (A) grain primaire avec des bordures rectilignes, (B) grain primaire sans enrichissement en or sur les bordures, (C) grain alluvionnaire avec des bords arrondis, (D) grain alluvionnaire avec des bordures enrichies en or entourées en noir, (E,F) grain provenant du Surinam montrant des zones appauvries ou enrichies en or entourées en noir et des textures en « choux-fleurs » (photographies réalisées au microscope optique en lumière réfléchie).

4.2. Résultats

4.2.1. Saint-Élie

Pour le site de Saint-Élie nous disposons de sept échantillons : 4 dorés, 2 concentrés primaires, 1 concentré éluvionnaire. Les échantillons A1, A2, A3 et A4 proviennent du lieu-dit Saint-Auguste. Les échantillons B5 et B6 sont simplement intitulés Saint-Elie, sans autre précision. Parmi ces échantillons, A1-A2, A3-A4, B5-B6 constituent des paires concentré-doré.

Le concentré B6

- **Morphologie des grains**

Les grains sont massifs, de grande taille (600 à 1 200 μm) et possèdent majoritairement des faces rectilignes (Figure 10 A). Ces caractéristiques correspondent bien à des grains d'origine primaire. De rares grains présentent des bordures arrondies (Figure 10 B). Ils ne présentent pas d'enrichissement en or en bordure excepté un grain qui concentre une importante quantité d'inclusions de bismuth dans ses bordures enrichies (Figure 11). Quelques oxydes de fer sont présents en bordure de quelques grains.

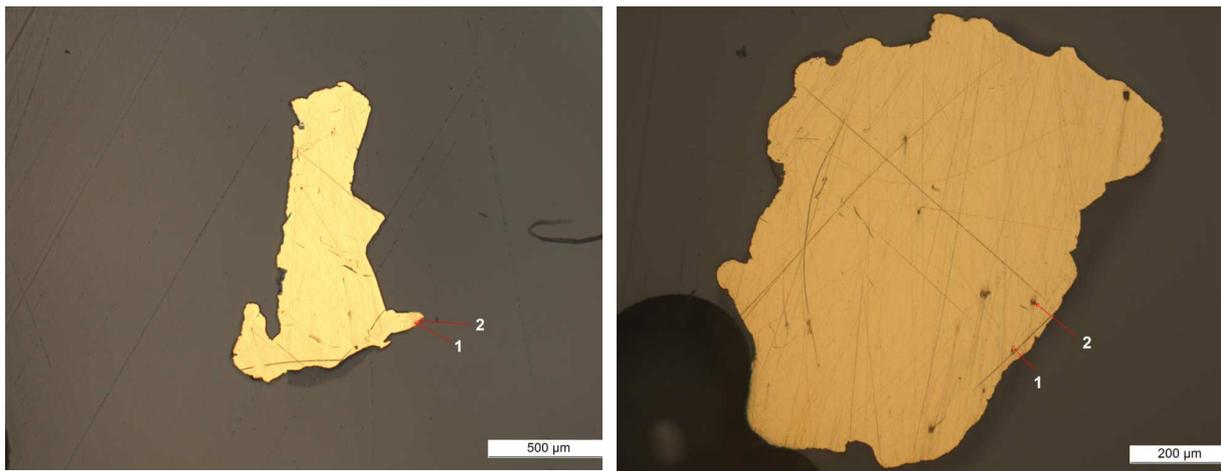


Figure 10 : Photographie du grain aux bords rectilignes (gauche) ;
(B) photographie du grain arrondi (droite).

- **Description des micro-inclusions**

Cent-une inclusions ont été trouvées dans les 41 grains que compte cet échantillon. Ces inclusions sont réparties dans 14 grains. Ainsi, 34,1 % des grains contiennent des inclusions. On constate que 56,4 % de ces inclusions sont du bismuth (ou un alliage possible Au_2Bi), après pondération cette valeur s'élève à 41 %. Seulement deux grains contiennent des inclusions de bismuth, dont 54 observées dans un même grain. Ces micro-inclusions peuvent apparaître au microscope gris clair ou gris foncé bleu voire violet (Figure 11). 18,8 % des inclusions sont des oxydes de fer, après pondération cette valeur s'élève à 48 % car ses inclusions sont réparties de façon homogène dans la plupart des grains de l'échantillon.

D'autres micro-inclusions ont été observées en très faible quantité dans ces grains, parfois même en unique exemplaire. La plupart d'entre elles sont des oxydes. La liste complète des micro-inclusions observées est visible en légende du diagramme de la Figure 12.

Le bismuth (ou un alliage or-bismuth) accompagné d'oxyde de fer est considéré comme étant la signature minéralogique de cet échantillon d'origine primaire même si le bismuth est réparti de façon très hétérogène parmi les grains de cet échantillon.

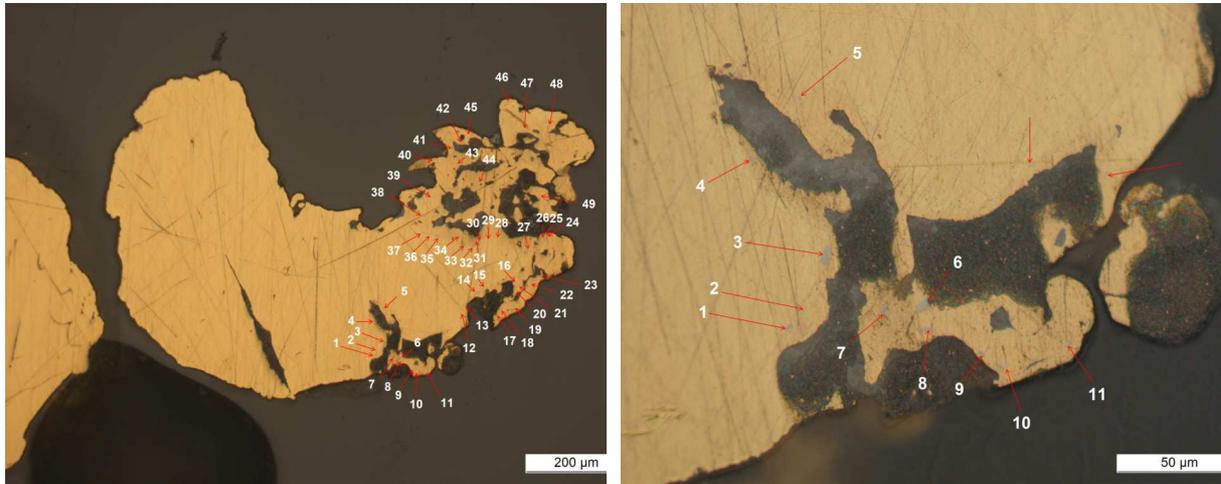


Figure 11 : Photographie d'un grain contenant d'abondantes inclusions de Bi (gauche) ; détail du grain et de sa bordure enrichie en or (droite).

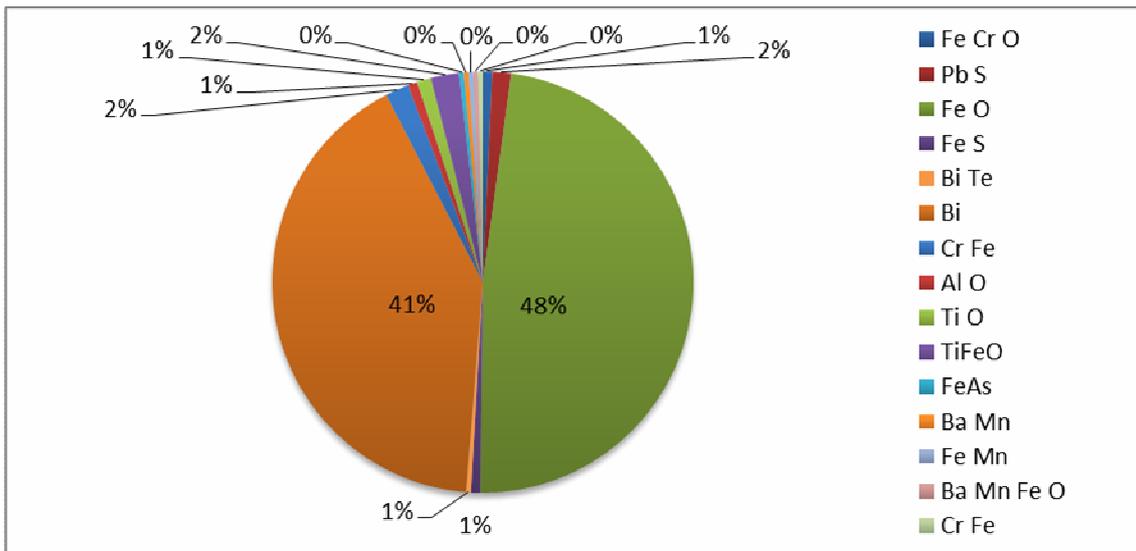


Figure 12 : Diagramme de distribution des micro-inclusions contenues dans les grains de l'échantillon B6 après pondération.

Le doré B5

Le doré B5 est issu de la fusion du concentré B6 décrit précédemment.

- **Morphologie des grains**

Les grains correspondent à des copeaux découpés à l'aide d'un foret. Leur morphologie artificielle ne présente pas d'intérêt pour cette étude.

- **Description des micro-inclusions**

Ces copeaux ont la particularité d'être parcouru par de très nombreuses veinules de plomb (ou d'alliage Pb,Au) associées à des tellures de plomb et à des sulfures de fer de forme globuleuse (Figure 13), également bien visibles sur la cartographie réalisées au MEB (Figure 14). Ces images montrent une variation des teneurs en Pb dans les veines.

Compte-tenu de l'abondance de ces veinules à minéraux de Pb, Pb-Te qui n'ont été rencontrées que dans cet échantillon, aucun traitement statistique n'a été réalisé. On constate donc une forte différence entre les inclusions observées dans le concentré primaire B6 et le doré B5 qui en dérive. L'abondance de Pb suggère une origine autre que celles des grains d'or primaires. Il ne s'agit pas d'une caractéristique liée à l'origine des grains mais acquise au cours de leur fusion.

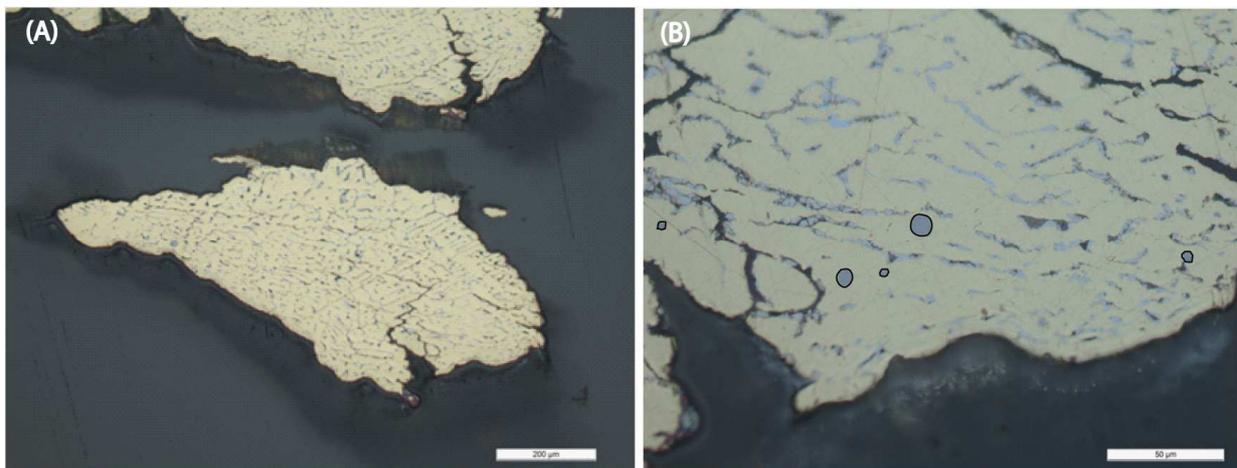


Figure 13 : (A) Photographie en lumière réfléchie du grain étudié; (B) veines et micro- inclusions de sulfure de fer (entourée en noir) contenues dans le grain. Les veines de plomb (ou d'alliage Pb, Au) apparaissent gris clair au microscope et les sulfures de fer sont gris clair violet.

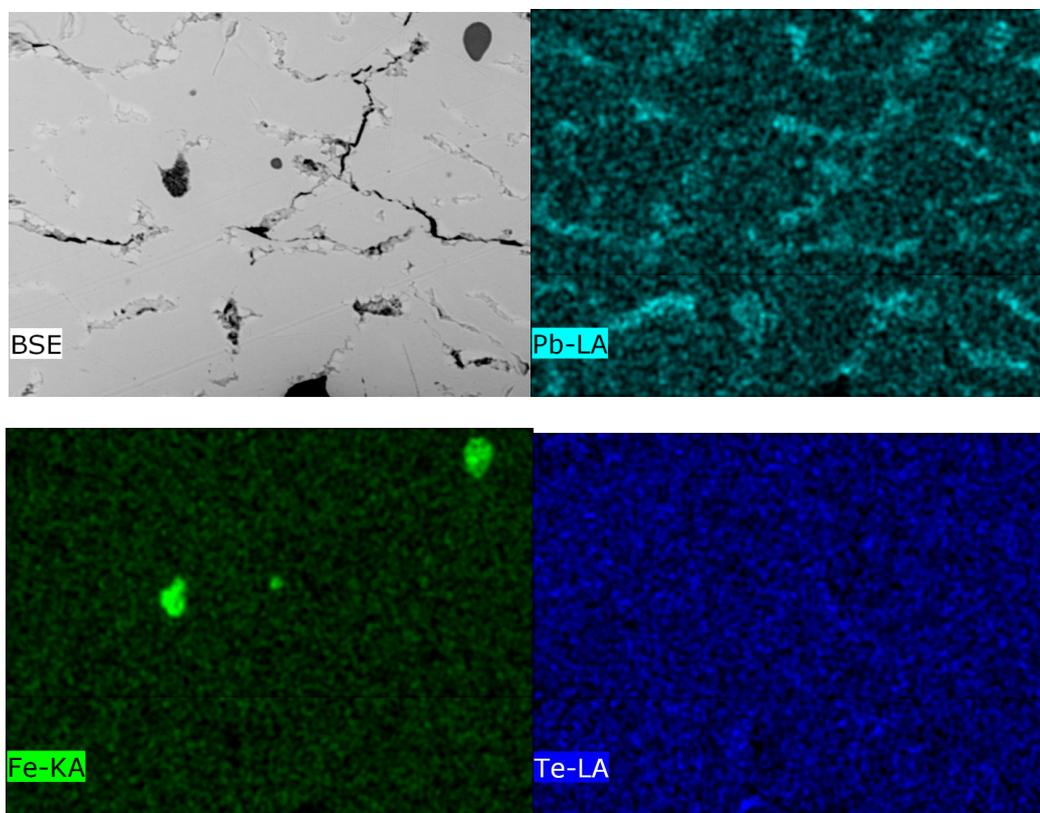


Figure 14 : Cartographie au MEB des veines de Pb (ou d'alliage Pb, Au).
BSE : image en mode électrons rétrodiffusés.

4.2.2. Saint-Élie (Saint-Auguste)

Les échantillons provenant du site de Saint-Élie (Saint-Auguste) sont les échantillons A2 (concentré primaire) – A1 (doré correspondant) et A3 (concentré éluvionnaire) – A4 (doré correspondant).

Le concentré A2

- **Morphologie des grains**

Les grains de ce concentré sont d'origine primaire. Ils sont massifs. Une grande proportion montre des bords arrondis caractéristique d'une remobilisation des grains (Figure 15 A), ce qui est inattendu pour des grains d'origine primaire. Une proportion plus faible des grains montre des faces planes caractéristiques d'une origine primaire sans remobilisation (Figure 15 B). Un grain possède des bordures enrichies en or et un autre enrichies en argent sur des grains qui ne semblent pas avoir été remobilisés (Figure 16). Les oxydes de fer sont fréquents en bordure des grains et plus rarement en pseudomorphose de grains cubiques en inclusions dans les grains.

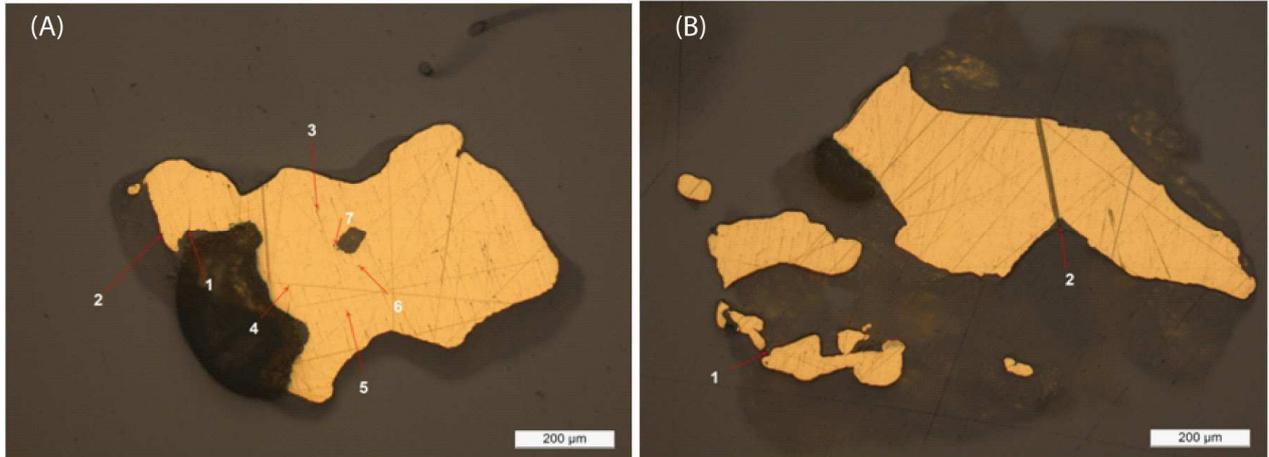


Figure 15 : (A) Photographie en lumière réfléchie d'un exemple de grain émoussé ; (B) photographie du grain exemple d'un grain aux bordures rectilignes.

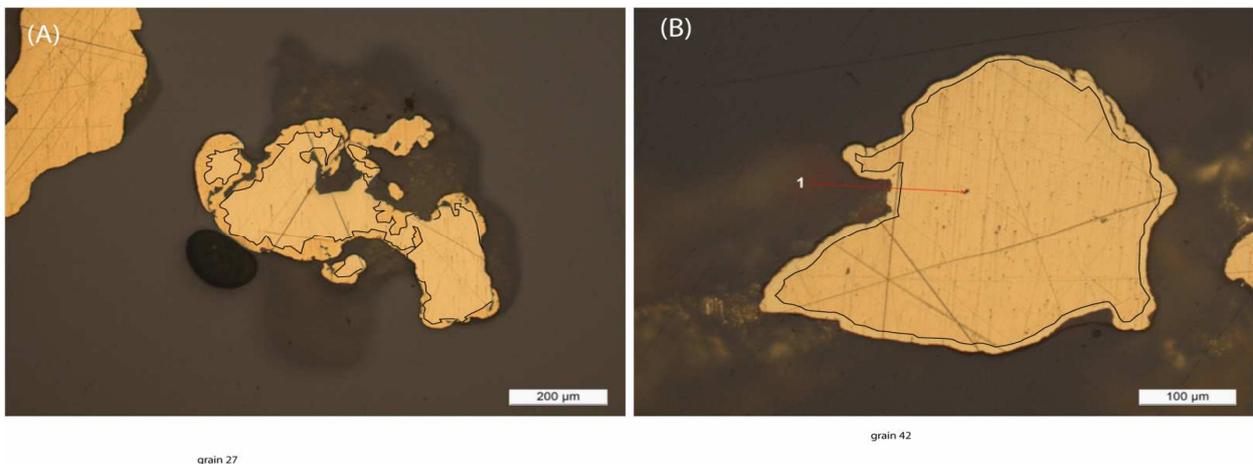


Figure 16 : (A) Photographie en lumière réfléchie du grain de l'échantillon A2 présentant des bordures enrichies en or; (B) photographie en lumière réfléchie du grain de l'échantillon A2 présentant des bordures enrichies en argent.

- **Description des micro-inclusions**

L'échantillon A2 comptabilise 51 inclusions réparties dans 20 grains, sur les 56 grains que contient cet échantillon. Ainsi 35,7 % des grains contiennent des inclusions. 36,5 % de ces inclusions sont des tellurures de bismuth et 28,8 % sont des oxydes de fer (après pondération ces valeurs s'élèvent respectivement à 48 % et 43 %). Les autres types d'inclusions, en proportions très mineures, apparaissent sur le diagramme de la Figure 17.

Les tellurures de bismuth accompagnés d'oxydes de fer sont la signature minéralogique de cet échantillon d'origine primaire.

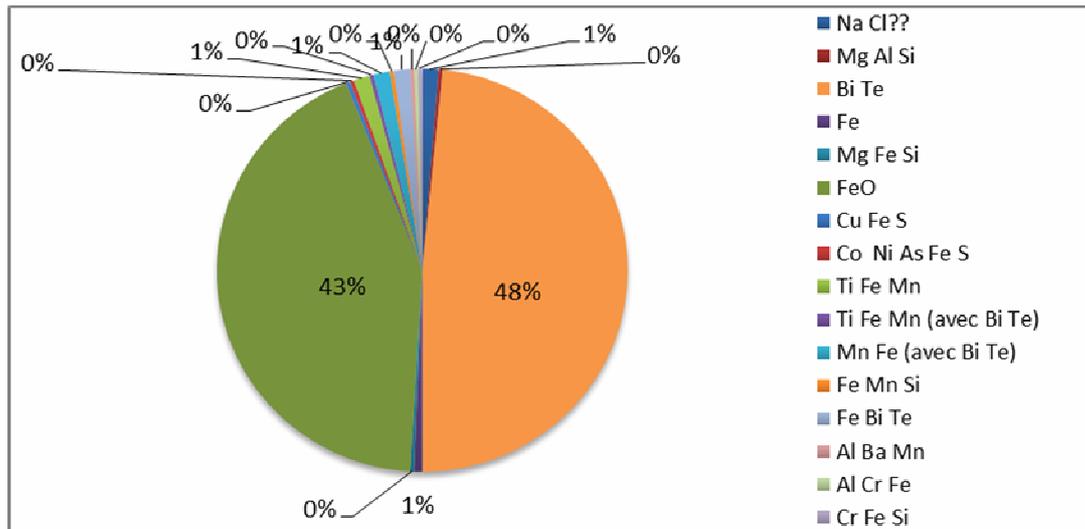


Figure 17 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains du concentré A2.

Le doré A1

L'échantillon A1 est le doré correspondant au concentré d'origine primaire A2.

- **Morphologie des grains**

Les grains sont présentés sous forme de copeaux découpés à l'aide d'un foret. Leur morphologie ne présente pas d'intérêt pour cette étude.

- **Description des micro-inclusions**

Tous ces copeaux sont criblés d'inclusion. De ce fait, un seul copeau a été finement étudié et a été décrit comme étant représentatif de tous les autres copeaux de cet échantillon.

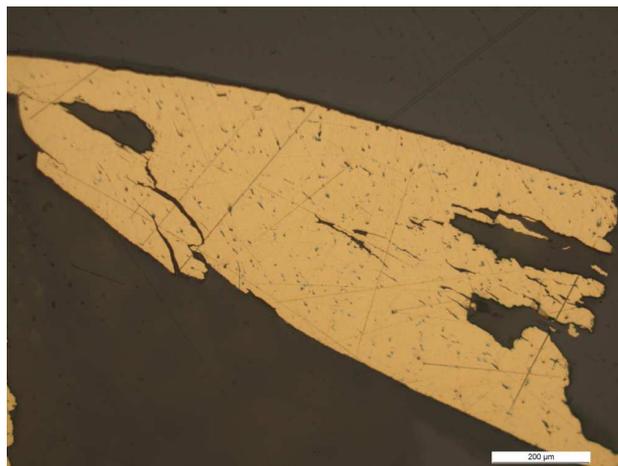


Figure 18 : Photographie du grain étudié parmi les copeaux de l'échantillon de doré A1.

Quatre-vingt-seize inclusions ont été comptabilisées dans ce grain (Figure 18). Elles ont été analysées au MEB comme étant des tellurures de plomb, des tellurures de bismuth, des sulfures de fer et des alliages AuPb, AuBi, AuPbBi et du quartz (Figure 19).

Les micro-inclusions correspondant aux alliages AuPbBi, AuPb ou AuBi avec de fortes teneurs en PbBi, Pb ou Bi sont gris foncé alors que celles qui contiennent une plus faible proportion de PbBi, Pb ou Bi sont gris clair. Cette différence de couleur permet de voir que certaines inclusions montrent une zonation de leur teneur en PbBi, Pb ou Bi. En annexe 1, on peut voir une inclusion composée en son centre d'un alliage pauvre en PbBi entourée d'une phase riche en Bi. Cet exemple montre également qu'il est nécessaire, pour une détermination fine, d'analyser ces micro-inclusions au MEB car la couleur en lumière réfléchi ne permet pas de déterminer si l'alliage est composé de Pb+Bi ou uniquement d'un de ces deux éléments.

Les inclusions de sulfure de fer sont automorphes et souvent entourées de tellures de plomb xénomorphes et exceptionnellement d'un alliage xénomorphe de PbBi (Figure 20). La répartition de ces micro-inclusions dans le grain représentatif de l'échantillon A1 est figurée dans le graphique Figure 19. Les données n'ont pas été pondérées puisque ces inclusions ont été comptées dans un seul fragment.

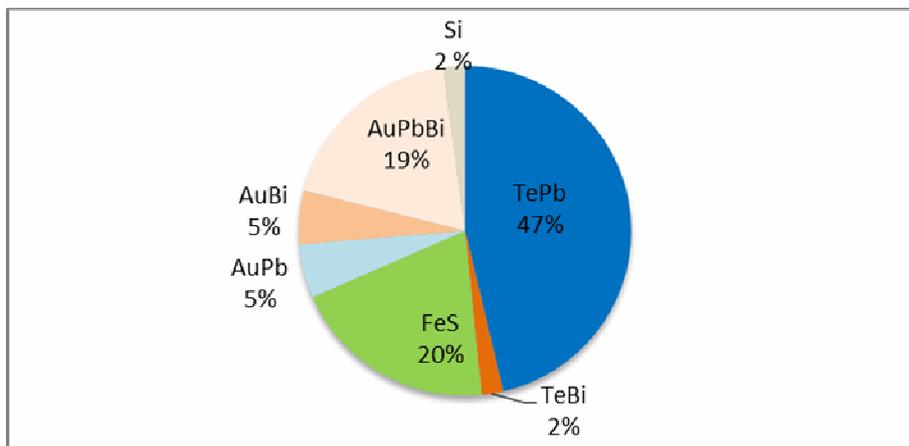


Figure 19 : Diagramme de distribution des micro-inclusions majoritaires dans le grain de l'échantillon de doré A1.

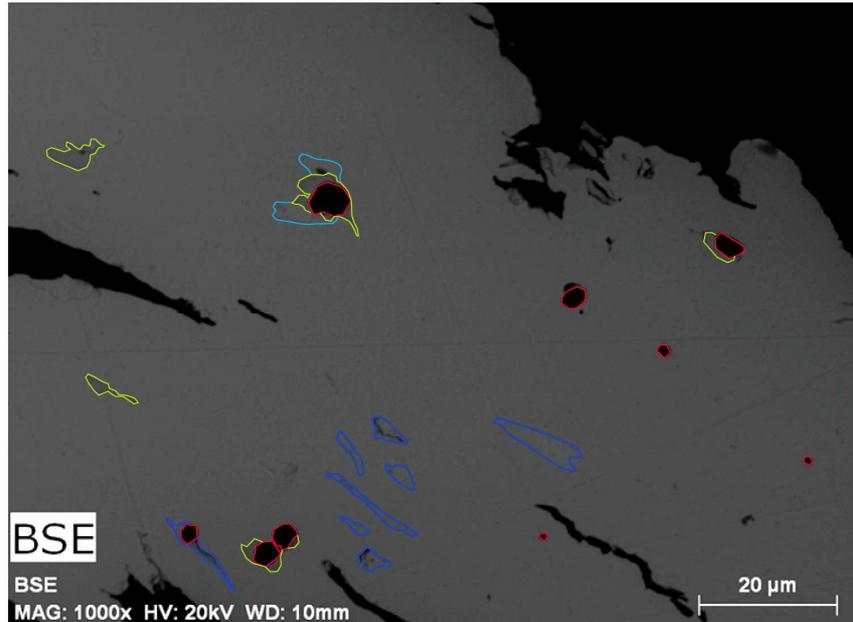


Figure 20 : Carte des inclusions du doré A1 mettant en évidence des sulfures de fer (en rouge) entourés de tellurure de plomb (vert), d'un alliage riche en PbBi ou Pb ou Bi (bleu foncé) et d'un alliage pauvre en Pb (bleu clair).

Le concentré A3

- **Morphologie des grains**

Les grains de ce concentré sont d'origine éluvionnaire. Ils sont massifs et majoritairement arrondis (Figure 21 A). Les grains qui montrent des surfaces rectilignes et des angles en bordure de grains sont rares. Les bordures de ces grains sont parfois localement légèrement enrichies en or. Quelques grains sont encore prisonniers de leur probable gangue de quartz (Figure 21 B).

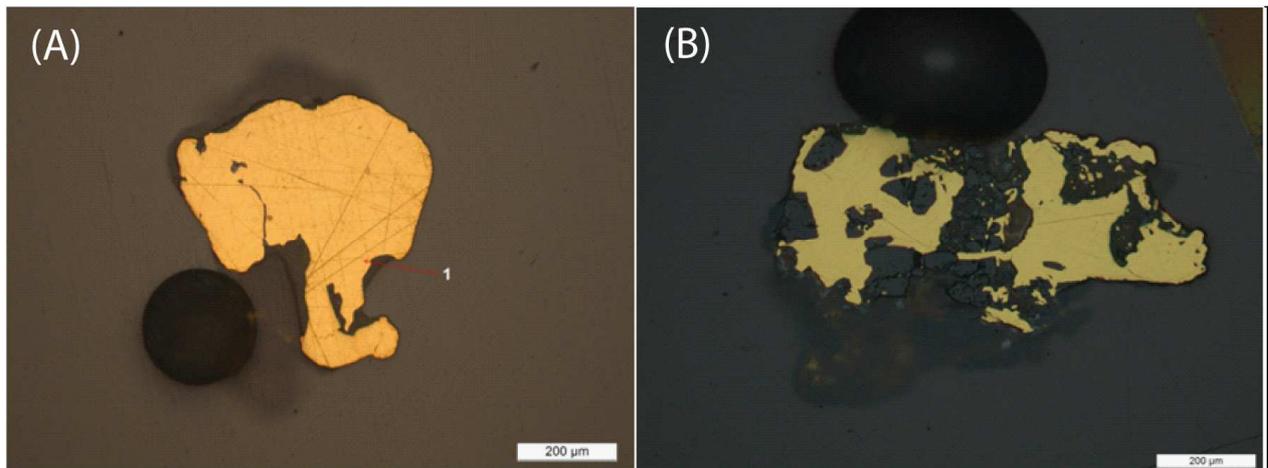


Figure 21 : (A) Photographie en lumière réfléchie d'un grain massif et arrondi ; (B) photographie du grain emprisonné dans la relique de la gangue quartzreuse.

- **Description des micro-inclusions**

L'échantillon A3 ne contient que neuf inclusions réparties dans sept grains sur les 105 grains qu'il contient. Ainsi seulement 6,7 % des grains contiennent des inclusions et 33,3 % de ces

inclusions sont des sulfures de fer, 33,3 % sont des minéraux automorphes identifiés soit comme de l'arsénopyrite contenant Ni et Co soit comme des minéraux de type CoNiAsS (série cobaltite-gersdorffite) et 22,2 % sont des tellures de bismuth. Après pondération la concentration de ces micro-inclusions s'élève à 45 % pour le sulfure de fer, 30% pour les sulfoarséniures et 20 % pour les tellures de bismuth (Figure 22).

Une inclusion à soufre seul a également été identifiée dans un grain.

Retenons que cet échantillon d'origine éluvionnaire est très pauvre en inclusions.

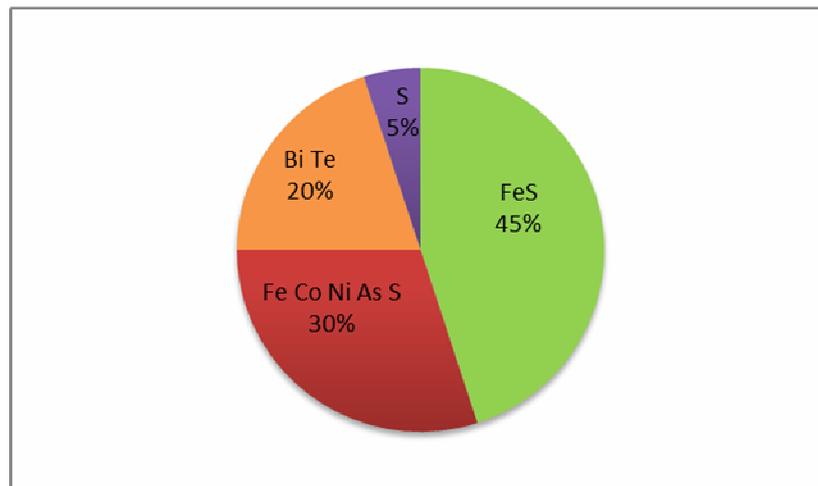


Figure 22 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains de concentré A3.

Le doré A4

L'échantillon A4 est le doré correspondant à l'échantillon de concentré éluvionnaire A3.

- **Morphologie des grains**

Les grains sont présentés sous forme de copeaux découpés à l'aide d'un foret. Leur morphologie ne présente pas d'intérêt pour cette étude.

- **Description des micro-inclusions**

Les copeaux de cet échantillon sont criblés d'inclusions (Figure 23), ainsi un seul a été étudié en considérant qu'il était représentatif des autres copeaux de l'échantillon A4.

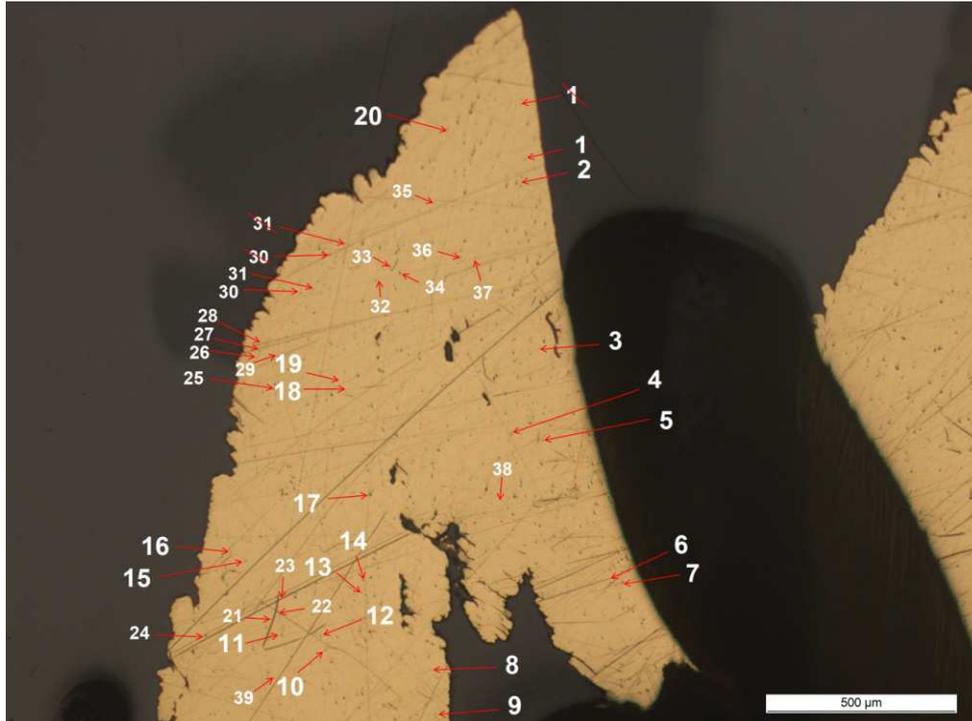


Figure 23 : Photographie du grain étudié dans l'échantillon A4, les flèches pointent les micro-inclusions.

Cent-quatre micro-inclusions ont été comptabilisées dans ce copeau de doré. Les micro-inclusions observées sont principalement des tellurures de plomb xénomorphes ou automorphes. On observe également des alliages AuPb xénomorphes, des sulfures de fer automorphes ou xénomorphes et plus rarement des sulfure de plomb et des alliages FePb (Figure 24).

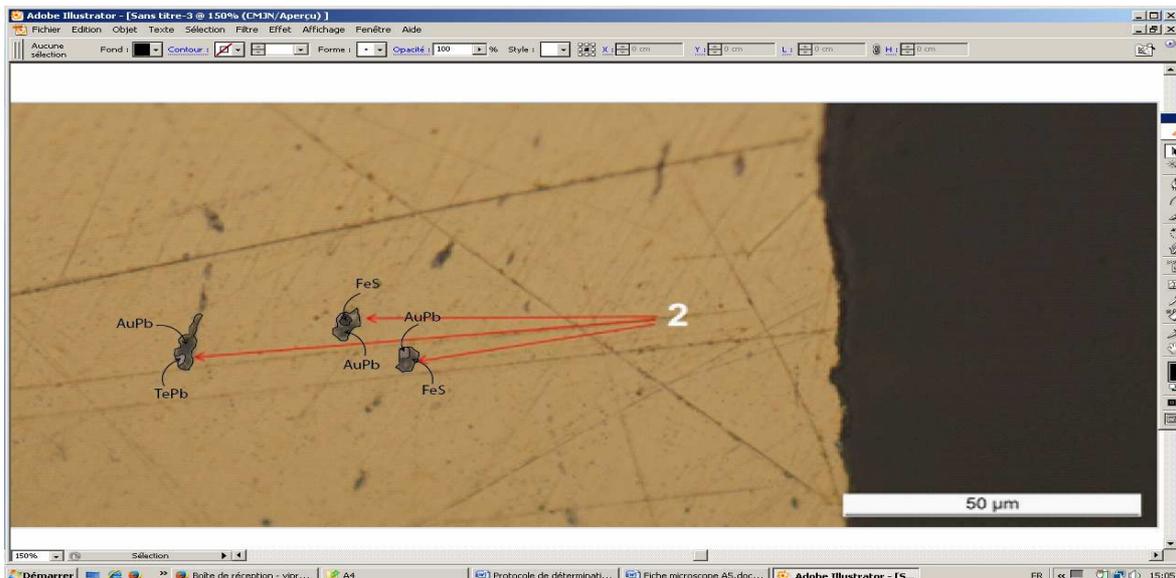


Figure 24 : Photographie de 3 inclusions analysées au MEB.

Il n'est pas rare d'observer dans ce grain, une micro-inclusion de tellurure de plomb automorphe dans un alliage AuPb xénomorphe et souvent de forme circulaire (Figure 25).

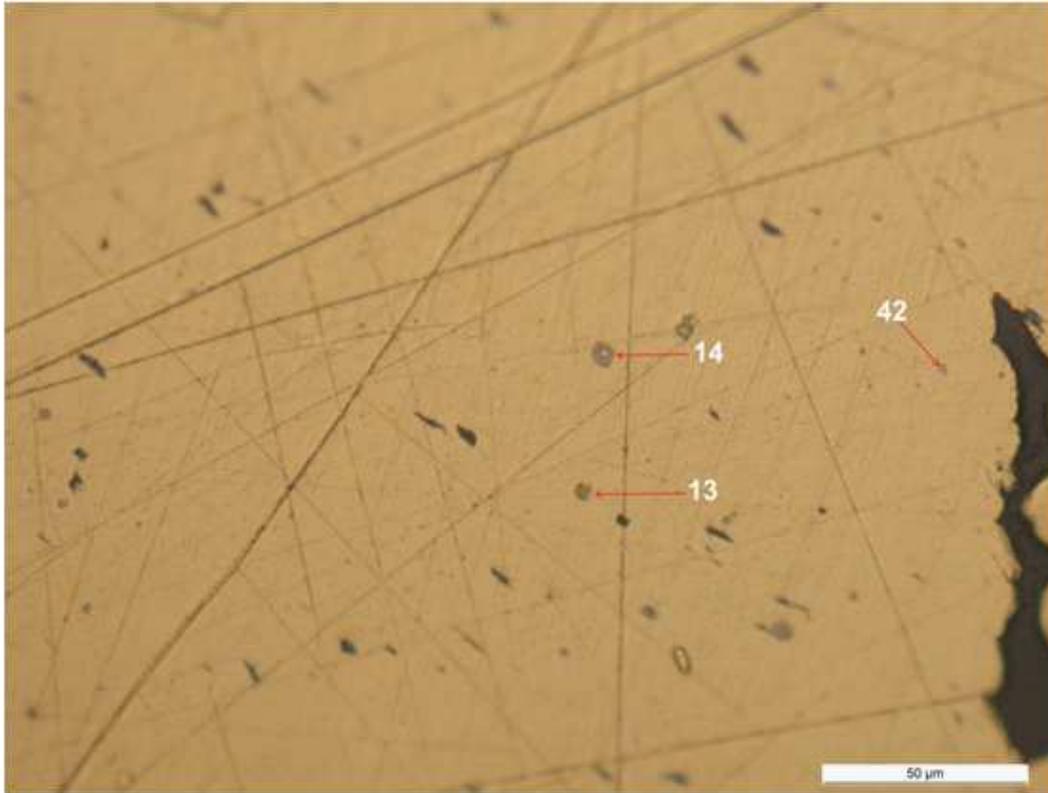


Figure 25 : Photographie des micro-inclusions 13 et 14 qui sont des alliages AuPb englobant un tellure de plomb automorphe.

La répartition de ces différentes inclusions observées dans ce grain est indiquée dans le graphique ci-dessous (Figure 26).

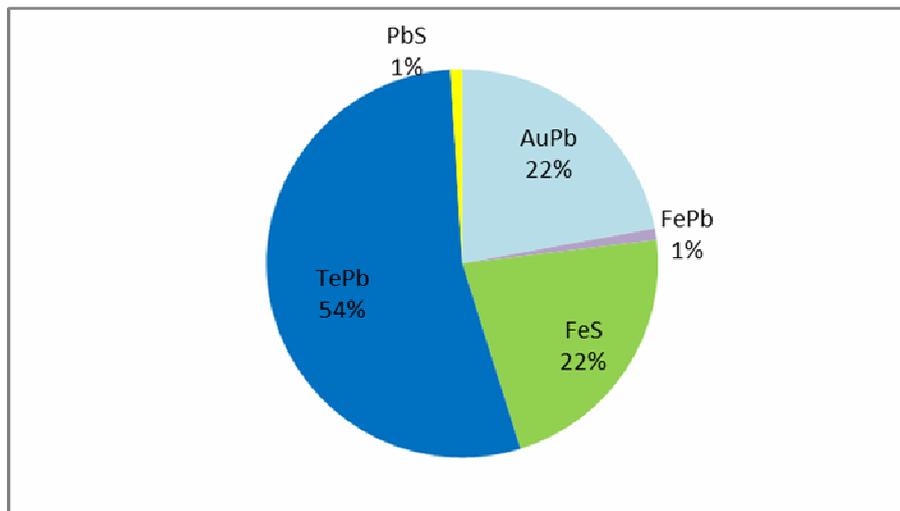


Figure 26 : Diagramme de distribution des micro-inclusions observées dans le grain de l'échantillon de doré A4.

4.2.3. Dieu-Merci

Le doré A8b est le seul représentant que nous ayons pour caractériser le lieu d'extraction Dieu-Merci. Nous n'avons pas son concentré mais nous savons qu'il est d'origine primaire.

Le doré A8b

- ***Morphologie des grains***

Les grains de ce doré sont des copeaux criblés d'inclusions (Figure 27).

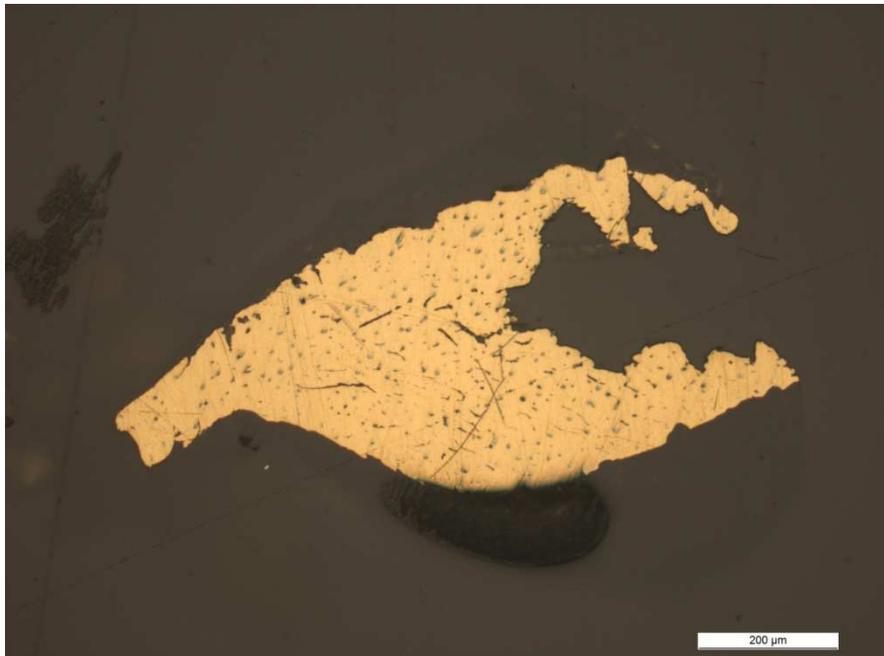


Figure 27 : Photographie du fragment 1 (microscope optique en lumière réfléchie).

- **Description des micro-inclusions**

Deux-cent-cinquante-sept inclusions ont été comptabilisées dans ce fragment : 150 tellures de bismuth, 66 sulfures de fer, 21 tellures de plomb et bismuth, 14 tellures de bismuth avec du cuivre, 6 tellures de plomb et bismuth avec du cuivre, 2 inclusions montrant des zonations de tellures de plomb bismuth et de tellures de bismuth et une inclusion de chalcopryrite.

Sont comptées comme tellures de bismuth les inclusions qui contenaient du tellure et exclusivement du bismuth et celles qui avaient deux fois plus de bismuth que de plomb. Les tellures qui contenaient autant de plomb que de bismuth ont été comptabilisés parmi les inclusions de tellure de plomb et de bismuth.

Les micro-inclusions qui contiennent du cuivre se divisent en deux catégories : celles qui contenaient du plomb et celles qui n'en avaient pas. Les quantifications réalisées au MEB ont montré que toutes les micro-inclusions de tellure de bismuth et plomb avec du cuivre étaient composées de 20 % Bi, 10 % Pb et 1,5 à 3 % de Cu.

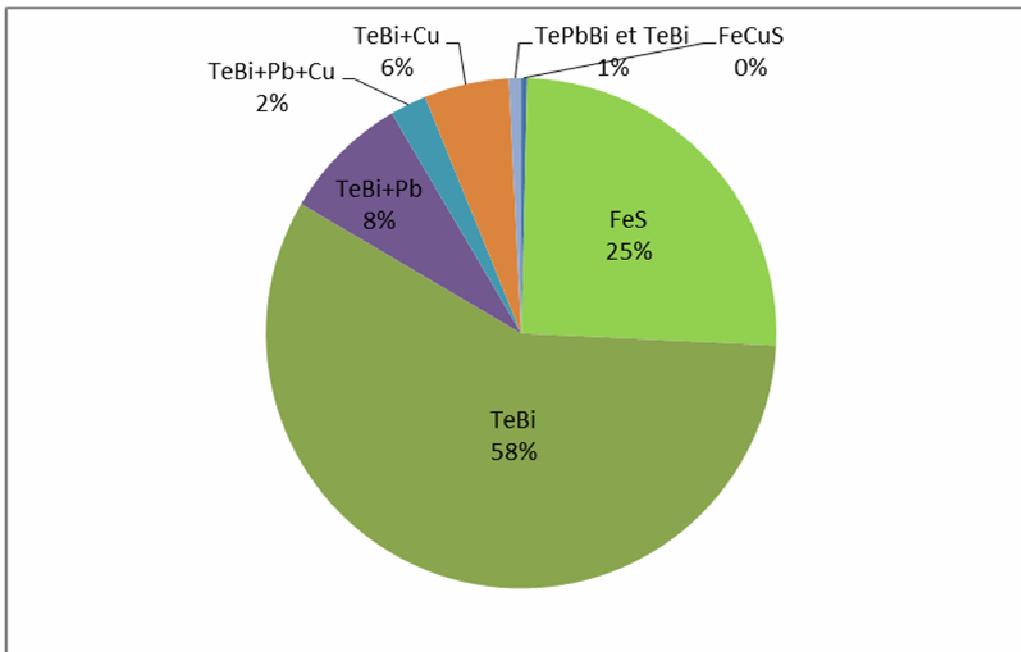


Figure 28 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans le doré A8 bis.

- **Conclusion sur la signature du doré A8b de Dieu-Merci**

Ce doré est caractérisé par une très grande abondance de micro-inclusions. Les micro-inclusions majoritaires, signature de ce doré, sont des tellures de bismuth. Ces tellures de bismuth sont associés en plus faibles proportions à des sulfures de fer.

Conclusion sur les micro-inclusions des échantillons de concentrés de Saint-Élie

Les deux échantillons d'origine primaire ont pour signature minéralogique des minéraux contenant du bismuth : l'échantillon A2 a pour signature le tellure de bismuth et l'échantillon B6 le bismuth (ou un alliage or-bismuth). Cet élément étant commun aux deux échantillons primaires il est une bonne signature pour ce district.

L'échantillon A3, d'origine éluvionnaire, également récolté sur la commune de Saint-Élie, est très pauvre en inclusions. Seulement deux micro-inclusions de tellure de bismuth ont été observées parmi les 105 grains qui le composent. À ce stade de l'étude, elles sont considérées comme suffisantes pour associer cet échantillon au(x) gisement(s) primaire(s) de Saint-Élie car le bismuth semble être un élément très caractéristique de cette localité.

Conclusion sur les micro-inclusions des échantillons de dorés de Saint-Élie

Les dorés A1 et A4 provenant de Saint-Élie sont criblés d'inclusions. Dans le doré B5, l'abondance des micro-inclusions est telle que ces dernières se regroupent pour former des veinules.

Les compositions en termes d'inclusions des dorés A1 et A4 sont assez proche l'une de l'autre. On constate qu'environ 50 % des micro-inclusions sont des tellures de plomb, 20 % sont des sulfures de fer et 20 % sont des alliages AuPb ou AuPbBi. On peut donc considérer que ces deux dorés ont la même signature à savoir des tellures de plomb accompagnés d'alliages AuPb ou AuPbBi.

Le doré B5 est caractérisé par des veinules qui contiennent du plomb métal (ou un alliage or-plomb), des tellures de plomb et en plus faible quantité, des sulfures de fer. Le plomb et les tellures de plomb étant très largement majoritaires dans ces copeaux on peut dire qu'ils sont la signature de ce doré.

Les dorés B5, A1 et A4 provenant de Saint-Élie et Saint-Élie (Saint-Auguste) et exploités par SMSE présentent des micro-inclusions semblables à savoir du Pb associé ou non à de l'or sous forme d'alliage (avec exceptionnellement du bismuth pour le doré A1), des tellures de bismuth et des sulfures de fer. Le plomb est donc très présent dans la composition des micro-inclusions contenues dans les dorés produits à Saint-Élie par la SMSE.

La signature du doré de Dieu-Merci (A8bis), également produit sur le district de Saint-Élie, est la présence de micro-inclusions de tellures de bismuth accompagnées de sulfure de fer. Cet échantillon produit par la compagnie AUPLATA ne contient pas de plomb contrairement aux dorés produits par la SMSE.

Corrélation entre les concentrés et les dorés correspondants de Saint-Élie

Tous les concentrés de Saint-Élie contiennent du bismuth soit sous forme native (ou en alliage avec l'or), soit sous forme de tellure de bismuth. Cependant seuls les dorés A1 et A8bis possèdent des micro-inclusions contenant du bismuth. Le doré A1 possède des micro-inclusions d'alliage or plomb bismuth et le doré A8bis des tellures de bismuth. Le bismuth ne se retrouve donc pas systématiquement dans les dorés.

Le plomb trouvé dans les dorés de la SMSE n'est pas présent dans les concentrés de cet exploitant. Il s'agit très probablement d'un apport en plomb lors de la fusion. Il est connu que les exploitants guyanais fondent du plomb de chasse se trouvant dans les rivières et récupéré simultanément avec l'or alluvionnaire. La quantité de plomb de chasse récupérée

avec les grains éluvionnaires doit donc être relativement importante pour former autant de micro-inclusions et des veinules de plomb dans les dorés.

4.2.4. Montagne Tortue

Le lieu d'extraction Montagne Tortue est représenté par le concentré A5 et le doré associé A6.

Le concentré A5

- **Morphologie des grains**

Les grains de ce concentré sont d'origine alluvionnaire. Ils sont massifs ou vermiformes (Figure 29 A). De rares grains ont une morphologie en chou-fleur (Figure 29 B). Presque tous les grains possèdent des bordures enrichies en or parfaitement visibles (Figure 30).

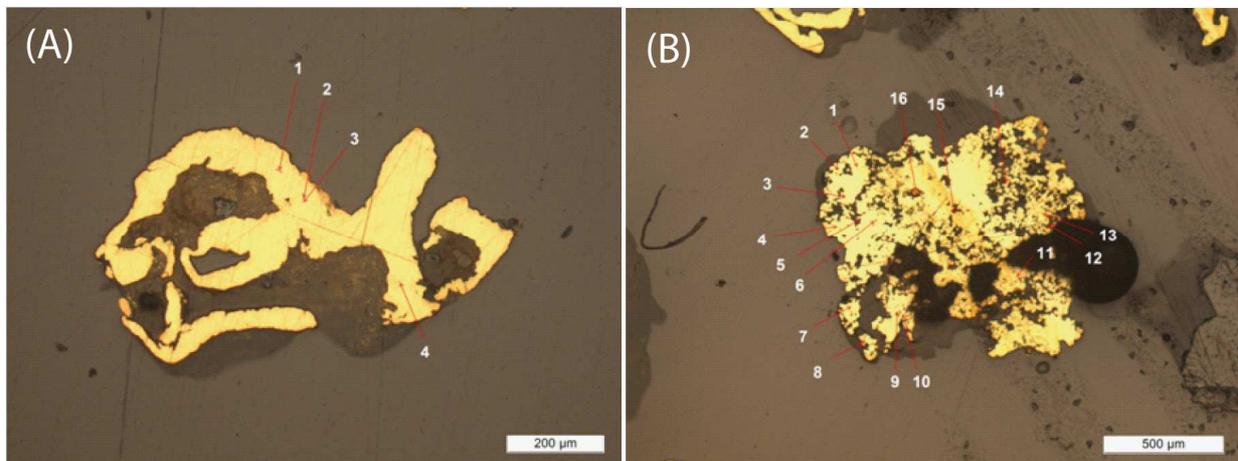


Figure 29 : (A) Photographie en lumière réfléchie du grain 70 vermiforme ;
(B) photographie du grain 75 ayant une morphologie en chou-fleur.

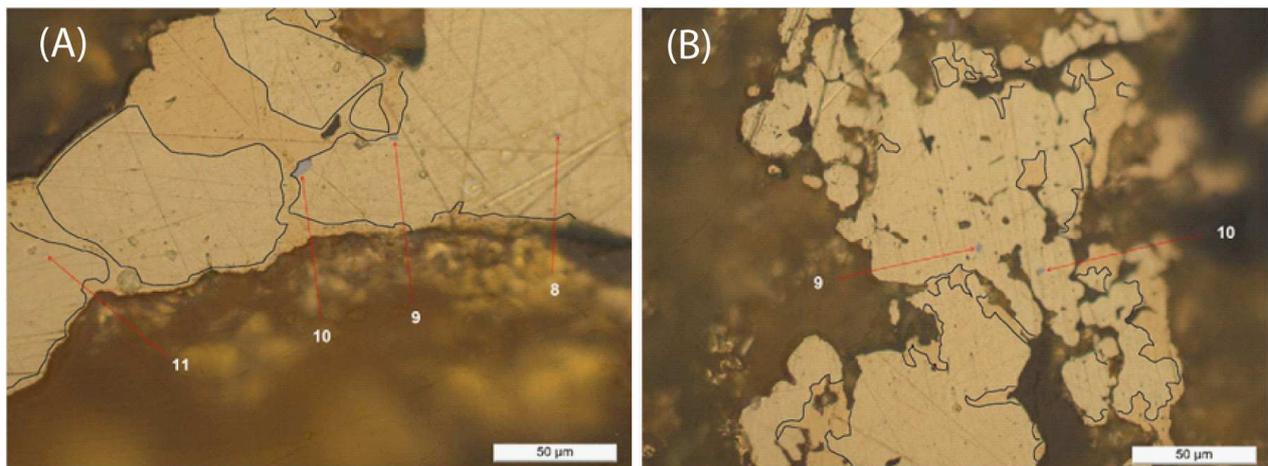


Figure 30 : Photographies en lumière réfléchie de grains dont les bordures sont localement enrichies en or, elles sont entourées en noir sur les photographies : (A) photographie d'une partie du grain 90;
(B) photographie d'une partie du grain 75.

- **Description des micro-inclusions**

Cinquante-trois inclusions ont été observées dans les 47 grains que contient l'échantillon A5. Elles sont réparties sur 13 grains. Ainsi 23,4 % des grains contiennent des inclusions et

32 % de ces inclusions sont des arsénopyrites xénomorphes à sub-automorphes, 24,5 % sont des sulfures de fer très rarement automorphes et 24,5 % sont des galènes xénomorphes à sub-automorphes. Après pondération, on obtient que 44 % de ces inclusions sont des sulfures de fer, 29 % des galènes et 19 % des arsénopyrites. D'autres types de micro-inclusions sont présents de façon anecdotique dans ces grains. La répartition de l'ensemble des micro-inclusions vues dans cet échantillon est représentée dans le graphique de la Figure 31:

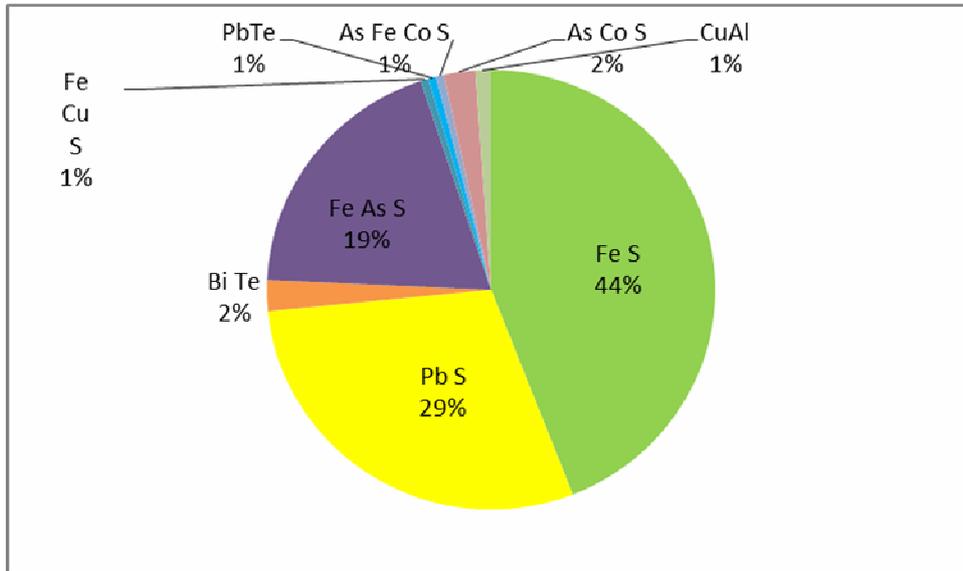


Figure 31 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans l'échantillon A5 après pondération.

Le doré A6

A6 est le doré correspondant au concentré A5.

- **Morphologie des grains**

Le doré initial massif a été découpé à l'aide d'un petit foret pour former de petits copeaux vermiculaires (Figure 32).

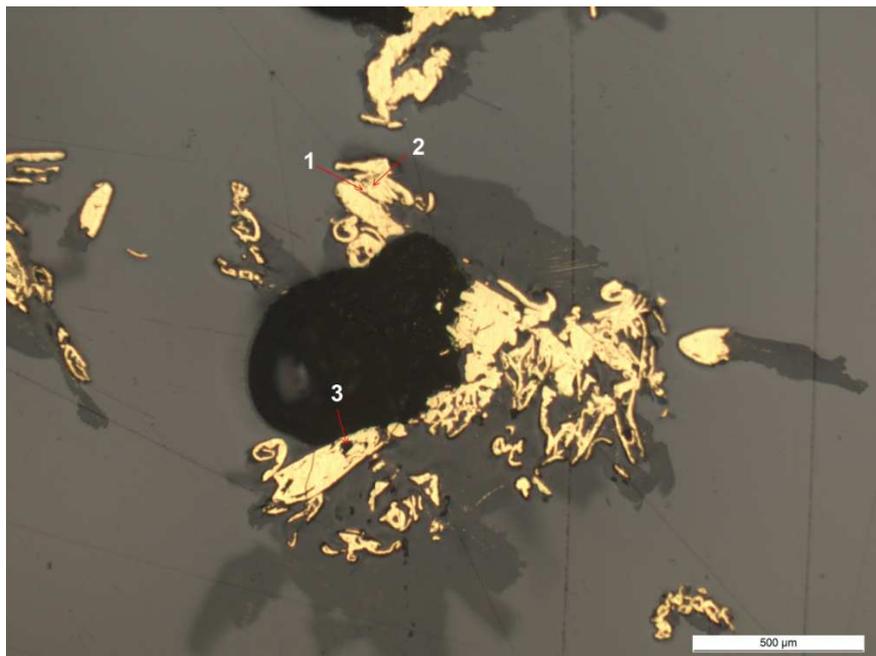


Figure 32 : Photographie du copeau 31.

- **Description des micro-inclusions**

Les copeaux de ce doré contenant peu d'inclusions contrairement à ceux étudiés précédemment, tous les grains ont été observés pour rechercher leurs micro-inclusions.

Parmi les 29 fragments contenus dans cet échantillon, 14 soit 48 % des grains contiennent des micro-inclusions (Figure 33). 60 micro-inclusions ont été trouvées parmi tous les copeaux de cet échantillon. 45 % des inclusions trouvées sont des alliages AuPb, 35 % sont des inclusions d'aluminium métal, 6 % sont composés d'iridium et d'osmium, 4 % sont composées d'iridium et de tungstène et 1 % sont du fer. Après pondération la répartition de ces micro-inclusions devient respectivement 46 %, 35 %, 10 %, 7 % et 2 % Notons que les micro-inclusions d'aluminium se situent exclusivement dans des trous ou en bordure de grain (Figure 34).

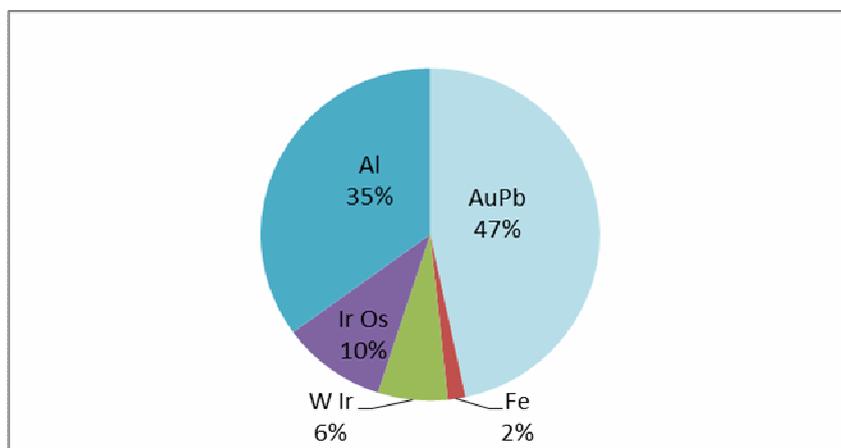


Figure 33 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans l'échantillon A6 après pondération.

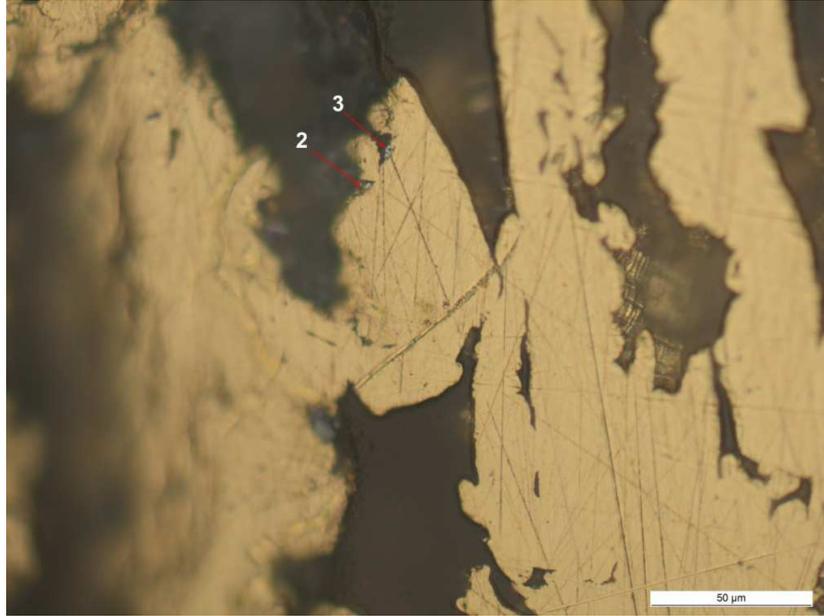


Figure 34 : Micro-inclusions d'aluminium vu dans le grain 30. Les micro-inclusions d'aluminium apparaissent blanches au microscope, on peut ainsi les différencier des oxydes d'aluminium qui sont de couleur gris foncé.

Conclusion sur les micro-inclusions contenues dans le concentré de la Montagne Tortue

L'assemblage pyrite, arsénopyrite et galène est la signature typique de cet échantillon d'origine alluvionnaire.

Conclusion sur les micro-inclusions contenues dans le doré de la Montagne Tortue

Ces copeaux de doré sont pauvres en inclusions. Les micro-inclusions trouvées sont majoritairement des alliages AuPb. La présence d'aluminium comme signature de cet échantillon est discutable car ces micro-inclusions se trouvant exclusivement en bordure de grain, il n'est pas exclu qu'elles soient des artefacts incrustés dans les grains lors du forage des échantillons ou lors de la préparation des sections polies. Cependant il semble peu probable que l'or connaissant sa très faible dureté soit capable d'arracher des particules du foret. La présence d'alliages IrOs est très étonnante dans ce contexte. Cet alliage est connu à l'état naturel dans des contextes géologiques très différents, et n'a jamais été décrit en Guyane. Quant au composé IrW, il ne s'agit pas d'une composition naturelle. On sera donc très prudent quant à la signification de ces compositions qui contiennent des éléments du groupe du platine.

4.2.5. Crique Marc

Deux concentrés proviennent de la Crique Marc A7 et B2 avec leur doré respectif A8 et B1.

Le concentré A7

- *Description morphologique des grains*

Les grains de ce concentré d'origine alluvionnaire sont massifs, arrondis et la bordure de la plupart des grains sont nettement enrichis en or (Figure 35).

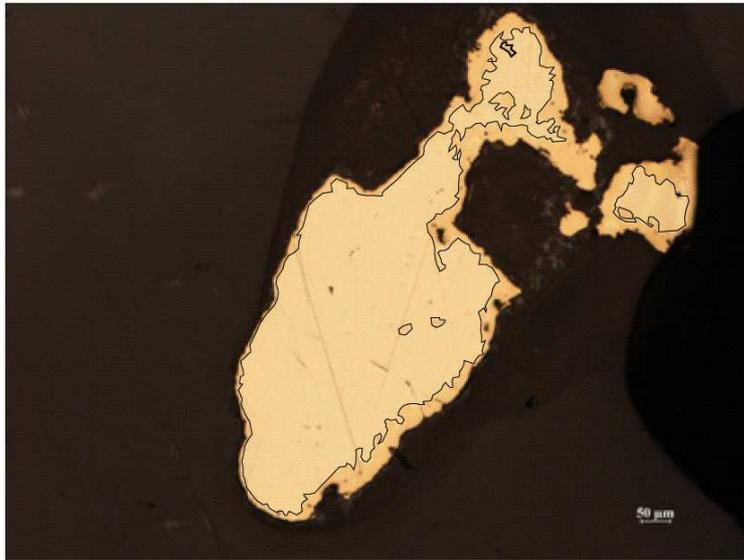


Figure 35 : Photographie en lumière réfléchie du grain 33 de l'échantillon A7 montrant des bordures enrichies en Au.

- **Description des micro-inclusions**

Dans l'échantillon A7, 14 inclusions ont été trouvées dans 6 grains parmi les 42 grains montés en section polie. Ainsi, 14 % des grains contiennent des inclusions. La galène représente 43 % des inclusions et ces 6 inclusions de galène sont présentes dans un unique grain. Les 8 autres inclusions dans les grains de l'échantillon A7 sont des ilménites, une ilménite contenant du manganèse, un tellurure de plomb, un tellurure de bismuth et une micro-inclusion à PCaCeO.

Les grains contenant des inclusions ne sont pas représentatifs de cet échantillon. On peut donc en conclure que l'échantillon A7 est très pauvre en inclusion. Même si la galène représente 43 % des inclusions (Figure 36), elle ne peut être le minéral signature de cet échantillon car elle n'est présente que dans un seul grain et en faible quantité. La quasi-absence d'inclusions peut cependant être une caractéristique de cet échantillon.

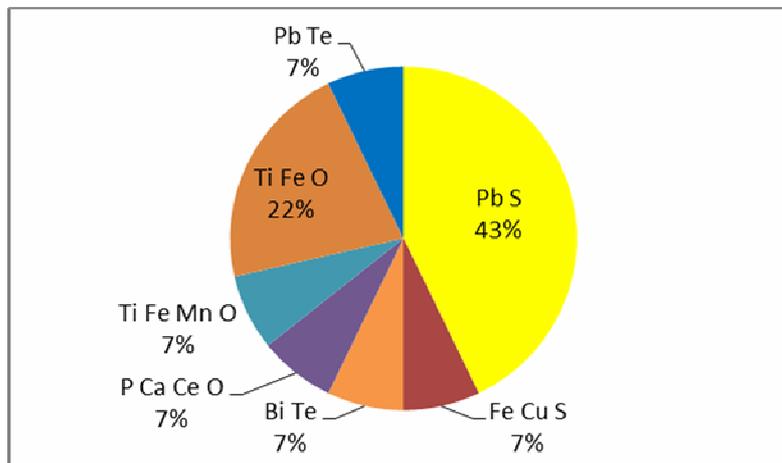


Figure 36 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains de l'échantillon A7.

Le doré A8

- **Description de la morphologie des grains**

Les particules de ce doré se présentent sous la forme de fins copeaux (Figure 37).



Figure 37 : Photographie (en lumière réfléchie) du grain 2 de l'échantillon A8.

- **Description des micro-inclusions**

Les copeaux de cet échantillon de doré ne sont pas criblés d'inclusions, ainsi tous les copeaux ont été étudiés.

Cinquante et une micro-inclusions ont été trouvées dans les 28 fragments de ce doré. Elles sont réparties dans 13 d'entre eux. Ainsi 46,43 % des fragments contiennent des inclusions. 96,08 % de ces inclusions sont de l'aluminium et 3,92 % sont des oxydes de fer ; après pondération ces valeurs s'élèvent respectivement à 99 % et 1 % (Figure 38).

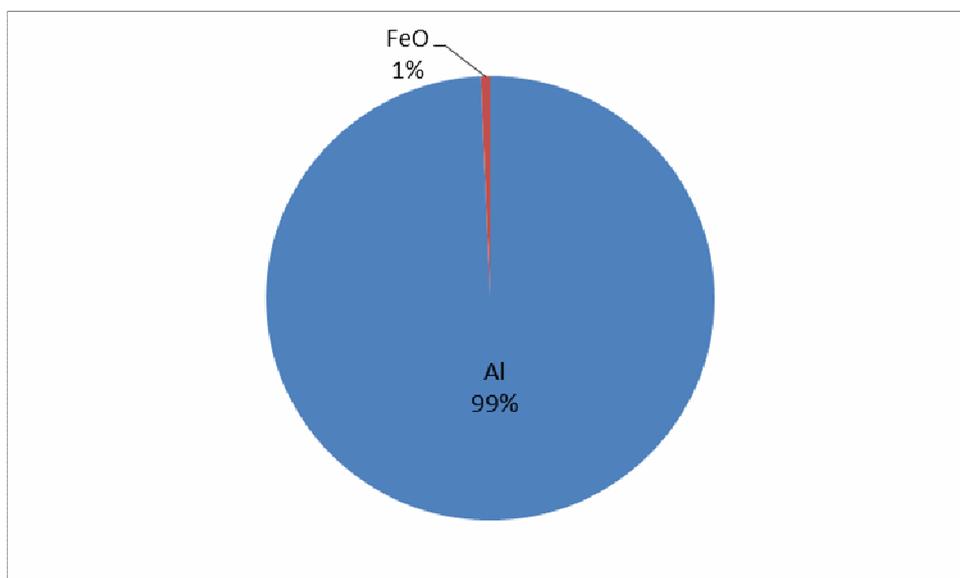


Figure 38 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans le doré A8 après pondération.

Les micro-inclusions d'aluminium se trouvent à la fois en périphérie du grain ou dans des trous mais également en inclusion dans le grain (Figure 39).

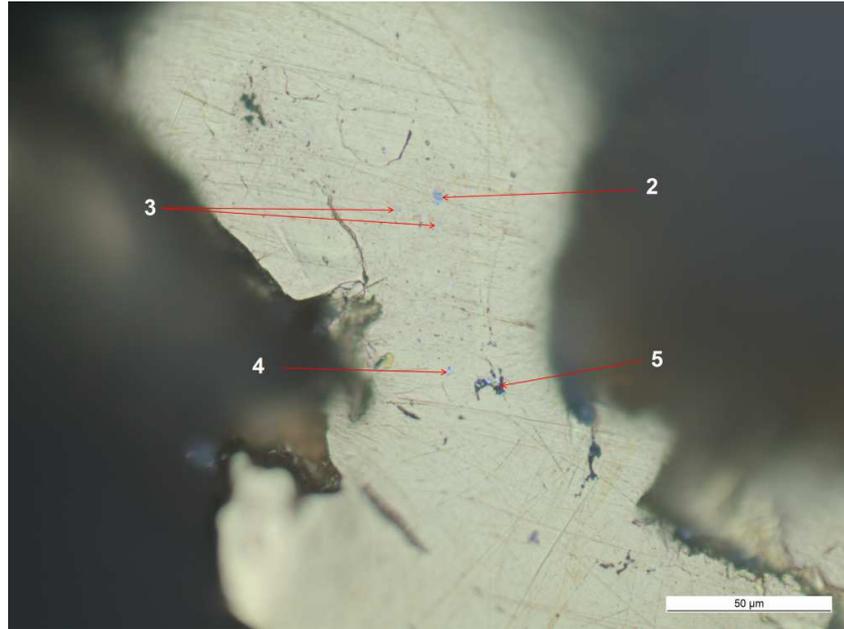


Figure 39 : Grain 21 avec des inclusions d'aluminium au cœur du grain et dans des trous.

Le concentré B2

- **Morphologie des grains**

Les grains de ce concentré sont d'origine alluvionnaire. Ces grains sont tous de très grandes tailles (2mm) et deux fois plus gros que tous les autres grains d'or fournis (Figure 40). Ils sont massifs. La moitié des grains montre des bordures enrichies en or (Figure 41).

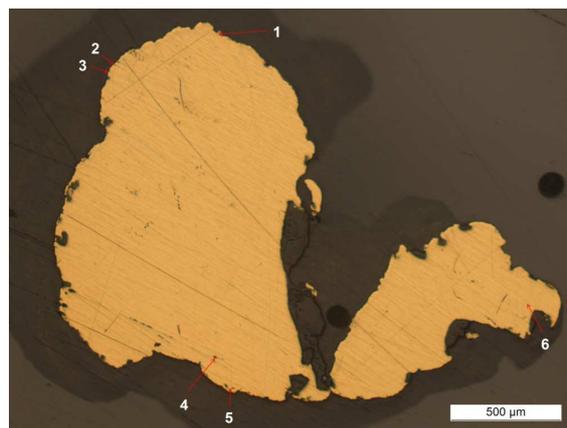


Figure 40 : Photographie (lumière réfléchie) du grain 15.

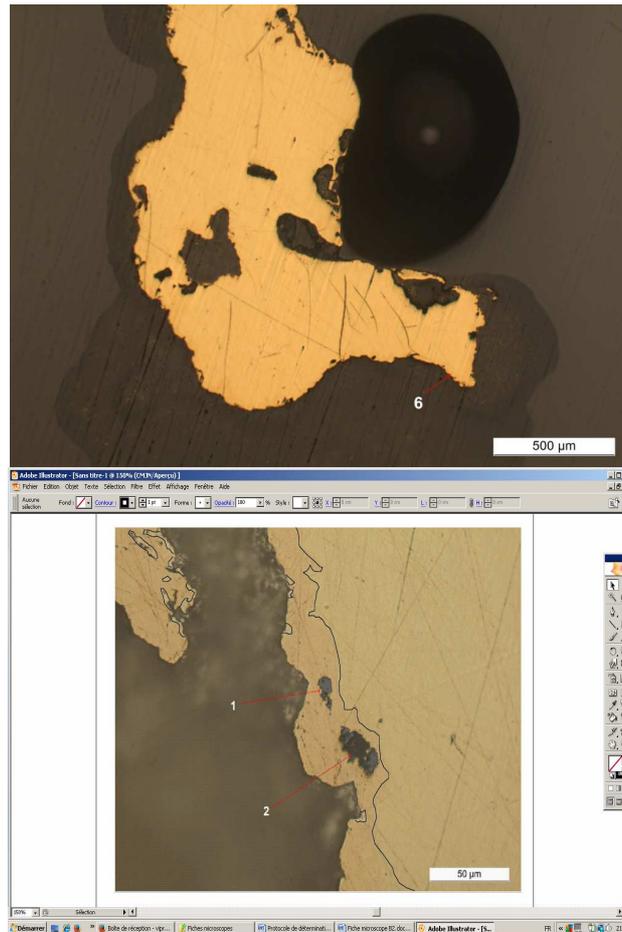


Figure 41 : (A) photographie du grain 18 ; (B) photographie de la bordure enrichie en or du grain 18.

- **Description des micro-inclusions**

Dans l'échantillon B2, 65 inclusions ont été observées dans les 16 grains. 13 grains possèdent des micro-inclusions ainsi 81,25 % des grains contiennent des inclusions : 39 % de ces inclusions sont des oxydes de fer, 12 % sont des ilménites contenant du Mn et 10 % sont des ilménites. Après pondération ces valeurs s'élèvent respectivement à 61 %, 22 % et 16 %. On peut également calculer que 37 % des grains contiennent des inclusions d'ilménites, 43,75 % des d'ilménites contenant du Mn et 37 % des grains contiennent des inclusions d'oxyde de fer (Figure 42). D'autres types de micro-inclusions ont été observés.

L'association oxyde de fer, ilménite et ilménite avec Mn est la signature de cet échantillon.

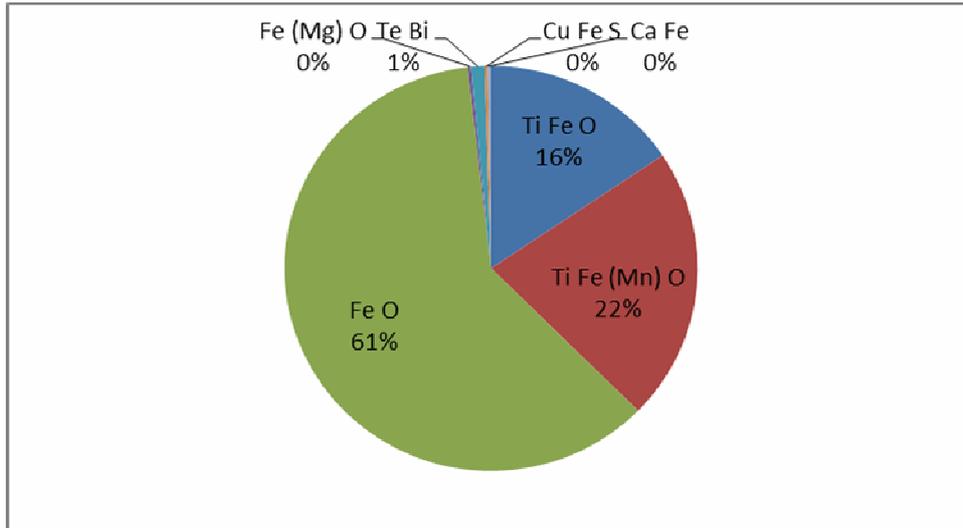


Figure 42 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans l'échantillon B2.

Le doré B1

- **Morphologie des grains**

Ce sont des sphères dont le diamètre est compris entre 1 à 4 mm.

- **Description des micro-inclusions**

Les particules de l'échantillon B1 apparaissent très pauvres en micro-inclusion. Deux ont été finement observés pour rechercher et identifier les micro-inclusions caractéristiques de cet échantillon. Six micro-cavités contenant des oxydes d'aluminium ont été observées dans le premier grain (grain 2). Le deuxième grain (grain 4) ne contenait aucune micro-inclusion. Ces deux particules contenaient néanmoins une importante quantité de micro-inclusions de quartz résiduel xénomorphes à sub-automorphes.

Conclusion sur les micro-inclusions dans les concentrés de la crique Marc

L'échantillon A7 est très pauvre en inclusions ; l'échantillon B2 a pour signature minéralogique une association d'oxyde de fer, d'ilménite et d'ilménite contenant du Mn.

Ces deux échantillons étant d'origine alluvionnaire, ils peuvent ne pas provenir du même gisement primaire. Ce qui expliquerait la nature différente de leurs inclusions. Pour appuyer cette hypothèse, on peut préciser que les grains de l'échantillon B2 sont 2 à 3 fois plus gros que ceux de l'échantillon A7.

Conclusion sur les micro-inclusions dans les dorés de la Crique Marc

L'échantillon A8 a pour signature la présence de micro-inclusions d'aluminium métal et B1 des micro-inclusions d'oxyde d'aluminium. La présence d'aluminium est le premier point commun des dorés de Crique Marc. Le second point commun entre ces dorés est la rareté de ces micro-inclusions.

4.2.6. Dagobert

Ce lieu d'extraction est représenté par les concentrés primaires A9 et B4 et par leurs dorés correspondant, respectivement A10 et B3.

Le concentré A9

- **Morphologie des grains**

Les grains du concentré A9 présentent des bordures rectilignes non enrichies en or. Ces observations confirment l'origine primaire de ces grains. Des fragments de la gangue de quartz sont encore visibles sur quelques grains.

- **Description des micro-inclusions**

Soixante inclusions ont été observées dans 13 grains parmi les 52 grains que compte cet échantillon. Ainsi 25% des grains contiennent des inclusions. On constate que 37% de ces inclusions sont des sulfures de fer et 8% de l'ilménite ; après pondération ces valeurs s'élèvent respectivement à 82% et 12%. D'autres micro-inclusions ont été observées dans ces grains de façon ponctuelle. L'ensemble des micro-inclusions identifiées est représenté dans le graphique Figure 43.

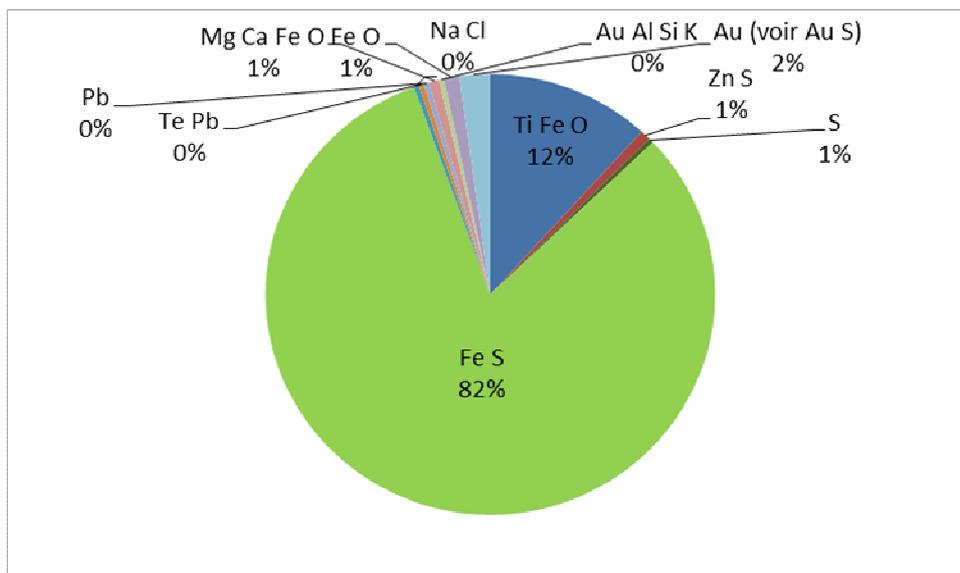


Figure 43 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains du concentré A9.

La répartition des micro-inclusions de sulfure de fer est homogène dans les grains de cet échantillon : ces micro-inclusions sont réparties dans 6 grains. Cependant, le grain 48 est très particulier car il contient 23 de ces inclusions de sulfure de fer et quelques-unes sont de très grande taille (Figure 44). Ces observations sont en accord avec le caractère primaire du concentré. Les grains d'or sont encore associés à leurs minéraux de gangue comme la pyrite non oxydée et du quartz.

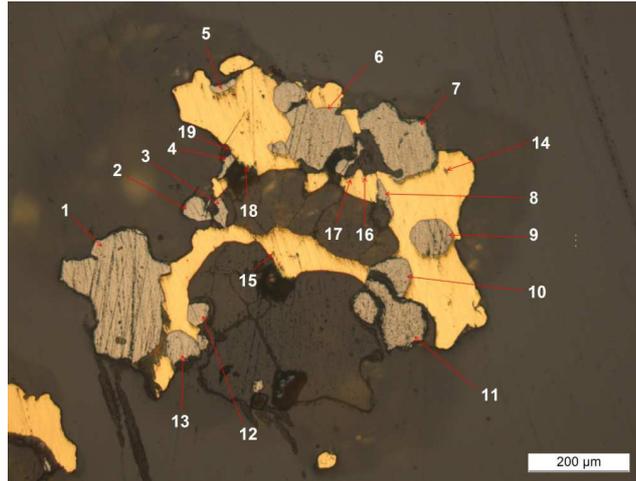


Figure 44 : Photographie du grain 48 de l'échantillon A9.

Les micro-inclusions de sulfure de fer associées à une proportion plus faible ilménite peuvent donc être la signature minéralogique de l'échantillon A9.

Le doré A10

- **Morphologie des grains**

L'aspect des copeaux est illustré sur la Figure 45 ci-dessous.

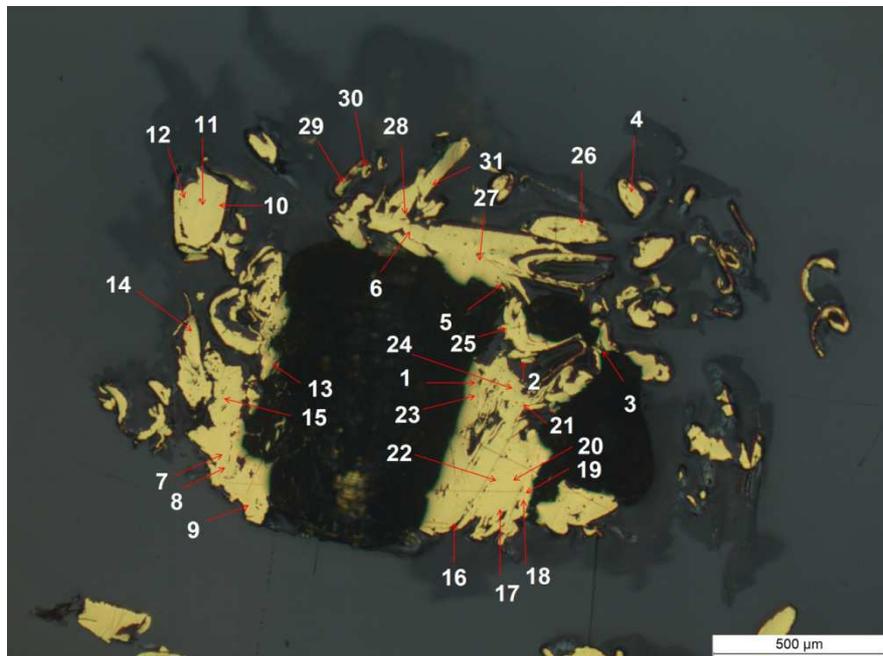


Figure 45 : Photographie de la particule 8.

- **Description des micro-inclusions**

Les copeaux de ce doré sont relativement riches en micro-inclusions.

Sur les 29 copeaux montés en section, 10 ont été observés en détail. Parmi ces 10 copeaux, 263 inclusions ont été trouvées. 68,44 % de ces inclusions sont des sulfures de fer, 22,05 %

sont de l'aluminium, 9,13 % sont des tellures de plomb et 0,38 % sont du fer. Après pondération ces valeurs s'élèvent respectivement à 80 %, 14 %, 6 % et 0,1 % (Figure 46).

On peut considérer que la signature du doré A10 de Dagobert est de contenir une majorité de micro-inclusions de sulfure de fer accompagné d'aluminium dans une plus faible proportion. Ces copeaux contiennent beaucoup de micro-inclusions sans pour autant en être criblés comme ceux de l'échantillon B5.

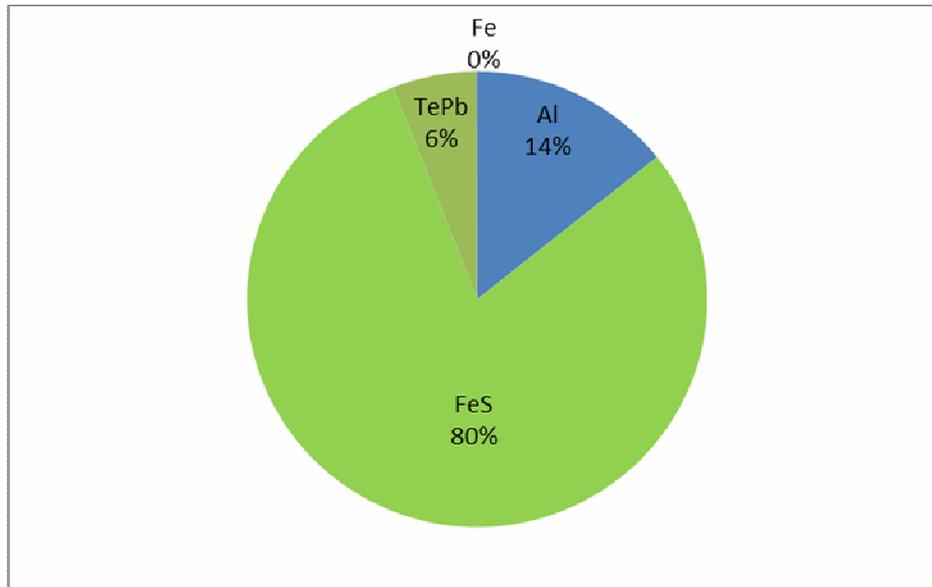


Figure 46 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans le doré A10 après pondération.

Le concentré B4

- **Morphologie des grains**

Les grains de ce concentré ne possèdent pas de bordure enrichie en or exception faite d'un grain. De nombreux grains possèdent des faces plates (Figure 47).

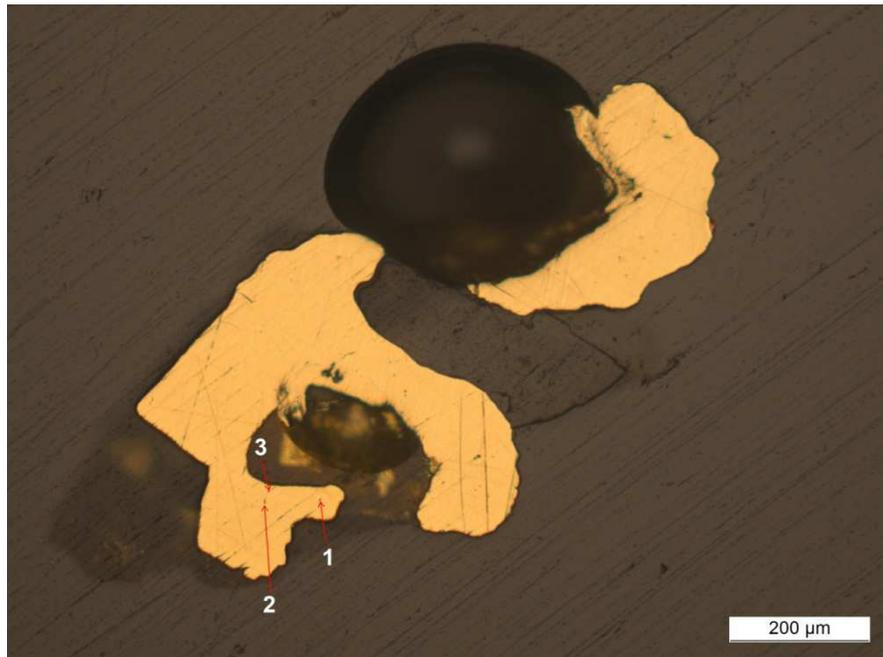


Figure 47 : Photographie du grain 11 de l'échantillon B4.

Certains grains sont encore associés, en bordure, avec des grains de quartz ou d'oxydes (oxydes de fer ou ilménite) contenant parfois des tellurures de bismuth (Figure 48, Figure 49). Les oxydes de fer sont probablement des pseudomorphoses de cristaux de pyrite.

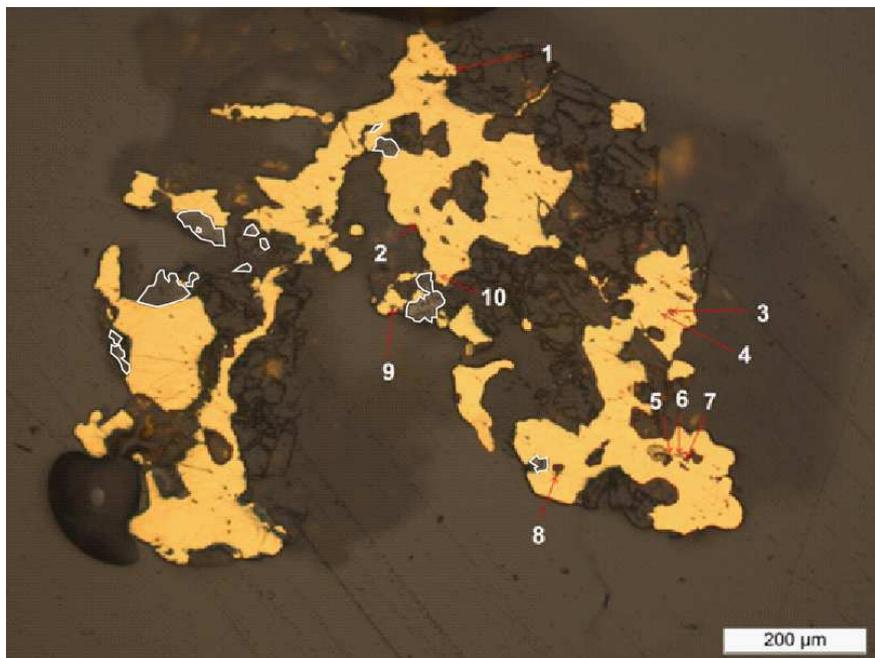


Figure 48 : Photographie du grain 58 de l'échantillon B4: Les minéraux cerclés en blancs sont des oxydes de fer et des ilménites, les autres des cristaux de quartz.

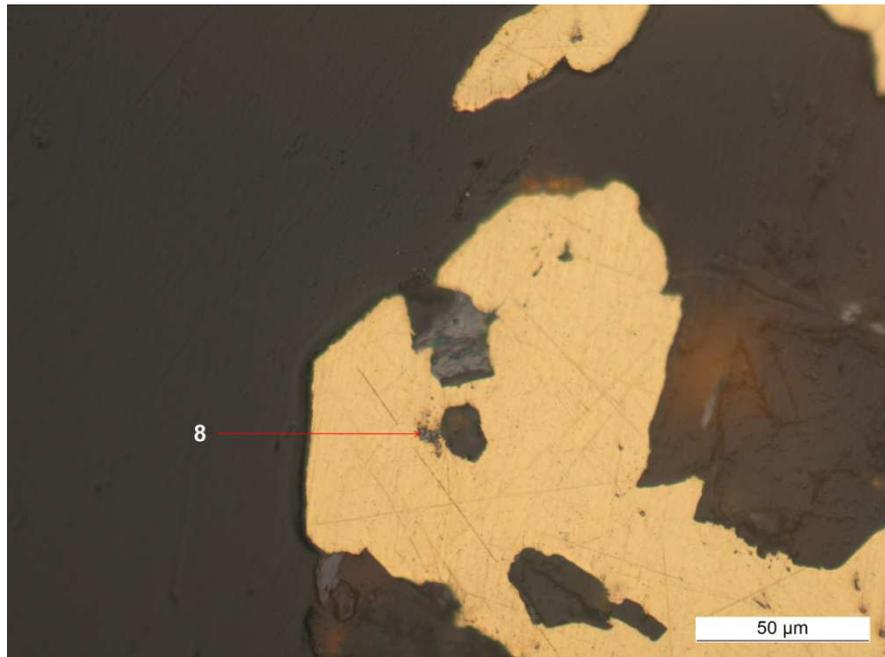


Figure 49 : Inclusions d'oxyde de fer avec des phases plus claires contenant des tellurures de bismuth. Les BiTe ne sont pas visibles sur cette photographie.

- **Description des micro-inclusions**

Trente-huit inclusions ont été observées dans 11 grains parmi les 62 grains que compte cet échantillon. Ainsi 17,7 % des grains contiennent des inclusions. On constate que 39,5 % de ces inclusions sont des sulfures de fer, 18,4 % des oxydes de fer et 15,8 % des oxydes de fer contenant des tellurures de bismuth. Après pondération ces valeurs s'élèvent respectivement à 34 %, 16 % et 13 %.

On peut donc considérer que les micro-inclusions de sulfure de fer accompagnées d'oxydes de fer avec et sans tellure de bismuth sont caractéristiques de l'échantillon B4 (Figure 50).

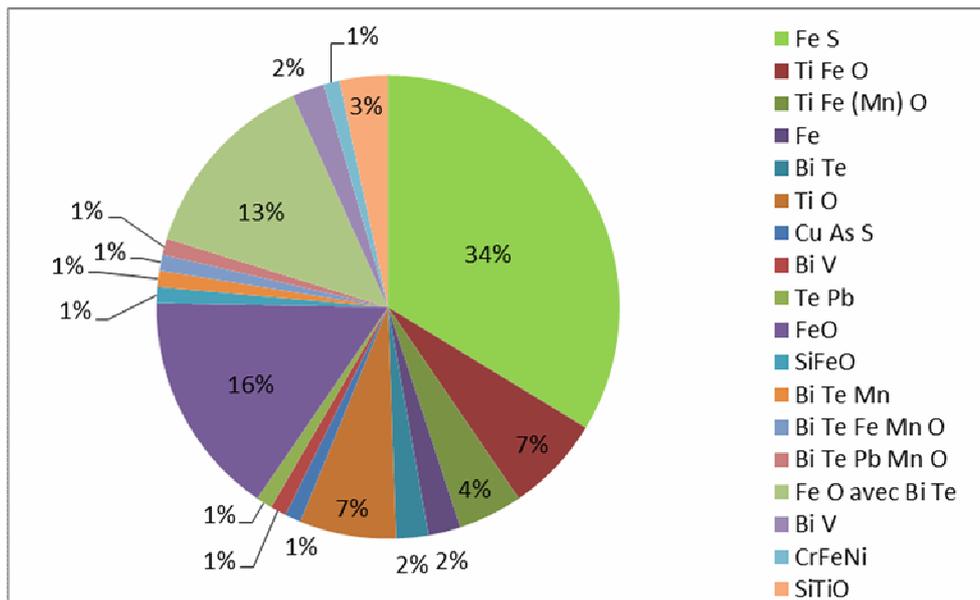


Figure 50 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans les grains de l'échantillon B4 après la pondération des données.

Le doré B3

- **Morphologie des grains**

Ce doré est constitué de particules de grande taille (1 à 4 mm) et de forme sphérique ou irrégulière.

- **Description des micro-inclusions**

Les fragments du doré B3 contiennent d'abondantes micro-inclusions (Figure 51). Seul un tiers du grain 2 a été observé et 138 micro-inclusions ont été dénombrées. 67 % de ces micro-inclusions sont des sulfures de fer, 15 % sont des tellurures de bismuth et 13 % sont des tellurures de plomb. Exceptionnellement des micro-inclusions d'arsenopyrite, de tellurures de plomb et bismuth et un oxyde d'aluminium ont été observées. Quelques quartz xénomorphes ont également été observés.

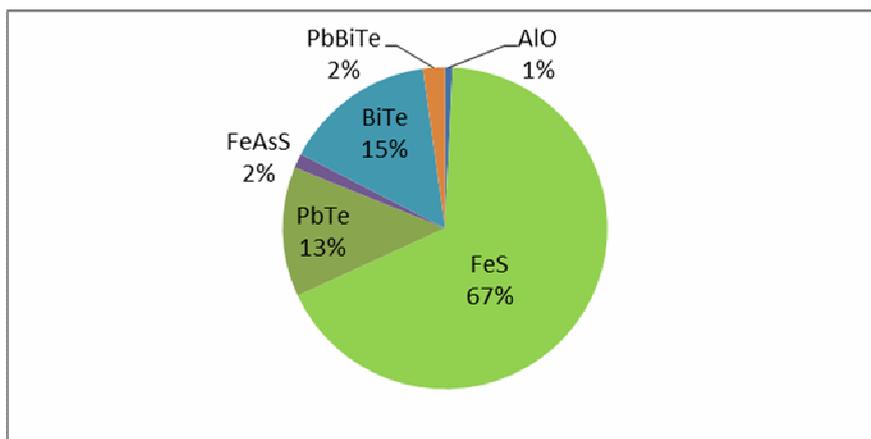


Figure 51 : Diagramme de distribution des micro-inclusions dans la partie du grain B3 étudiée.

Conclusion sur la signature des concentrés de Dagobert

Les concentrés de Dagobert contiennent tous les deux une majorité de micro-inclusion de sulfure de fer. Une distinction peut être faite entre ces deux échantillons sur la base des autres micro-inclusions qui accompagnent ces sulfures de fer. L'échantillon A9 contient des micro-inclusions d'ilménite, et l'échantillon B4, des micro-inclusions d'oxyde de fer et d'oxyde de fer avec des tellurures de bismuth.

Conclusion sur la signature des dorés de Dagobert

Le doré A10 contient des micro-inclusions de sulfure de fer, d'alliages plomb-fer et d'aluminium. Le doré B3 contient des micro-inclusions de sulfure de fer, de tellurures de bismuth et de tellurures de plomb. Le seul point commun entre ces deux échantillons est la présence de micro-inclusions de sulfure de fer, commun à la plupart des échantillons de doré. Les dorés A10 et B3 sont respectivement produits par les sociétés Ermina et UMS. Ces deux échantillons possèdent des micro-inclusions différentes probablement parce qu'ils ont été produits par deux sociétés différentes.

4.2.7. Élysée (Paul-Isnard)

L'échantillon A7bis est le seul représentant du lieu d'extraction Élysée près de Paul-Isnard. Nous n'avons pas le concentré correspondant à ce doré mais nous savons que ce doré est obtenu à partir de grains primaires.

Le doré A7bis

- **Morphologie des grains**

Ces grains sont des copeaux. Ils ont la particularité d'avoir une couleur plus grise que les autres échantillons (Figure 52).



Figure 52 : Photographie de la section polie contenant l'échantillon A7bis à gauche et X4 à droite; cette photo montre bien la différence de couleur entre l'échantillon A7bis et un autre échantillon.

Ces copeaux sont criblés d'inclusions (Figure 53).

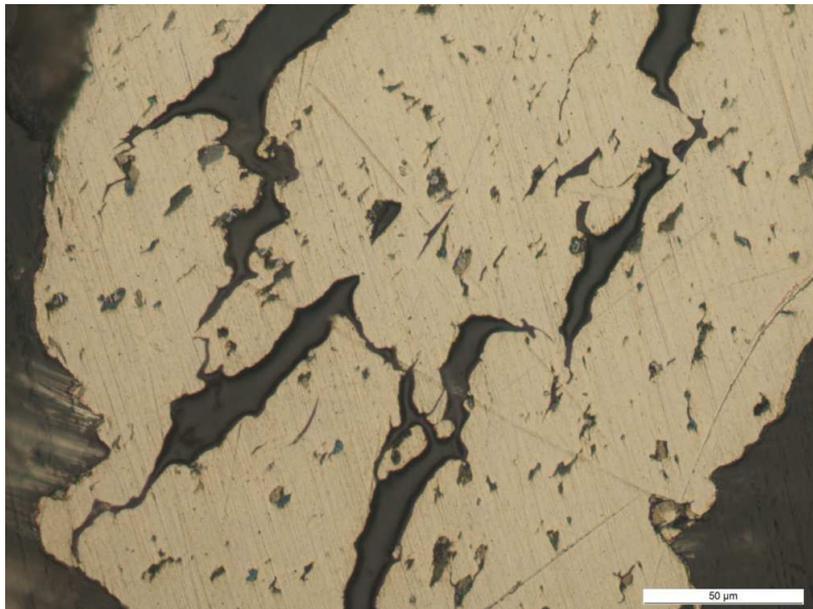


Figure 53 : Photographie du grain 2 de l'échantillon A7bis montrant l'abondance de micro-inclusions.

- **Description des micro-inclusions**

Étant donné que tous les copeaux sont criblés d'inclusions, seulement deux copeaux ont été choisis comme étant représentatifs de l'échantillon et étudiés.

Deux-cent-vingt-sept inclusions ont été dénombrées dans ces deux copeaux. 76,65 % de ces inclusions sont des alliages AuPb, 17,62 % sont des sulfures de fer et 4 % sont des alliages PbFe. La pondération ne modifie pas ces valeurs car les deux grains étudiés contiennent ces trois types d'inclusions (Figure 54).

Le premier grain étudié contient également deux inclusions de tellure de plomb avec du fer et deux inclusions de tungstène (pollution probable).

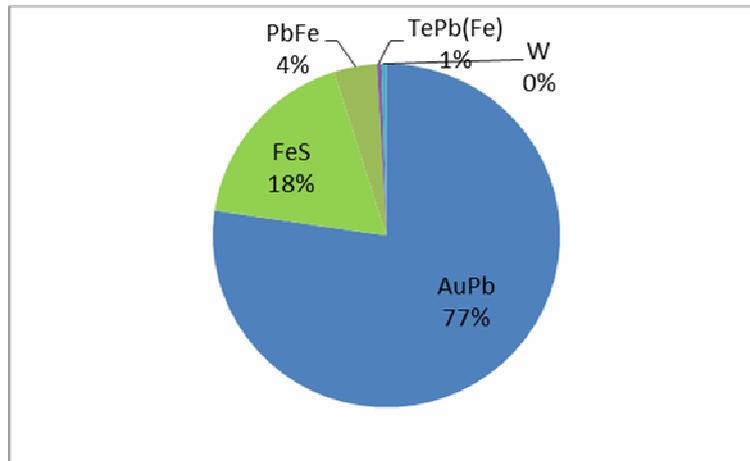


Figure 54 : Diagramme de distribution des micro-inclusions de 2 grains représentatifs de l'échantillon A7b.

Conclusion sur la signature du doré A7b

La signature de ce doré est donc la présence majoritaire de micro-inclusions de AuPb accompagnées de sulfure de fer en plus faible proportion.

4.2.8. Les échantillons du Surinam

Ces échantillons ayant subi une amalgamation (partielle ?), leur contenu en inclusions n'est plus représentatif des grains d'or d'origine. Ils contiennent très peu d'inclusions. La caractérisation des inclusions à des fins de traçabilité n'aurait donc eu aucun sens.

4.3. Conclusion sur la méthode d'observation microscopique des micro-inclusions

Cette méthode, basée exclusivement sur l'observation et l'identification des micro-inclusions contenues dans les grains d'or, bien que chronophage, donne de bons résultats. Il est en effet possible de voir que chaque lieu d'extraction peut être caractérisé par les micro-inclusions contenues dans les grains d'or d'un concentré. Cependant après fusion pour produire des dorés, ces signatures minéralogiques disparaissent et les dorés contiennent pour la plupart des alliages or-plomb associés à des sulfures de fer. Une synthèse de ces observations est proposée sur la Figure 56 où seules les espèces minérales dominantes ont été retenues comme signature.

Les échantillons de concentrés primaires et éluvionnaire provenant de Saint-Élie sont caractérisés de fréquentes micro-inclusions de bismuth sous forme native (ou en alliage avec l'or) ou de tellure de bismuth. Les grains du concentré éluvionnaire A3 contiennent relativement peu de micro-inclusions mais ces dernières sont représentées par des tellures de bismuth. Deux compagnies produisent des dorés à partir de ces grains : SMSE et AuPlata. Les dorés produits par SMSE sont caractérisés par une importante proportion de micro-inclusions voire de veinules composées de plomb. Ce plomb est soit sous forme native, soit en alliage avec l'or ou sous forme de tellures. Le doré produit par AuPlata à partir de grains primaires ne contient pas d'inclusions de Pb mais des inclusions de tellures de bismuth et des sulfures de fer. Le concentré primaire correspondant à ce doré n'a pas été

échantillonné. Il est cependant intéressant de constater que ce doré présente une signature à minéraux de bismuth caractéristique des gîtes de Saint-Élie. Le plomb présent dans les dorés de SMSE est vraisemblablement lié à une contamination du concentré aurifère lors de la fusion. En effet, nous n'avons pas observé dans les concentrés des minéraux de plomb qui puissent justifier leur présence dans les dorés. Le plomb pourrait provenir de plombs de chasse que l'on retrouve en grande quantité sur la plupart des sites d'extraction (J.F. Thomassin, communication personnelle). Le doré de la compagnie Auplata est produit uniquement à partir de grains d'origine primaire. Il ne peut donc pas être contaminé par les plombs de chasse, et ainsi contenir des micro-inclusions de plomb. On peut donc s'interroger sur l'origine du concentré ayant servi à produire les dorés A1 et B5 pourtant décrits comme primaire. Une hypothèse proposée est que le doré provienne d'un mélange de concentrés d'origine primaires et alluvionnaires.

On constate que lorsque du plomb est ajouté dans le système (sous forme de plombs de chasse) on ne retrouve pas les tellures de bismuth mais des tellures de plomb. L'hypothèse proposée est que lors de la fusion, le bismuth s'associe au plomb pour former des alliages or-plomb-bismuth (Figure 55). On notera cependant que des tellures de plomb se trouvent dans les grains d'or de concentrés.

Les micro-inclusions de sulfure de fer trouvées dans les dorés pourraient être résiduelles et provenir de pyrites du gisement primaire. Ces sulfures sont probablement des pyrrhotites (FeS) car les dorés sont fondus à des températures supérieures à $1\ 200^\circ\text{C}$ et à partir de 740°C se produit la réaction de décomposition de la pyrite (FeS_2) en pyrrhotite (Fe_{1-x}S) (Gruget, 1979).

Le concentré provenant de la Montagne Tortue (A5) contient majoritairement des micro-inclusions de sulfures de fer, de galène (PbS) et d'arsénopyrite (FeAsS). Une signature Pb-Fe-As peut donc être attribuée aux grains de ce district. Le doré correspondant (A6) contient des micro-inclusions d'alliage or-plomb, d'aluminium et quelques micro-inclusions à iridium-osmium et iridium-tungstène. Les sulfures caractéristiques du concentré n'ont pas été retrouvés dans les copeaux de doré, ce qui interpelle d'autant plus quant à la présence de sulfures de Fe dans les dorées de Saint-Élie. Les alliages or-plomb sont beaucoup moins nombreux que dans les dorés de Saint-Élie. Il est donc possible que le peu de plomb trouvé dans ce doré soit hérité des galènes du gisement primaire ou que la pollution par un apport de plomb de chasse lors de la fusion soit minimale. La présence de micro-inclusion d'Ir-Os est très étonnante. Ces alliages existent à l'état naturel, ce qui n'est pas le cas de l'alliage Ir-W.

Deux localités ont été étudiées sur le district de Saül : Dagobert et Crique Marc. Les échantillons provenant de Dagobert sont d'origine primaire et ceux de Crique Marc sont d'origine alluvionnaire. Les grains de concentré de Dagobert contiennent des micro-inclusions de sulfure de fer accompagnés d'ilménite (FeTiO_3), d'oxydes de fer contenant localement des tellures de plomb. Les grains des concentrés alluvionnaires de la Crique Marc ne contiennent pas de sulfures excepté un grain qui contient des micro-inclusions de galène mais ils sont riches en oxyde de fer et en ilménites contenant ou non du manganèse. Ces grains sont donc caractérisés par des micro-inclusions contenant plomb, fer et titane. Les dorés produits à Crique Marc sont tous les deux produits par la société Ermina et possèdent des caractéristiques communes : ils ne contiennent quasiment pas de micro-inclusions et les quelques micro-inclusions trouvées sont composées d'aluminium. Cette quasi absence de micro-inclusions est un bon critère pour reconnaître les dorés produits à Crique Marc. Les dorés A10 et B3 provenant de Dagobert sont respectivement produits par les sociétés Ermina et UMS. Ils contiennent tous les deux un grand nombre de micro-inclusions mais de natures différentes. Le doré A10 est caractérisé par des micro-inclusions de sulfures de fer, d'alliages plomb-fer et d'aluminium tandis que le doré B3 est caractérisé par des micro-inclusions de sulfures de fer, de tellures de bismuth et de tellures de plomb.

Les copeaux de doré provenant d'Élysée (Paul-Isnard, Saint-Laurent-du-Maroni) contiennent des micro-inclusions d'alliage or-plomb et de sulfure de fer. Cet assemblage est commun à la plupart des dorés et n'est donc pas une signature d'un lieu de production particulier. Nous n'avons pas à notre disposition le concentré d'Élysée (Paul-Isnard) qui nous permettrait de définir la signature de cette localité.

Sur la base de la caractérisation des inclusions minérales dans les grains d'or provenant de concentré, il semble possible de distinguer une signature propre aux sites de chaque district :

- Bi pour Saint-Élie ;
- Pb, Fe, (As) pour Régina ;
- Pb, Fe, Ti, (Bi) pour Saül.

Pour certains districts, comme Saint-Élie, il est même possible de distinguer les sites d'extraction les uns des autres sur la base des phases rencontrées, dominantes et accessoires.

Il n'est pratiquement jamais possible de faire un lien entre un concentré et le doré qui en dérive suite à une disparition de l'essentiel des micro-inclusions et à des pollutions probables en particulier par du plomb provenant vraisemblablement de plomb de chasse.

Il est difficile de définir une signature caractéristique pour chacun des sites étudiés à partir de l'observation des dorés comme nous avons réussi à le faire avec les concentrés. Les micro-inclusions définissant les dorés ont en effet des compositions communes à la plupart des sites de production : nous observons régulièrement des micro-inclusions de sulfure de fer, de plomb, de tellure de plomb ou de bismuth ou de l'aluminium dans ces dorés.

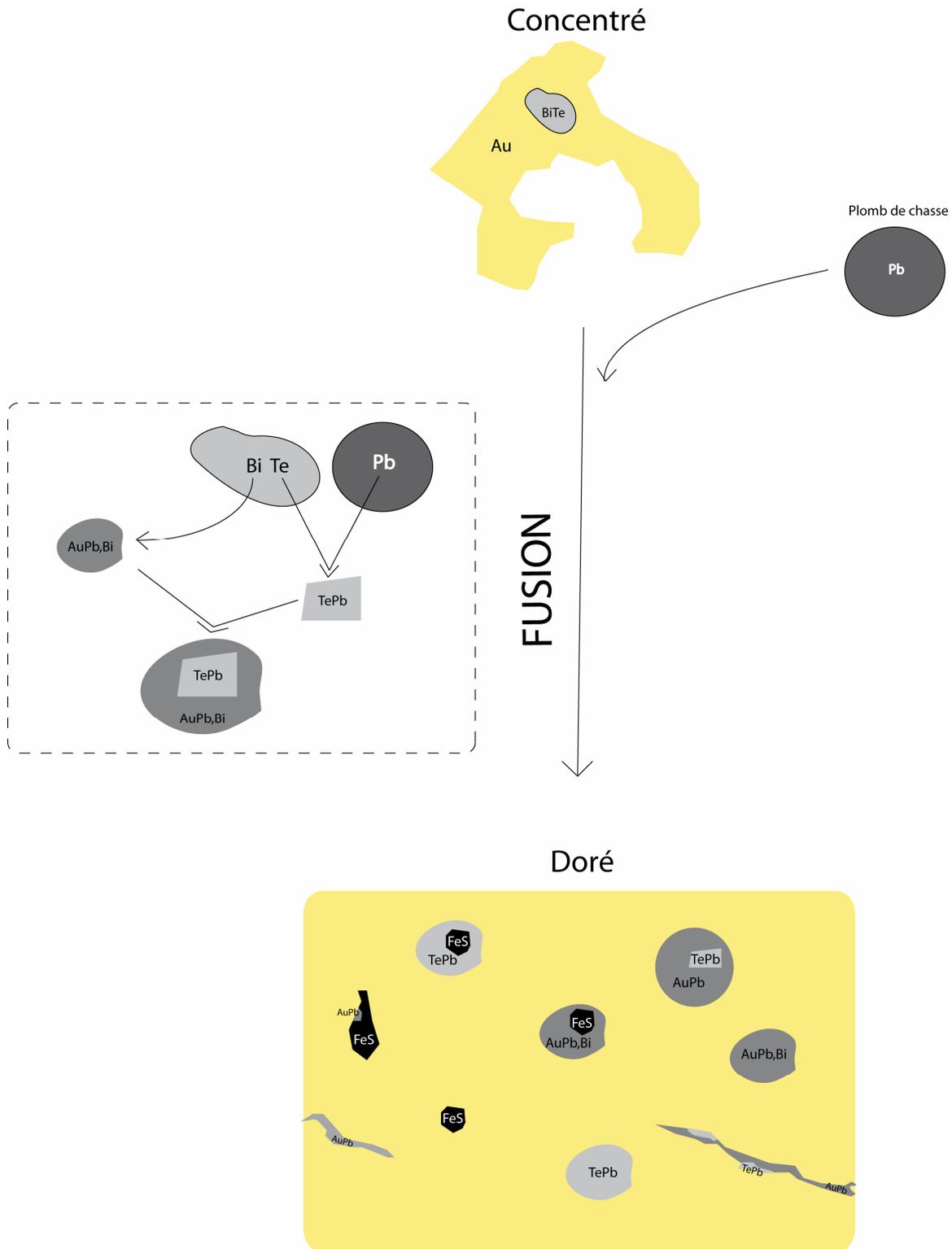
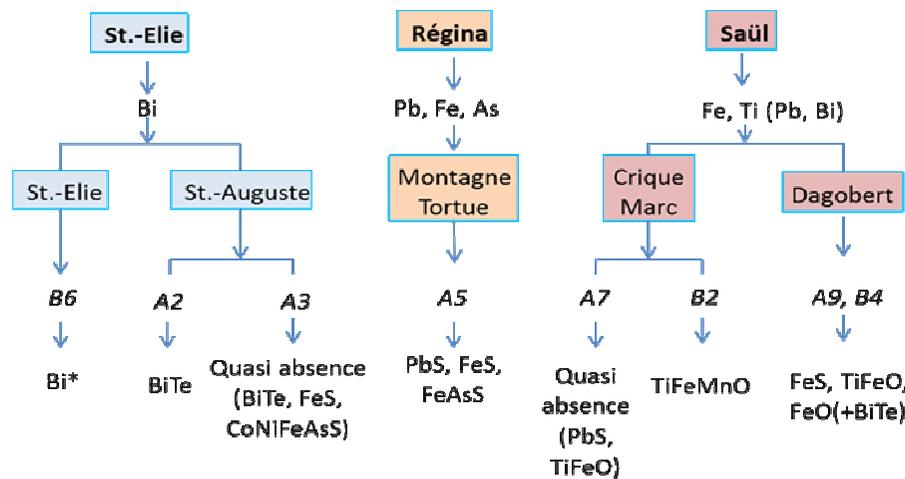


Figure 55 : Modèle d'évolution du concentré riche en tellure de bismuth en doré riche en alliage or plomb (bismuth) et tellure de plomb à partir des observations microscopiques.

CO
NC
EN
TR
F



DORE

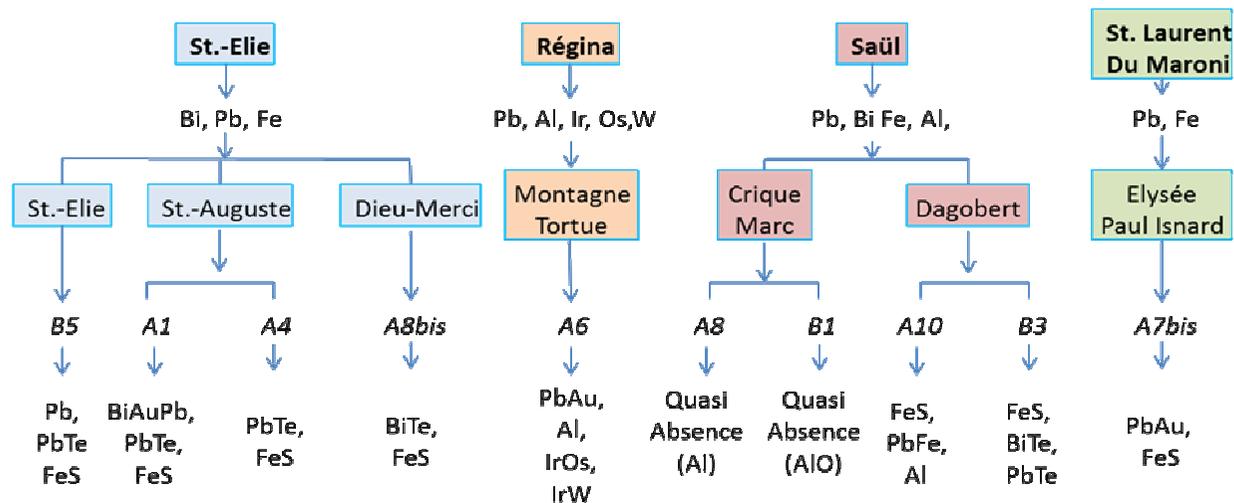


Figure 56 : Graphique récapitulatif des micro-inclusions et des éléments signatures de chaque échantillon et lieu d'extraction

5. Analyse des grains d'or à la microsonde électronique

5.1. Présentation de la méthode

Trente grains par échantillon de concentré de Guyane et du Surinam et 10 copeaux par échantillon de doré ont été analysés pour connaître leurs teneurs Au, Ag, Cu et Hg. Ces éléments ont été choisis après un balayage systématique car ce sont les seuls qui se sont avérés détectables dans les grains d'or avec le seuil de détection dans les conditions analytiques choisies. Au total, 641 analyses ont été obtenues.

Pour chaque grain de concentré, des analyses ont été réalisées au cœur et en bordure afin de mettre en évidence des variations de composition entre cœur et bordure. Entre 1 et 4 analyses ponctuelles ont été réalisées par grain.

Après avoir testé que les copeaux de dorés ne présentaient pas de zonation et que leur composition était homogène, seuls les « cœurs » ont été analysés.

Les paramètres analytiques utilisés sont récapitulés ci-dessous.

Paramètres utilisés lors des séances à la microsonde électronique	
Tension d'accélération	20 keV
Intensité du faisceau électronique	100 nA
Temps de comptage	20 s
Conditions des spectromètres	Sp5 LLIF, Sp4 LPET, Sp3 LIF, Sp3 LIF
Standards	Cu métal, Ag métal, Au métal et Hg sans HgS
Raies	Cu=K α ; Au=L α ; Ag=L α ; Hg=L α

Dans les conditions analytiques choisies, les limites de détection sont les suivantes : Cu : 0,03 %, Ag : 0,07 %, Au : 0,35 %, Hg : 0,18 %.

Les teneurs en Au obtenues par analyse à la microsonde électronique seront présentées sous forme d'histogrammes afin de rechercher la ou les classe(s) majoritaire(s) caractéristique(s) de chaque site d'extraction.

Nous avons ensuite réalisé des graphiques montrant des corrélations f(Au)=Ag et f(Au)=Ag. Pour plus de clarté, chaque type d'échantillon est présenté dans un graphique différent. On trouvera ainsi des graphiques de corrélation pour les concentrés primaires, pour les concentrés alluvionnaires et pour les dorés.

À des fins d'homogénéisation, les analyses ont été normalisées à 100 %.

5.2. *histogrammes montrant la variation en Au de chaque lieu d'extraction*

5.2.1. Saint-Élie

Les concentrés

Les grains de concentrés de Saint-Élie ont des teneurs en or variant de 93 à 100 %. Le cœur des grains des échantillons A2 et A3 montrent des teneurs en Au majoritairement comprises entre 97 et 98 % (Figure 57, Figure 58). Les grains de l'échantillon B6 présente des teneurs en Au majoritairement comprises entre 96 et 97 % et une plus faible proportion des grains, toutefois non négligeable, des teneurs comprises entre de 95 à 96 % Au (Figure 59). En compilant ces données, on peut conclure que la majorité des grains provenant de Saint-Élie a une composition comprise entre 95 et 98 % Au. Seul l'échantillon A3 présente un enrichissement en or en bordure de grain cohérent avec les observations microscopiques et son origine éluvionnaire. A2 et B6 étant d'origine primaire, il est normal que les bordures de ces grains ne soient pas enrichies en or.

Les dorés

Les dorés A1 et A4 produits à Saint-Élie (Saint Auguste) contiennent de 96 à 97 % Au (Figure 57, Figure 58). Les concentrés A2 et A3 dont ils sont issus contiennent 97 à 98 % Au. Les dorés sont appauvris de 1 % Au par rapport aux concentrés équivalents.

La composition du doré B5 est différente des deux autres dorés provenant de Saint-Élie. Elle varie entre 87 et 94 % d'Au et une majorité des grains présente une teneur en Au comprise entre 92 et 93 % (Figure 59). Le concentré B6 étant composé majoritairement de 95 à 97 % Au, le doré B5 dont il est issu, s'est appauvri de 3-4 % d'or.

Les fragments du doré A8bis provenant de Dieu-Merci (également dans le district de Saint-Élie) ont des teneurs en Au comprises entre 92 et 94 % (Figure 60).

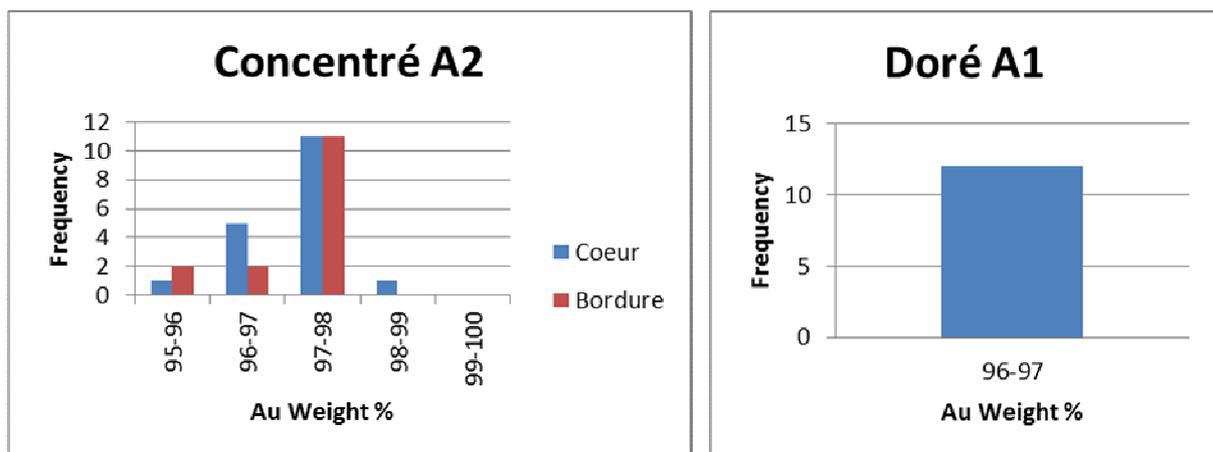


Figure 57 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A2 et du doré A1 provenant de Saint-Élie (Saint-Auguste).

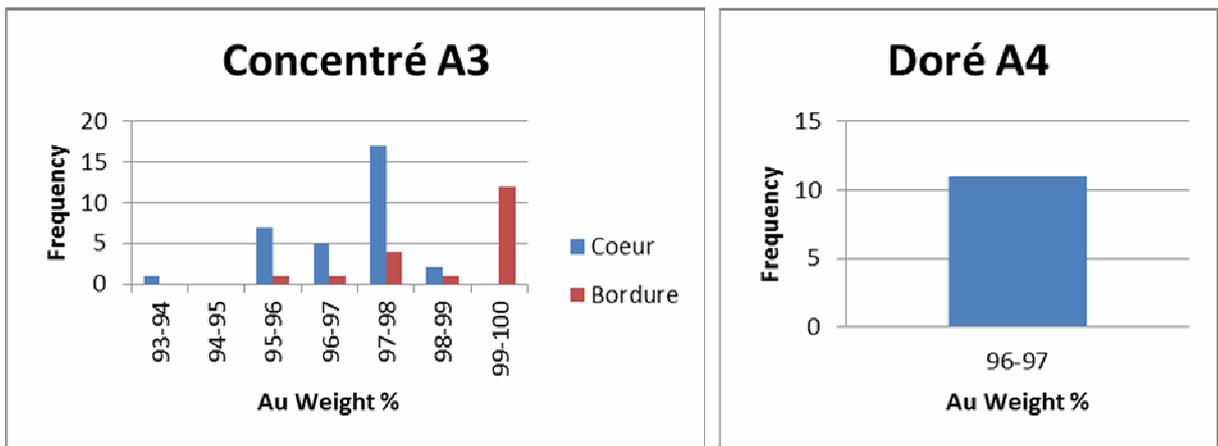


Figure 58 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A3 et du doré A4 provenant de Saint-Élie (Saint-Auguste).

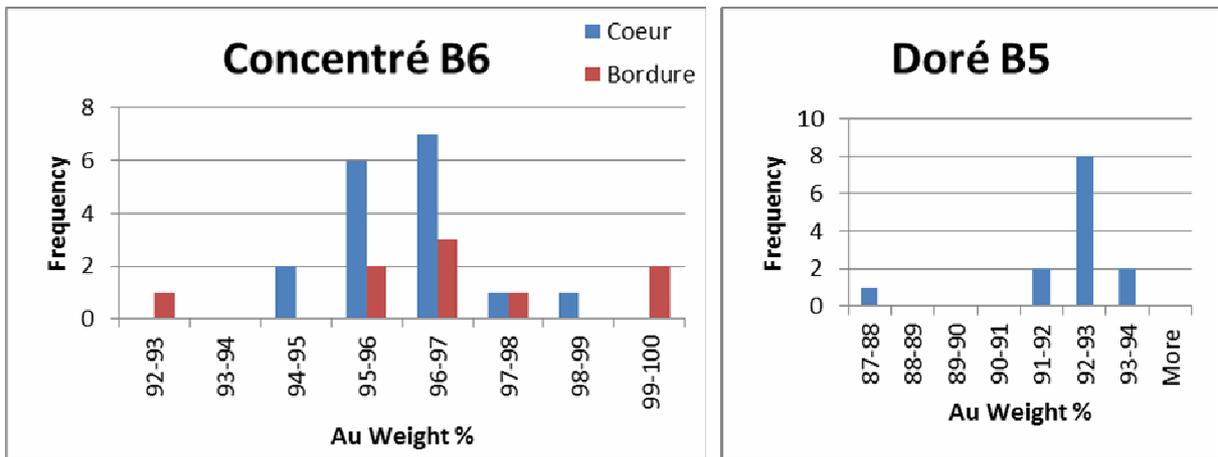


Figure 59 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré B6 et du doré B5 provenant de Saint-Élie.

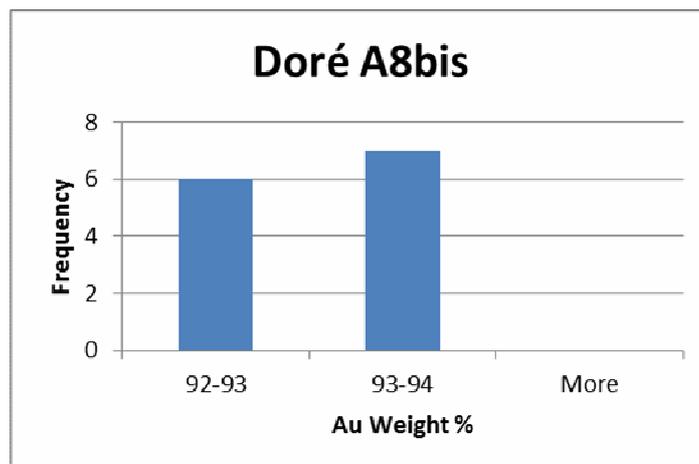


Figure 60 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du doré A8bis provenant de Saint-Élie (Dieu-Merci).

5.2.2. Montagne Tortue

Le concentré

La composition des grains de concentré A5 varie de 85 à 100 %.

La composition des cœurs varie entre 85 et 97 % Au. La majorité d'entre eux contient de 88 à 89 % Au et une plus faible proportion contient de 92 à 93 % Au (Figure 61). Les grains provenant de la Montagne Tortue sont composés de deux populations de grains : une population de grain majoritairement composée de 88 à 89 % Au et par une deuxième population plus faiblement représentée caractérisée par des teneurs variant de 92 à 93 % Au.

Les bordures des grains sont nettement enrichies en or et contiennent plus de 99 % Au ce qui coïncide avec les observations microscopiques et une origine alluvionnaire.

Le doré

Le doré A6 provenant de Montagne Tortue présente des teneurs en Au comprises entre 93 et 94 % (Figure 61) égale à la teneur moyenne en Au des grains du concentré correspondant, en considérant les teneurs mesurées au cœur des grains et sur leurs bordures enrichies. Ce doré n'a donc pas subi de contamination lors de la fusion des grains de concentré.

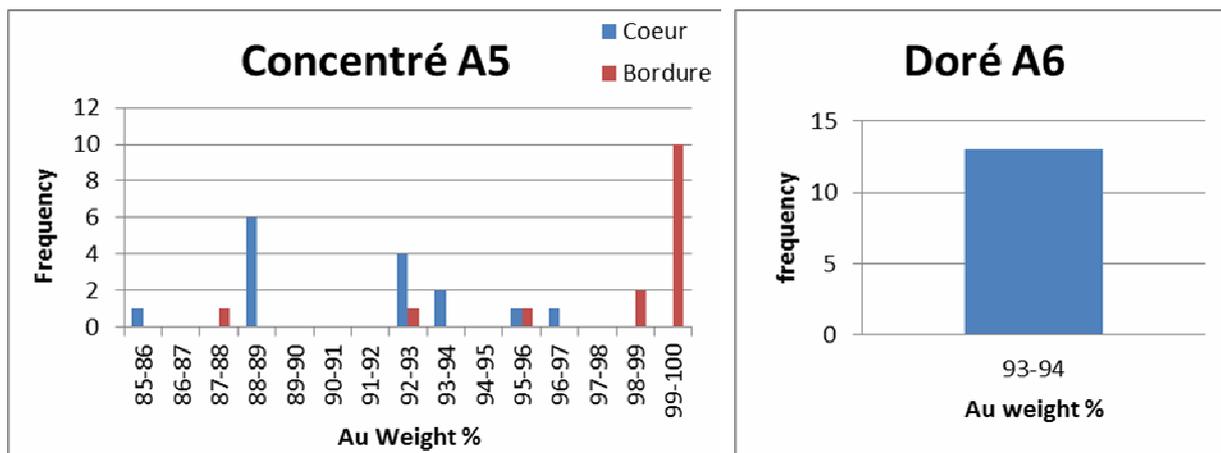


Figure 61 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A5 et du doré A6 provenant de la Montagne Tortue.

5.2.3. Dagobert

Les concentrés

La composition en Au des grains provenant de Dagobert varie de 80 à 100 % d'au.

La composition des grains de l'échantillon A9 varient de 91 à 95 % (Figure 62). Une majorité des grains a une composition comprise entre 92 et 93 % Au.

Le deuxième concentré provenant de Dagobert, l'échantillon B4, présente des grains dont la composition des cœurs varie de 80 à 96 % Au (Figure 63). La majorité des cœurs des grains de l'échantillon B4 a une composition comprise entre 93 et 94 % Au. Un grain de l'échantillon B4 présente des bordures enrichies en or contenant plus de 99 % Au.

Les teneurs majoritaires en or identifiées pour les échantillons A9 et B4 nous montrent qu'il existe une bonne corrélation entre ces deux échantillons et que les cœurs des grains de concentré provenant de Dagobert sont majoritairement composés de 92 à 94 % Au.

Les bordures des échantillons A9 et B4 ne sont pas enrichies en or ce qui coïncide avec une origine primaire. Le seul grain ayant une bordure enrichie en or est celui décrit dans la partie observation microscopique (grain n° 1). Ce grain est très différent des autres et nous ne savons pas pourquoi ce grain primaire montre des bordures enrichies en or.

Les dorés

L'échantillon de doré A10 possède des teneurs en Au variant de 93 à 94 % (Figure 62). Le deuxième échantillon de doré provenant de Dagobert, l'échantillon B3, a une composition en or variant de 92 à 93 % (Figure 63). Les dorés provenant de Dagobert montrent des teneurs en or majoritairement comprises entre 92 et 94 %.

Ces dorés ont des teneurs en or identiques aux teneurs en or majoritairement observées dans les concentrés A9 et B4 dont ils sont issus. On peut donc supposer que ces dorés n'ont pas subi de contamination lors de la fusion des concentrés.

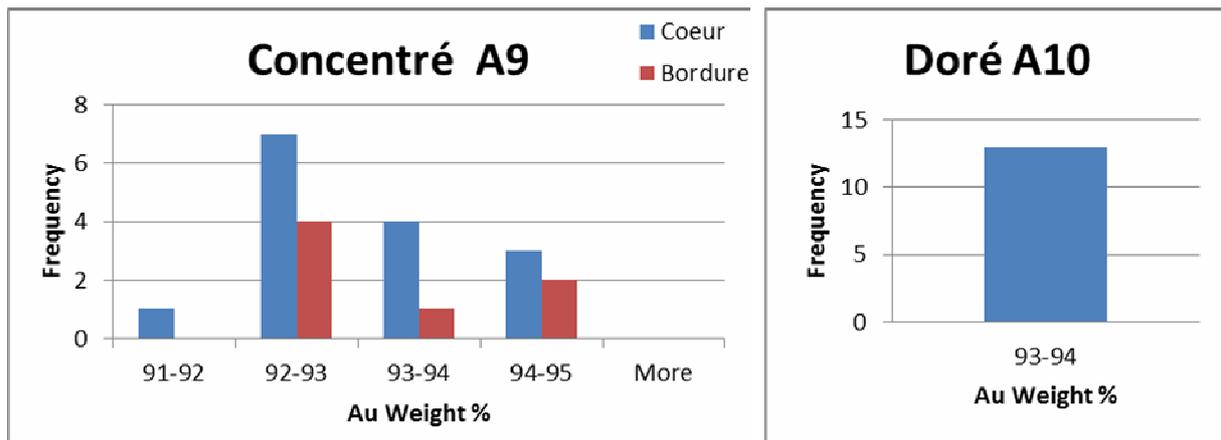


Figure 62 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A9 et du doré A10 provenant de Dagobert.

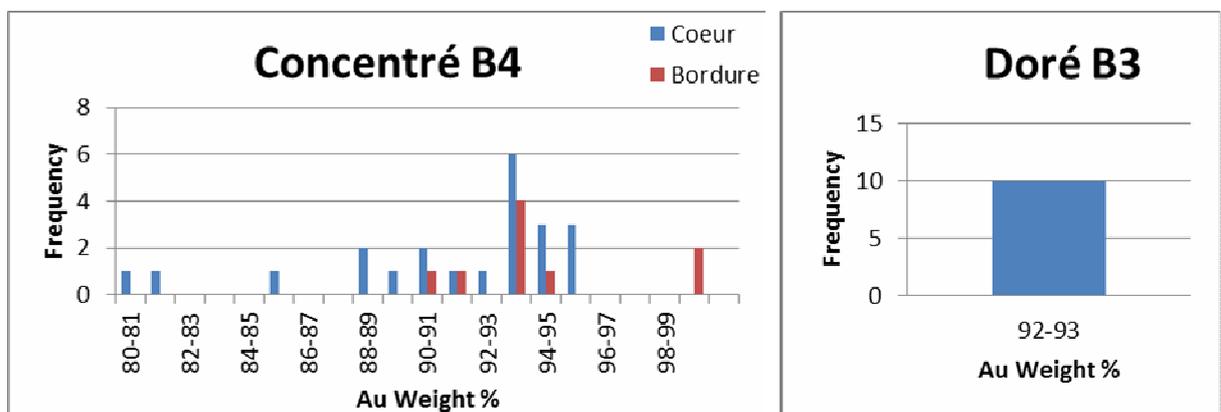


Figure 63 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré B4 et du doré B3 provenant de Dagobert.

5.2.4. Crique Marc

Les concentrés

La composition en Au des grains de concentré provenant de Crique Marc varie de 84 à 100 %.

L'échantillon B2 est un concentré dont la composition des grains varie de 88 à 100 % Au (Figure 64). Les cœurs de ces grains ont une composition comprise entre 88 et 97 % Au. Ils sont majoritairement composés de 95 à 96 % d'or. Les bordures sont nettement enrichies en or : la composition des bordures de ces grains est supérieure à 98 % Au et la majorité présente une composition supérieure à 99 % Au.

L'échantillon A7 est un concentré dont la composition des grains varie de 84 à 100 % Au (Figure 65). La composition des cœurs de ces grains varie de 84 à 98 % Au. Ils sont majoritairement composés de 94 à 95 % d'or. Les bordures des grains de l'échantillon A7 sont enrichies en or : elles sont composées de plus de 99 % d'or.

On constate qu'il existe des similitudes entre ces deux échantillons de concentrés provenant de Crique Marc : les cœurs des grains sont composés de 94 à 96 % d'or et les bordures de plus de 99 % d'or. Les compositions des cœurs des grains des échantillons B2 et A7 sont nettement inférieures à celles mesurées en bordure des grains ce qui est explicable par l'origine alluvionnaire de ces grains.

Les dorés

La composition du doré B1 varie de 92 à 95 % d'or (Figure 64) et une majorité des grains est composée de 93 à 94 % d'or. La composition en or du doré A8 (Figure 65) varie quant à elle de 94 à 96 % et une majorité des grains est composé de 95 à 96 % d'or.

Les dorés produits à Crique Marc possèdent des teneurs en or comprises entre 93 et 96 %. On peut constater que ces teneurs en or sont identiques aux teneurs majoritaires des concentrés extraits dans cette localité. On peut donc supposer que ces dorés n'ont pas été contaminés lors de leur fusion.

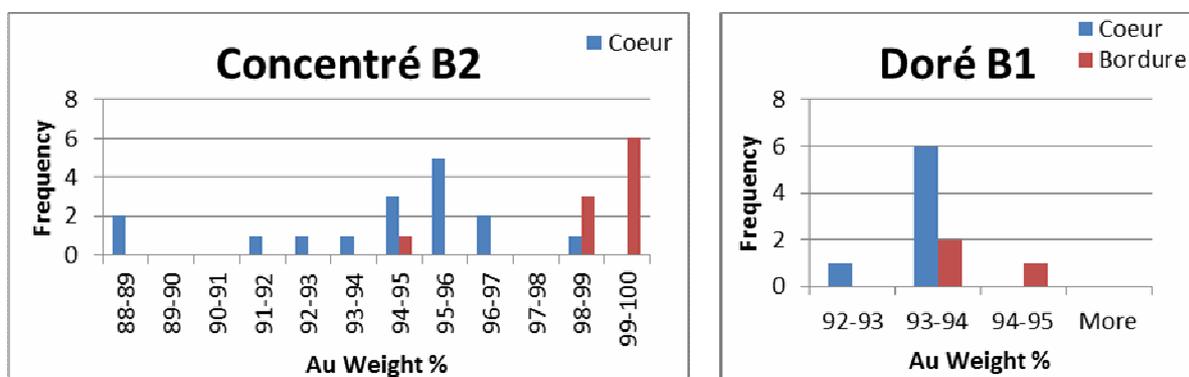


Figure 64 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré B2 et du doré B1 provenant de la Crique Marc.

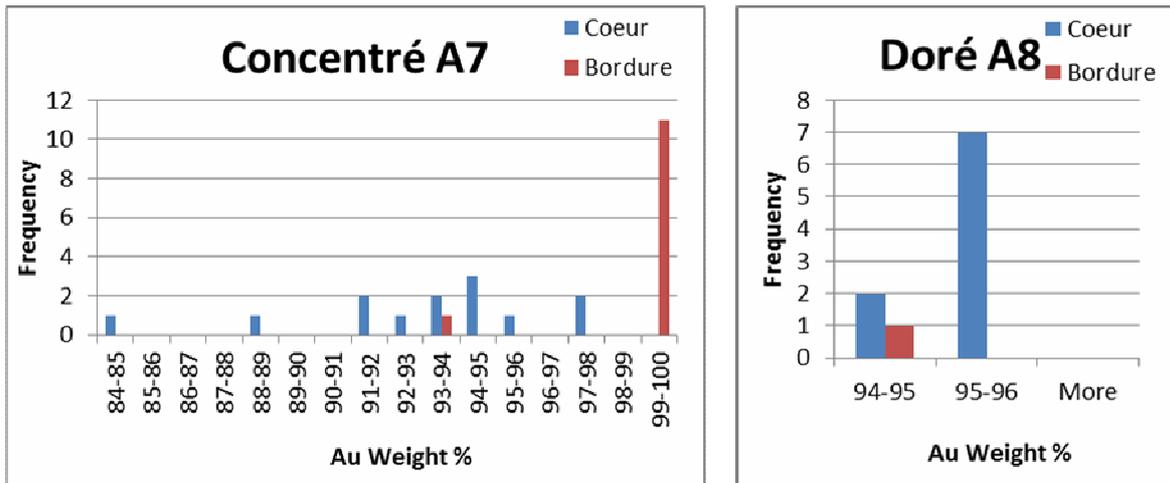


Figure 65 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du concentré A7 et du doré A8 provenant de Crique Marc.

5.2.5. Élysée (Paul-Isnard)

Les grains provenant d'Élysée (Paul-Isnard) ont des teneurs en or comprises entre 84 et 86 % (Figure 66). Une majorité des grains a des teneurs en or comprises entre 84 et 85 %.

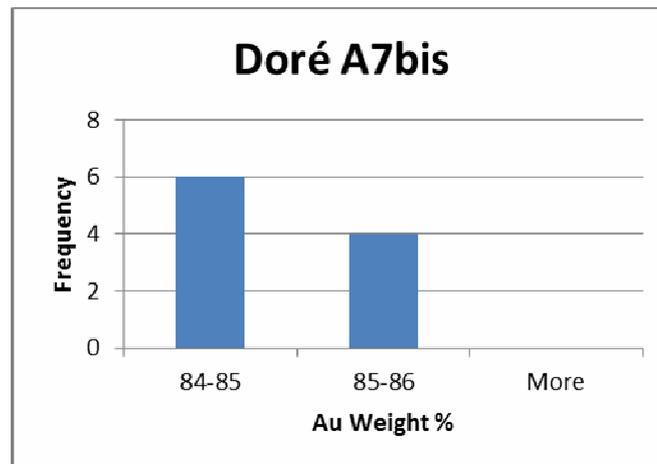


Figure 66 : Variation de la teneur en or entre le cœur et la bordure des grains du doré A7bis provenant d'Élysée (Paul-Isnard).

5.2.6. Corrélation entre les teneurs en or des grains de Crique Marc et ceux de Dagobert

La composition en or des cœurs des grains provenant de Dagobert varie principalement entre 92 et 94 %. Cette teneur en or est très proche et légèrement inférieure à celle des grains provenant de Crique Marc qui est comprise entre 94 et 96 %. Les échantillons provenant de Dagobert sont primaires et ceux de Crique Marc sont alluvionnaires. Sachant que ces deux sites d'extractions sont distants de quelques kilomètres, il est probable que les grains exploités à Crique Marc proviennent du gisement primaire de Dagobert. D'après Grant *et al.* (1991) le cœur des grains est supposé conserver la composition du gisement primaire donc nous ne devrions pas observer de variation de composition entre ces deux échantillons ; cependant ce même auteur considère qu'une variation de 1 à 4 % en argent

(ou en or) entre les cœurs de grains primaires et alluvionnaires ne remet pas en cause une origine primaire commune.

Cette affiliation entre le gisement primaire de Dagobert et le gisement alluvionnaire de Crique Marc peut être confirmée grâce aux observations microscopiques : les grains de Dagobert contiennent des micro-inclusions de pyrite tandis que les grains récoltés dans la Crique Marc contiennent soit peu d'inclusions dont quelques galènes soit des oxydes de fer et des ilménites (Figure 36). La pyrite et la galène sont deux minéraux connus dans le gisement de Dagobert (Machairas, 1963). La pyrite et la galène peuvent donc être des micro-inclusions caractéristiques du gisement primaire de Dagobert. Or la pyrite de ce gisement primaire est souvent observée altérée en oxydes, contrairement à la galène (Machairas, 1963). Ainsi l'altération amorcée dans le gisement primaire et poursuivie dans la rivière, entraînerait la décomposition de la pyrite en oxyde de fer sans toutefois affecter la galène. Cette interprétation expliquerait la présence de micro-inclusion d'oxyde de fer et de rares galènes dans les grains de Crique Marc par un transport depuis le gisement primaire de Dagobert.

5.3. Conclusion sur l'étude de la teneur en or des échantillons pour caractériser les lieux d'extraction

5.3.1. Les concentrés

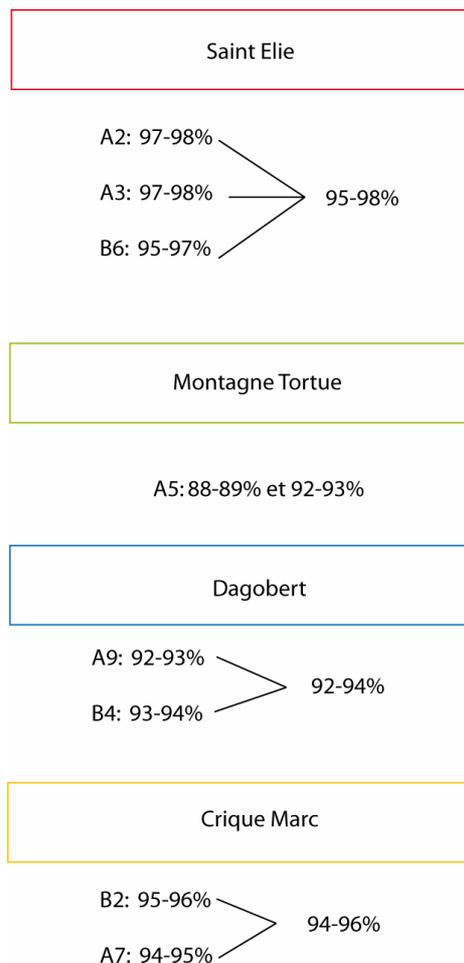


Figure 67 : Récapitulatif des teneurs en Au majoritairement mesurées à la microsonde électronique au cœur des grains de concentrés des sites de Saint-Élie, Montagne Tortue, Dagobert et Crique Marc

Les teneurs majoritaires en or des cœurs des grains mises en évidence par les histogrammes nous permettent de trouver une signature pour chaque échantillon de concentré provenant des sites de Saint-Élie, Montagne Tortue, Dagobert et Crique Marc (Figure 67) :

- les grains de concentré provenant de Saint-Élie ont des teneurs en or majoritairement comprises entre 95 et 98 %,
- les grains de concentré provenant de Montagne Tortue sont caractérisés par deux populations de grains. La première est représentée par des teneurs en or comprise entre 88 et 89 % et la seconde par des teneurs en Au comprises entre 92 et 93 %,
- les grains de concentré provenant de Dagobert ont des teneurs en or majoritairement comprises entre 92 et 94 %,
- les grains de concentré provenant de Crique Marc ont des teneurs en or majoritairement comprises entre 94 et 96 %.

Nous avons également pu mettre en évidence un lien génétique possible qui existe entre les grains provenant de Dagobert et de Crique Marc.

Il existe des teneurs en or qui sont communes à plusieurs sites d'exploitations :

- des grains majoritairement composés de 92 à 93 % d'or peuvent provenir de Dagobert ou de Montagne Tortue,
- des grains majoritairement composés de 95 à 96 % d'or peuvent provenir de Crique Marc ou de Saint-Élie.

Ainsi il ne sera pas possible d'identifier l'origine d'échantillons de concentré dont la majorité des grains est composée de 92-93 % d'or ou 95-96 % d'or.

5.3.2. Les dorés

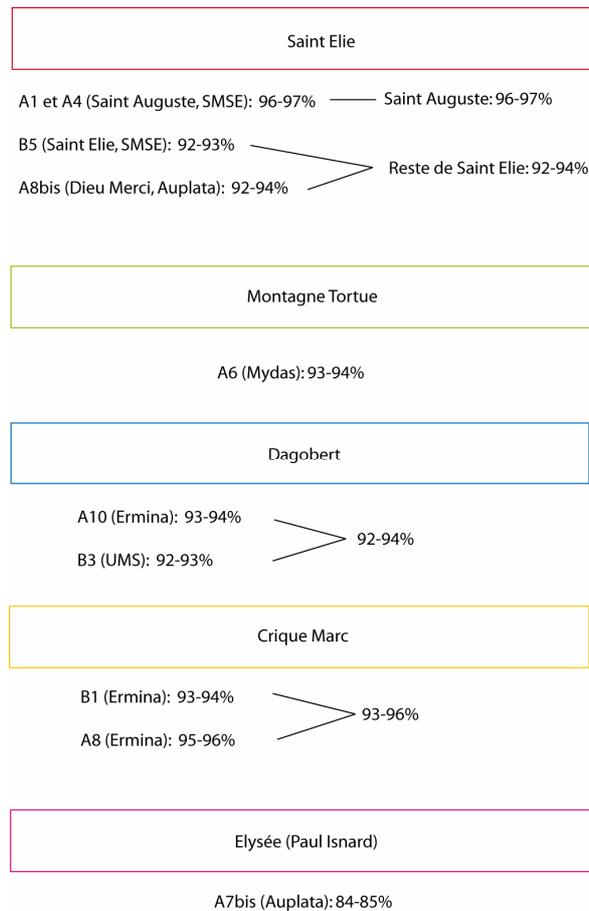


Figure 68 : Récapitulatif des teneurs en Au majoritairement mesurées à la microsonde électronique au cœur des grains de dorés des sites de Saint Elie, Montagne Tortue, Dagobert, Crique Marc et Élysée (Paul-Isnard).

Les teneurs en Au des dorés provenant de Saint Elie, Montagne Tortue, Dagobert, Crique Marc et Élysée (Paul-Isnard) ont été étudiées pour rechercher les signatures chimiques des dorés de ces de 5 localités (Figure 68).

Les dorés ont des teneurs en or beaucoup plus homogènes que les concentrés. Au sein d'un même échantillon ou d'un même grain, la variation de la teneur en or n'excède pas 1,5 %.

Si on se concentre sur les échantillons fournis par la SMSE, on constate les grains de dorés provenant de Saint-Élie contiennent 4 % d'or en moins que ceux provenant de Saint-Élie (Saint-Auguste). On en déduit donc qu'il peut exister une forte variabilité des teneurs en or parmi des échantillons fournis par un même exploitant et produits sur un même site.

Les dorés A6 produits à Montagne Tortue, A10 et B3 à Dagobert, B1 à Crique Marc et B5 et A8bis à Saint-Élie sont globalement composés de 92 à 94 % Au. Ainsi il n'est pas possible de différencier ces six dorés entre eux uniquement par l'étude de leur teneur en Au. Seuls les dorés provenant de Saint-Élie (Saint-Auguste) et Élysée (Paul Isnard) sont différenciables des autres sites de production guyanais par cette méthode.

5.4. Les galettes du Surinam

Les analyse à la microsonde électronique des galettes du Surinam montrent une importante hétérogénéité de la teneur en Au entre les grains d'un même échantillon et entre les échantillons (Figure 69).

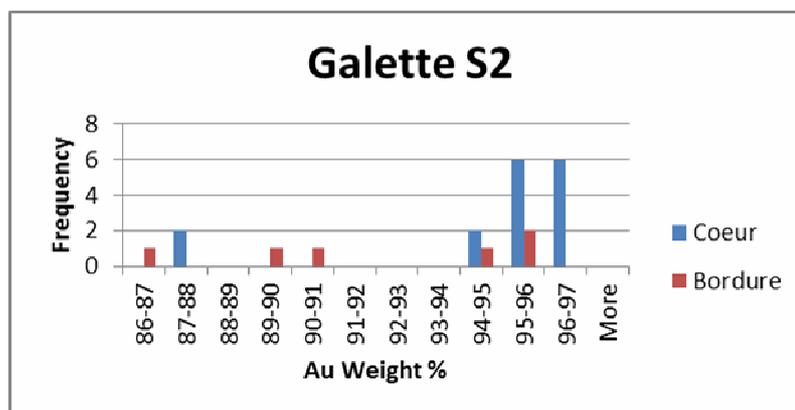
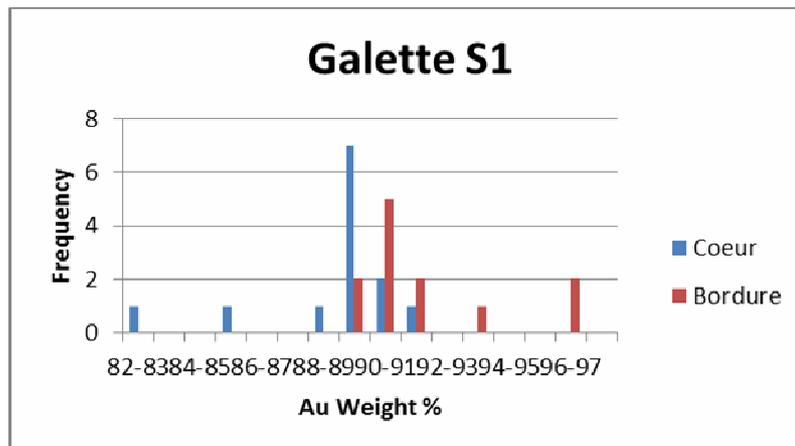
L'échantillon S1 est composé de grains d'or dont la teneur en or varie de 82 % à 97 %. La majorité des grains est composé de 89 à 90 % d'or.

L'échantillon S2 est composé de grains d'or dont la teneur en or varie de 86 à 97 %. La majorité des grains est composé de 95 à 97 % d'or.

L'échantillon S3 est composé de grains d'or dont la teneur en or varie de 85 à 100 %. La majorité des grains est composé de 85 à 86 % Au et 91 à 92 % Au. Cet échantillon est donc composé de deux populations de grains.

L'échantillon S4 est composé de grains d'or dont la teneur en or varie de 75 à 96 %. La majorité des grains est composé de 92 à 93 % d'or.

L'échantillon S5 est composé de grains d'or dont la teneur en or varie de 79 à 10 %. La majorité des grains est composé de 91 à 92 % d'or.



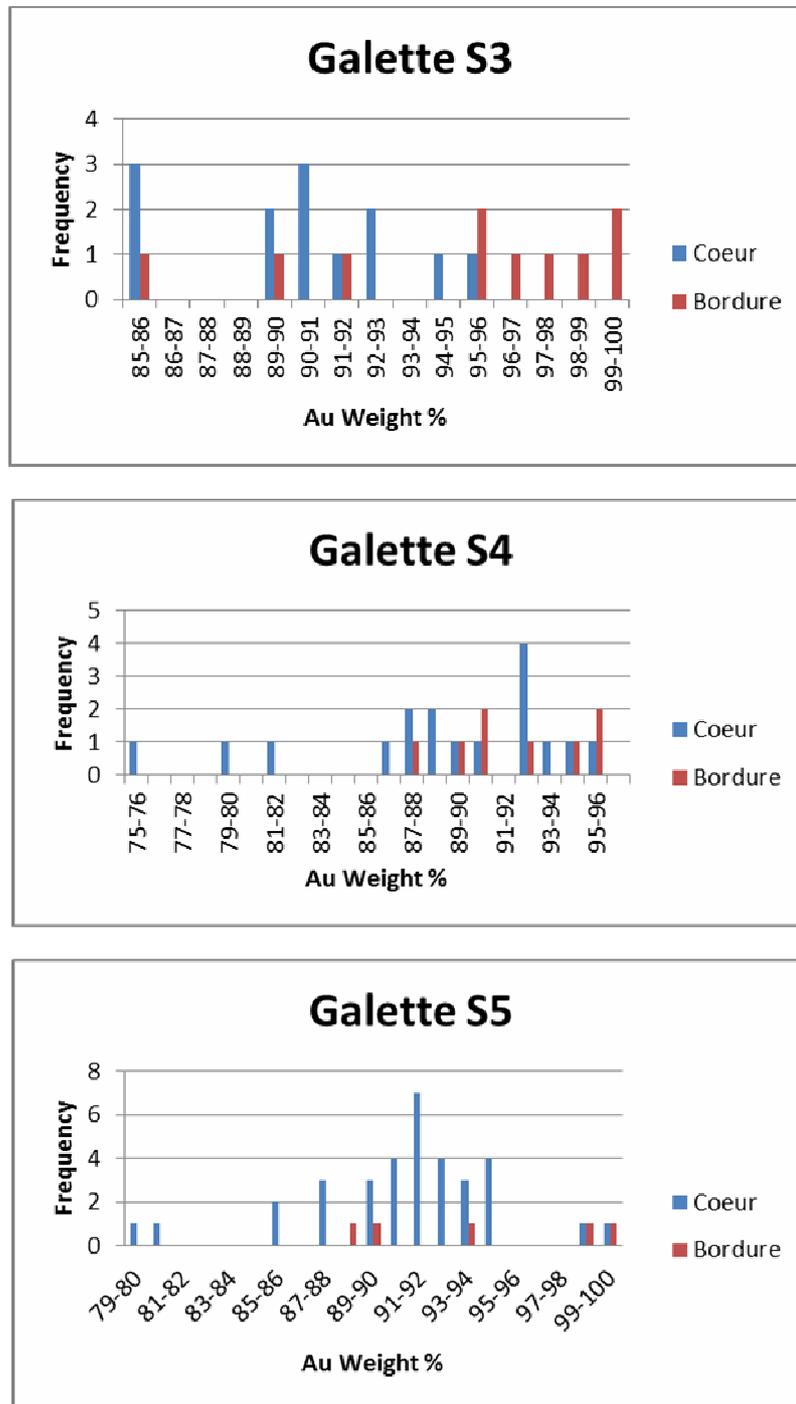


Figure 69 : Variation de la teneur en Au des échantillons de galettes provenant du Surinam.

5.4.1. Conclusion sur les teneurs en or des galettes du Surinam

Les échantillons de galettes du Surinam ont tous des teneurs en or caractéristiques :

- S1 est majoritairement composé de grains contenant 89 à 91 % Au,
- S2 est majoritairement composé de grains contenant 95 à 97 % Au,
- S3 est majoritairement composé de grains contenant 85 à 86 % ou 90 à 91 % Au,
- S4 est majoritairement composé de grains contenant 92 à 93 % Au,
- S5 est majoritairement composé de grains contenant 91 à 92 % Au.

Il est donc possible de différencier les échantillons du Surinam entre eux grâce à l'analyse de leur composition en or puis en étudiant les teneurs en or majoritaires de ces échantillons.

5.5. *Corrélation Ag-Au et Cu-Au*

L'utilisation des graphiques $f(\text{Au})=\text{Ag}$ et $f(\text{Au})=\text{Cu}$ ou des histogrammes pour identifier la localité d'origine d'un lot de grains d'or nécessite de savoir au préalable si ces grains sont des concentrés primaires, éluvionnaires ou des dorés. Une observation microscopique des grains permet de déterminer à quel type appartient l'échantillon étudié.

5.5.1. Les concentrés primaires

Les concentrés primaires à notre disposition proviennent de Saint-Élie, Saint-Élie (Saint-Auguste) et de Dagobert. Les graphiques $f(\text{Au \%})=\text{Cu \%}$ et $f(\text{Au \%})=\text{Ag \%}$ (Figure 70) mettent en évidence une limite nette à 95 % Au entre les échantillons de ces deux localités. Les grains ayant une teneur $\text{Au} < 95\%$ proviennent de Dagobert et ceux ayant une teneur $\text{Au} > 95\%$ proviennent de Saint-Élie. Corrélativement, les teneurs en argent permettent également de différencier les grains de ces deux localités. Les grains ayant une teneur $\text{Ag} < 5\%$ proviennent de Saint-Élie et ceux ayant une teneur $\text{Ag} > 5\%$ proviennent de Dagobert. Les grains qui contiennent une teneur en $\text{Cu} < 0,2\%$ peuvent provenir des deux localités par contre des grains où $\text{Cu} > 0,2\%$ sont caractéristiques de Saint-Élie.

On constate également que les grains éluvionnaires de Saint-Élie ont une signature identique à celle des grains primaires de cette localité. Par définition les grains éluvionnaires n'ont pas voyagé. Ils restent au niveau de la saprolite et de la latérite.

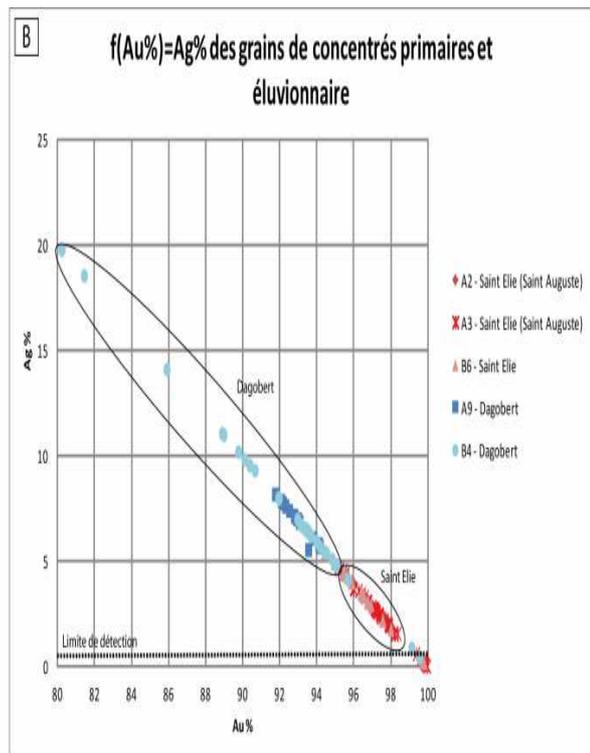
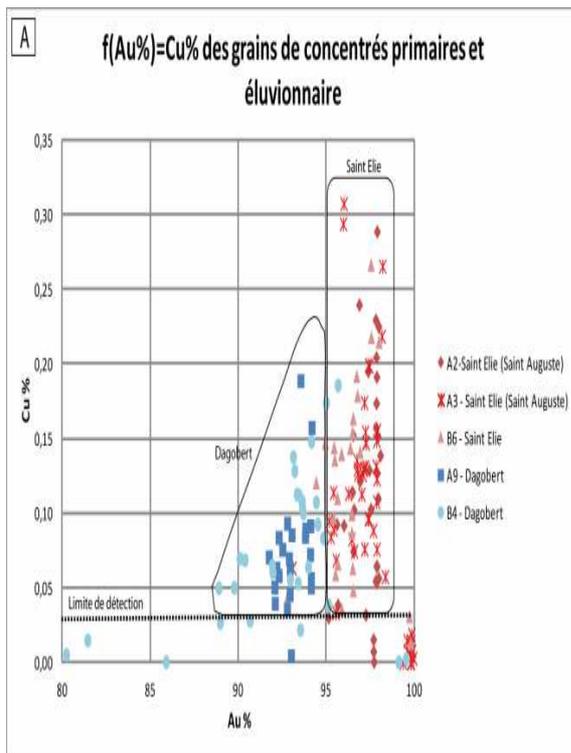
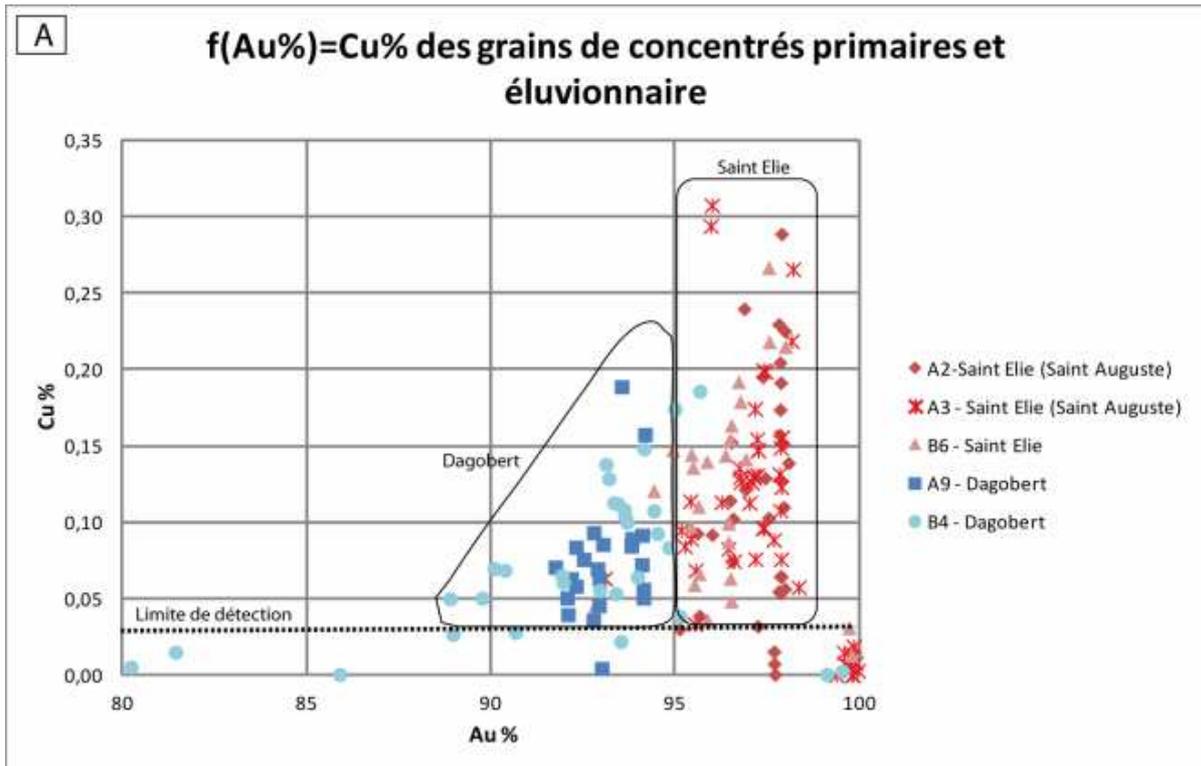


Figure 70 : Graphiques illustrant la variation des teneurs en argent (graphique A) et en cuivre (graphique B) en fonction des teneurs en or des grains de concentrés primaires provenant de Dagobert et Saint-Élie.

5.5.2. Les concentrés alluvionnaires

Nous avons comparé les teneurs en or, argent et cuivre de trois échantillons d'origine alluvionnaire : les échantillons B2 et A7 proviennent de Crique Marc et l'échantillon A5 a été prélevé à Montagne Tortue (Figure 71).

Les grains provenant de Crique Marc ont des cœurs dont :

- les teneurs en Cu varient de 0,05 % à 0,17 %,
- les teneurs en Au varient de 84,60 % à 98,97 %,
- les teneurs en Ag varient de 1,01 % à 15,40 %.

Les grains alluvionnaires provenant de Crique Marc montrent une grande variabilité en cuivre, or et argent. Il n'est donc pas possible de définir des teneurs en cuivre, or et argent caractéristiques pour ce lieu d'extraction.

Les grains provenant de Montagne Tortue montrent une répartition sur ces graphiques moins étendue. Ils sont regroupés en deux voire trois populations (la mention d'une troisième population est discutable car elle n'est représentée que par 2 grains cependant si nous avons analysé d'avantage de grains, elle se serait peut-être d'avantage affirmée) :

1. $0,03 < \text{Cu} < 0,04$ et $11,595 < \text{Ag} < 12,40$
2. $0,05 < \text{Cu} < 0,06$ et $6,69 < \text{Ag} < 7,55$
3. $0,09 < \text{Cu} < 0,22$ et $3,56 < \text{Ag} < 4,08$

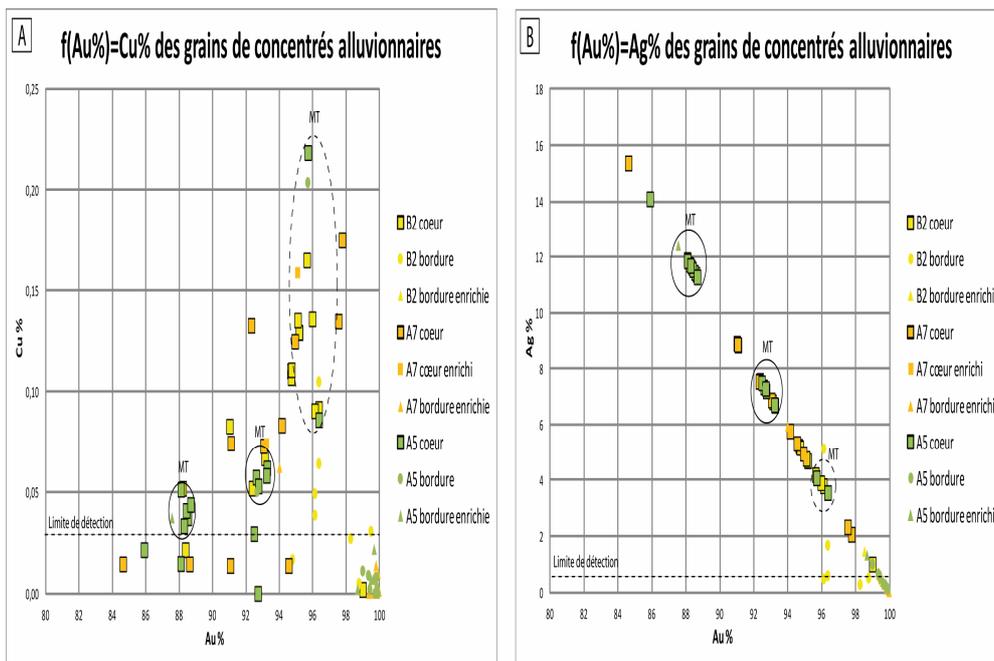
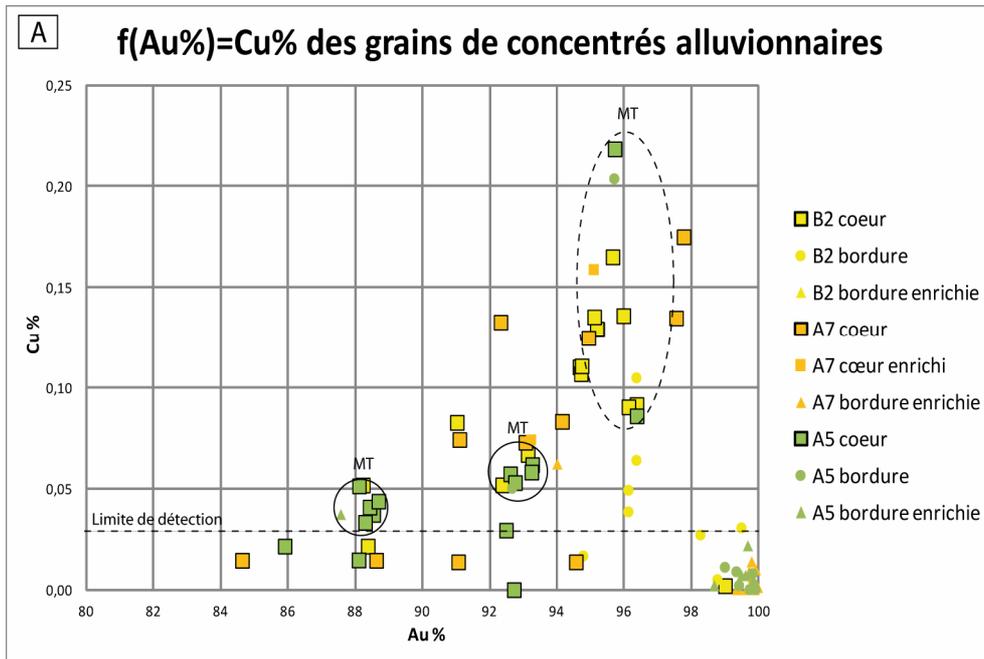


Figure 71 : Graphiques illustrant la variation des teneurs en cuivre (graphique A) et en argent (graphique B) en fonction des teneurs en or dans des grains de concentrés alluvionnaires provenant de Montagne Tortue (MT) et de Crique Marc.

5.5.3. Les dorés

Des graphiques montrant l'évolution des teneurs en cuivre et en argent en fonction des teneurs en or ont été réalisés pour rechercher des teneurs caractéristiques pour chacun des sites de production de dorés guyanais (Figure 72 A, B et C).

Saint-Élie

Les copeaux de l'échantillon A8bis sont facilement différenciables car ils sont caractérisés par des teneurs élevées en Cu qui varient entre 1,42 % et 2,32 %. Les copeaux des échantillons A4 et A1 provenant de Saint Élie ont des teneurs en or comprises entre 96,5 % et 96,8 % ; cependant ils peuvent être facilement différenciés grâce à leur teneur en cuivre : l'échantillon A4 a des teneurs en cuivre inférieures à 0,16 % et l'échantillon A1 a des teneurs en cuivre supérieures à 0,29 %. L'échantillon B5 est caractérisé par une absence de cuivre et des teneurs en or inférieures à 93,12 %.

On constate que les copeaux des échantillons A1, A4, A8bis et B5 produits sur la commune de Saint-Élie ont des teneurs en Au, Cu et Ag caractéristiques qui permettent de bien les différencier des autres échantillons de doré produits sur les autres sites guyanais (Figure 72 A et B). Il est également possible de différencier chaque site de production de cette commune grâce au graphique $f(\text{Au \%})=\text{Cu \%}$ (Figure 72A).

Crique Marc et Dagobert

Les dorés produits à Crique Marc et Dagobert (commune de Saül) montrent des teneurs en or, argent et cuivre proches. Ils contiennent entre 92,5 % et 95 % d'or et moins de 0,66 % de cuivre. Les copeaux des échantillons B1 et B3 produits à Crique Marc et de l'échantillon A10 provenant de Dagobert possèdent des teneurs en Au et Ag trop proches pour être différenciées sur le graphique $f(\text{Au \%})=\text{Ag \%}$ (Figure 72B). On peut cependant remarquer que l'échantillon A8 produit à Crique Marc a des teneurs en Au > 94,5 % ce qui fait de lui l'échantillon le plus riche du district de Saül et permet de le différencier nettement des autres échantillons provenant de ce district. Le graphique $f(\text{Au \%})=\text{Cu \%}$ (Figure 72A) montre que les teneurs en cuivre des échantillons A8 et B1 de Crique Marc et A10 de Dagobert sont légèrement supérieures à la limite de détection. Ces échantillons sont donc très pauvres en cuivre. L'échantillon B3 de Dagobert contient du cuivre contrairement aux autres échantillons produits sur la commune de Saül. Les teneurs en cuivre mesurées dans ces copeaux varient de 0,22 % à 0,66 %. Les teneurs en cuivre et en or des copeaux de l'échantillon B1 sont identiques à celles de certains copeaux de l'échantillon A10. Ainsi, ces représentations graphiques ne permettent pas de différencier facilement les échantillons B1 et A10. On peut cependant étudier la variabilité des teneurs en or de ces deux échantillons pour tenter de les différencier : les copeaux de l'échantillon A10 ont une très faible variabilité en or puisque leur composition oscille entre 93,45 et 93,85 % tandis que les copeaux de l'échantillon B1 sont caractérisés par une plus grande variabilité en or, de 92,77 à 94,29 %.

Les dorés produits sur la commune de Saül ont des teneurs en or comprises entre 92,5 % et 95 % et des teneurs en cuivre inférieures à 0,66 %. Malgré le fait que ces dorés aient des compositions proches, il est possible de différencier l'échantillon A8 car il contient plus de 94,5 % d'or et l'échantillon B3 car il contient plus de 0,22 % de cuivre. Il est difficile de différencier les échantillons A10 et B1 car les copeaux de l'échantillon B1 ont les mêmes compositions que certains copeaux de l'échantillon A10 cependant la variabilité en Au n'est pas la même pour ces deux échantillons.

Montagne Tortue

Les dorés de l'échantillon A6 produits à Montagne Tortue ont des teneurs en Au, Ag et Cu très proches de certains grains des échantillons B3, A10 et B1 produits sur la commune de Saül. De petites différences existent cependant pour différencier les copeaux de l'échantillon B6 des échantillons de Saül: les échantillons B1 et A10 ne contiennent pas de cuivre

contrairement à la plupart des copeaux de l'échantillon A6, les copeaux de l'échantillon B3 contiennent plus de 0,42 % de cuivre (excepté un copeau) alors que les copeaux de l'échantillon A6 contiennent tous moins de 0,42 % de cuivre.

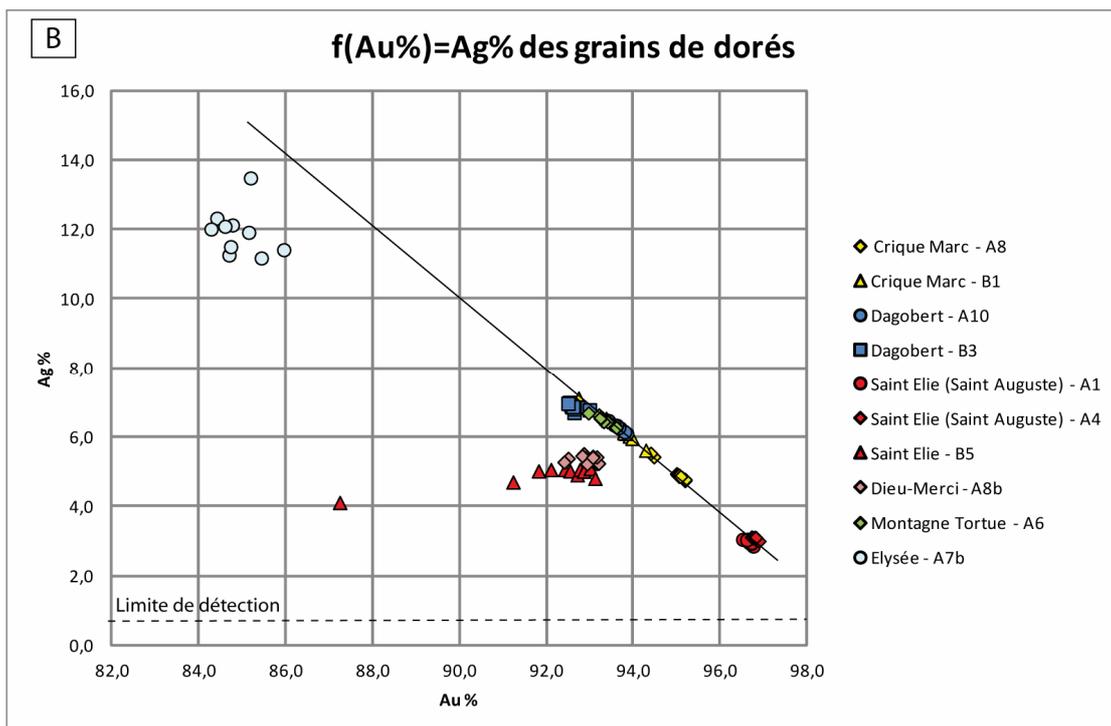
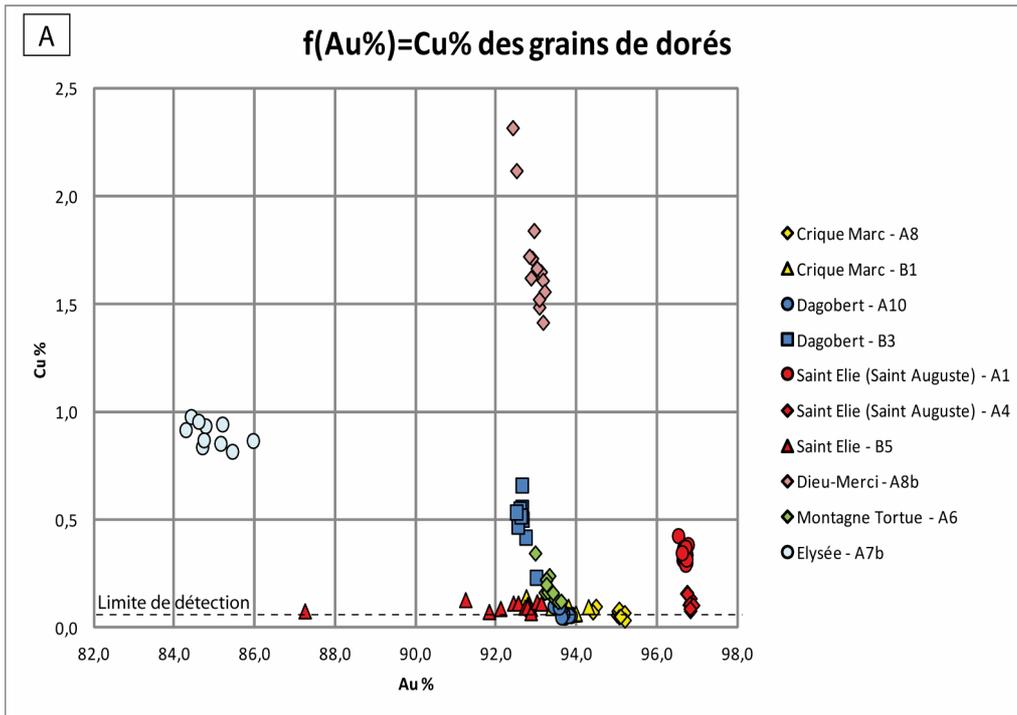
Élysée (Paul Isnard)

Les dorés de l'échantillon A7bis provenant d'Élysée sont les plus pauvres en or (84 à 86 % Au) et riche en cuivre (0,80 à 0,97 % Cu). Ces teneurs sont très caractéristiques et aucune confusion n'est possible avec un autre doré.

Explication sur la composition et la signature particulières des échantillons A7bis, A8bis et B5

Les dorés A7bis, A8bis et B5 sont très particuliers car ils ne s'alignent pas sur droite de corrélation linéaire Ag en fonction de Au (Figure 72 B) et/ou Ag+Cu en fonction de Au (Figure 72 C). En étudiant plus en détail ces dorés nous avons trouvé des signatures très caractéristiques de ces échantillons :

- les teneurs totales Au+Ag+Cu+Hg des copeaux de l'échantillon A7bis produits à Élysée sont égales à 96,79 % ce qui signifie que cet échantillon contient d'autres éléments que Au, Ag, Cu et Hg dans des teneurs de l'ordre du pourcent. L'analyse au MEB de l'or de ces copeaux nous a révélé la présence de 2,5 à 4 % de fer (Fe). Pour confirmer cette hypothèse de nouvelles analyses à la microsonde électronique incluant le Fe devraient être réalisées. La présence de fer pourrait être un critère essentiel pour identifier les dorés provenant d'Élysée. En temps normal le fer est séparé de l'or lors du traitement par un tri manuel ou par séparation magnétique (Thomassin, 2005). Il est donc possible que cette anomalie en fer soit ponctuelle et engendrée par une défaillance occasionnelle lors d'une de ces deux types opérations ;
- les teneurs totales Au+Ag+Cu+Hg des copeaux de l'échantillon B5 produits à Saint-Élie sont comprises entre 96 et 98 %. De nouvelles analyses à la microsonde électronique seront nécessaires pour déterminer les éléments manquants ;
- l'échantillon A8bis ne s'aligne pas non plus sur la droite de corrélation linéaire Ag en fonction de Au (Figure 72 B) mais sur la droite de corrélation linéaire Ag+Cu en fonction de Au (Figure 72 C). Les copeaux de cet échantillon sont très riches en cuivre comme l'illustre le graphique $f(\text{Au \%}) = \text{Cu \%}$ (Figure 72A). La grande quantité de cuivre présente dans ces copeaux n'explique cependant pas leur couleur grise décrite dans la partie observations microscopiques.



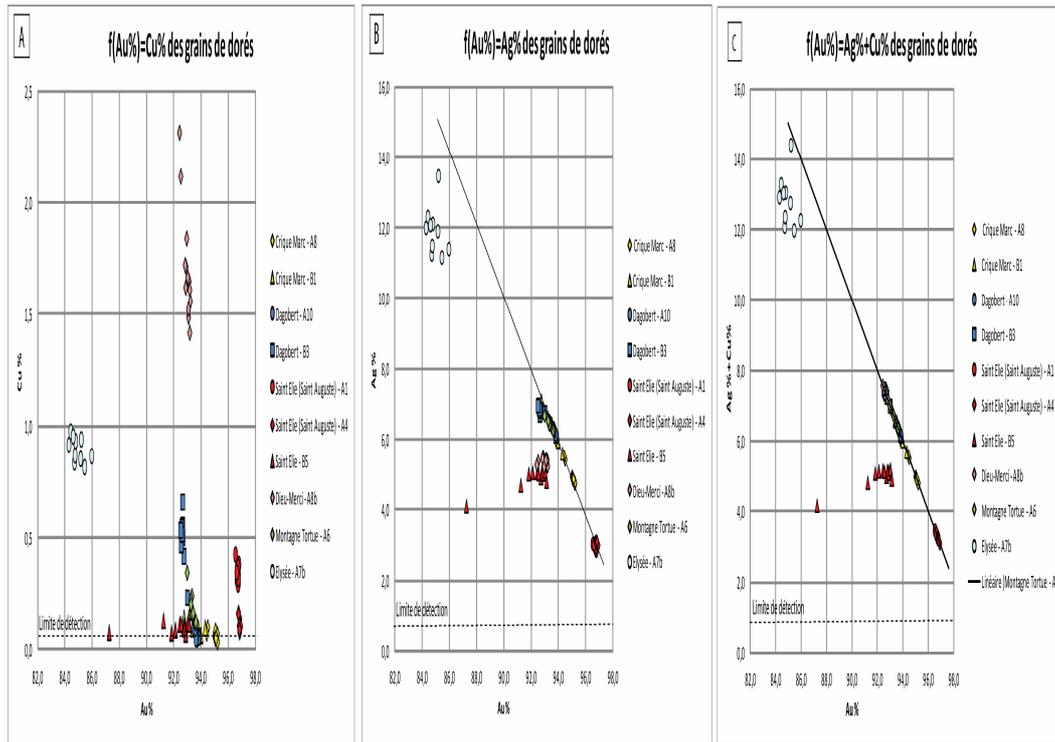


Figure 72 : Graphiques illustrant la variation des teneurs en cuivre (graphique A), en argent (graphique B) et en Ag+Cu (graphique C) en fonction des teneurs en or dans des copeaux de dorés provenant de Crique Marc, Dagobert, Saint-Élie (Saint-Auguste), Saint-Élie, Dieu-Merci, Montagne Tortue, Élysée. La corrélation linéaire Ag+Cu en fonction de Au sur le graphique C permet de mettre en évidence les échantillons ne contenant pas de l'or, de l'argent ou du cuivre.

Les grains du Surinam

Les grains provenant du Surinam contiennent en moyenne 0,92 % de mercure et jusqu'à 9,68 %. Ils ne contiennent pas ou peu de cuivre (Figure 73A).

Les teneurs en or et en argent ne permettent de caractériser que les échantillons S1 et S2 car les teneurs en ces éléments des autres échantillons sont trop variables. L'échantillon S1 est défini par des teneurs en or comprises entre 88,76 % et 91,38 %. L'échantillon S2 est défini quant à lui par des teneurs en or comprises entre 94,67 % et 96,63 % (Figure 73B). Sur ce graphique les points qui s'éloignent de la droite de corrélation Au-Ag sont ceux caractérisés par des teneurs élevées en Hg.

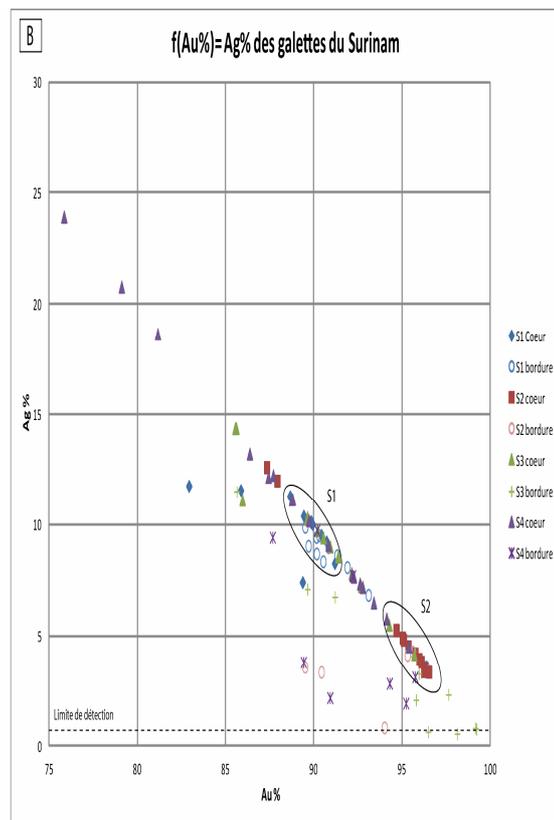
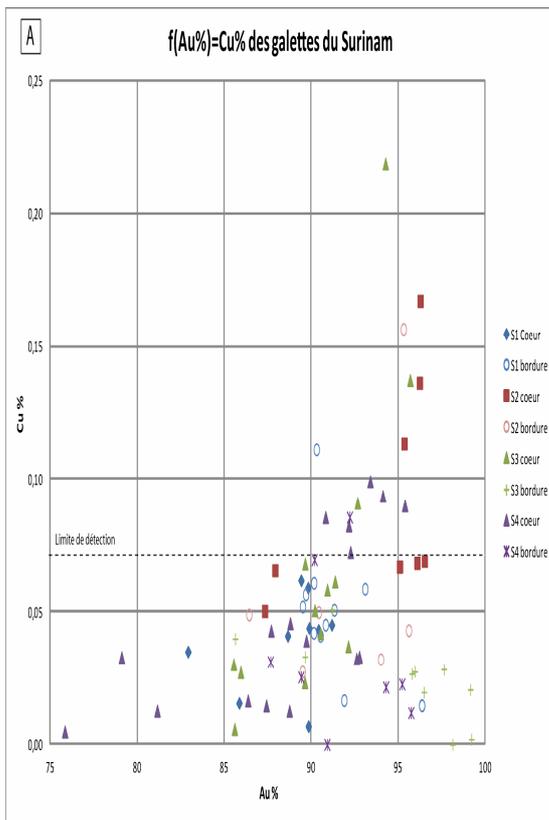
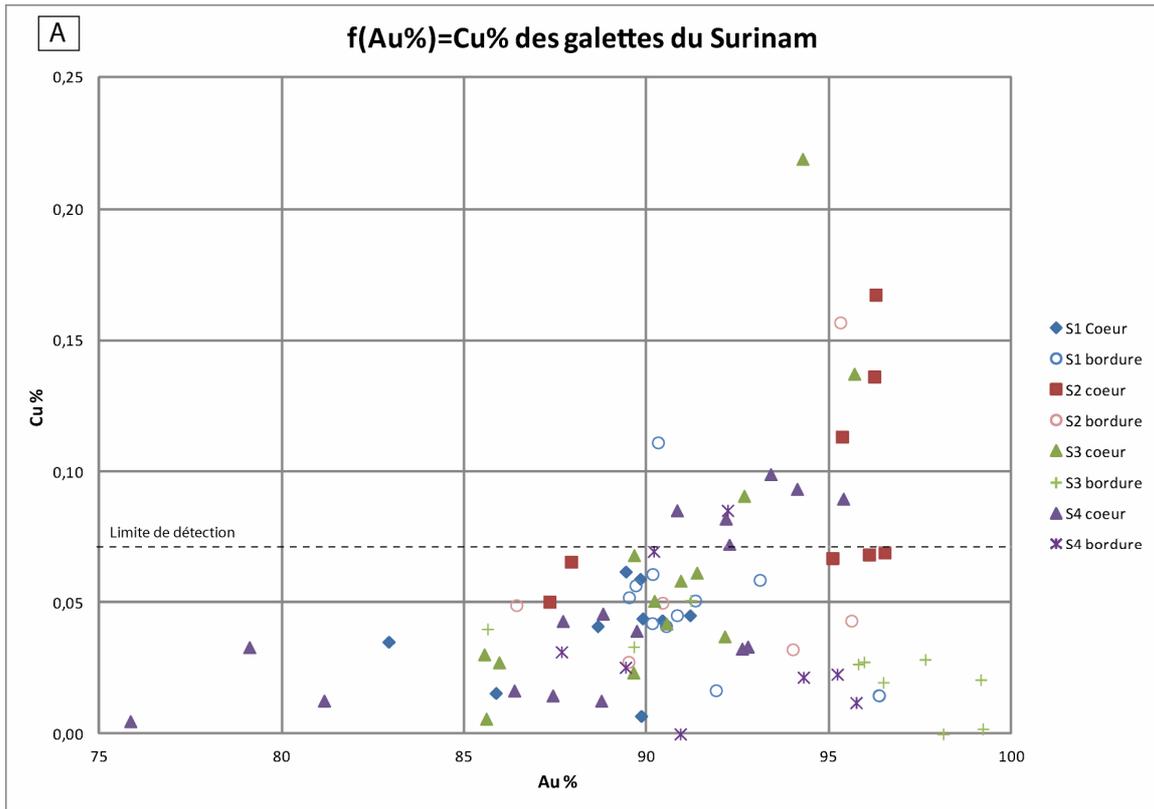


Figure 73 : Graphiques illustrant la variation des teneurs en cuivre (graphique A) et en argent (graphique B) en fonction des teneurs en or dans des galettes provenant du Surinam.

5.6. Conclusion

Cette approche, relativement simple à mettre en œuvre, montre que l'on peut distinguer les provenances des différents dorés, mais également les concentrés primaires des concentrés alluvionnaires, et dans l'essentiel des cas les provenances des différents concentrés. Dans un cas également, on peut retrouver la source primaire d'un concentré alluvionnaire.

L'utilisation de mercure dans le procédé se retrouvera invariablement dans les grains d'or. C'est le cas des concentrés du Suriname. Aucune trace de mercure n'a en revanche été détectée dans les échantillons de Guyane.

6. Analyse des grains d'or par ICP/MS

Les échantillons de concentré ont été sélectionnés pour tester leur signature isotopique en plomb. Les échantillons de doré ont été écartés compte-tenu de la présence dans ces derniers de nombreuses micro-inclusions de minéraux plombifères probablement liées à l'introduction de plomb, sous forme de plombs de chasse.

L'analyse isotopique nécessite au préalable une mise en solution des grains d'or et le dosage du plomb dans les concentrés. La masse d'échantillon nécessaire à cette analyse est de l'ordre de 100 mg. Il est nécessaire que le concentré soit le plus pur possible. Dans un premier temps, nous avons réalisé une séparation très fine à la main sous loupe binoculaire des grains avant leur mise en solution, afin d'éviter toute contaminations par des sulfures notamment. De plus les grains présentant des inclusions d'autres minéraux ont dû être écartés. Ensuite différentes attaques chimiques ont été réalisées afin d'éliminer un maximum d'impuretés présentes en bordure des grains.

Les grains d'or ainsi nettoyés ont ensuite été mis en solution (protocole décrit dans le paragraphe 8.1.2) et les solutions obtenues ont été analysées en ICP/MS pour or (Au), argent (Ag), bismuth (Bi), cadmium (Cd), cuivre (Cu), fer (Fe), plomb (Pb), platine (Pt), antimoine (Sb), tellure (Te), thorium (Th), thallium (Tl), uranium (U) et zinc (Zn), éléments classiquement analysés dans la littérature. Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau 2. Les teneurs en argent sont données à titre indicatif et sont vraisemblablement sous estimées en raison d'une précipitation de chlorure d'argent (AgCl) lors de la mise en solution par attaque acide des grains d'or.

Ce type d'analyse, contrairement aux analyses microsondes n'est pas ponctuel, et permet d'avoir accès à des limites de détection bien plus basses. On a cependant tenté des corrélations entre les deux méthodes.

La perte d'Ag dans les solutions pour ICP/MS explique sans doute l'absence de corrélation entre les teneurs en argent obtenues à la microsonde et en géochimie ICP/MS. En revanche une relativement bonne corrélation est observée entre les teneurs en Au et Cu obtenues par ces deux méthodes même si, dans les deux cas, la droite de corrélation obtenue s'éloigne relativement d'une droite de pente 1 (Figure 74).

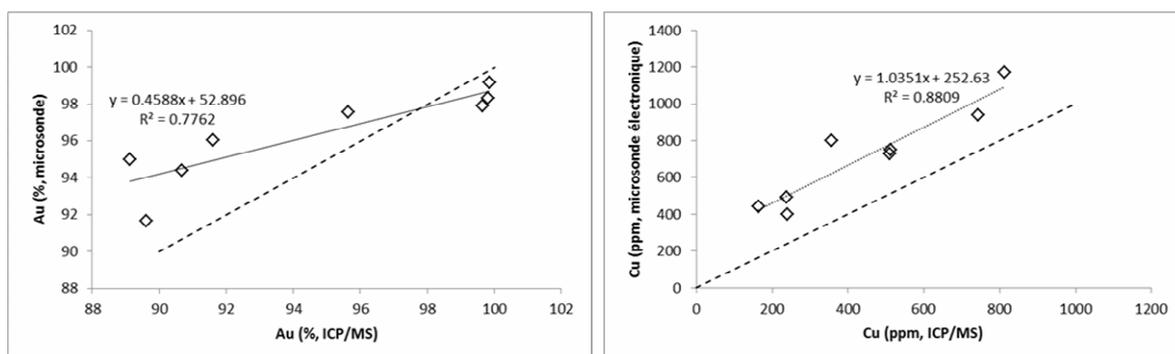


Figure 74 : Corrélation des teneurs en Au et Cu obtenues à la microsonde électronique et en ICP/MS. La droite en pointillés matérialise une corrélation parfaite entre les deux techniques.

Éch	Au	Ag	Bi	Cd	Cu	Fe	Pb	Pt	Sb	Te	Th	Tl	U	Zn
	%	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
A2	99,81	358,79	23,52	1,17	812,56	51,11	2,40	0,00	0,13	14,72	0,14	0,00	0,00	1,00
A3	99,85	73,50	5,49	1,03	742,38	27,54	0,30	0,00	0,64	8,24	0,15	0,00	0,00	0,75
A5	91,61	123,59	0,90	0,41	238,95	63,74	8,41	0,00	2,16	0,96	0,26	0,00	0,00	1,35
A7	99,65	164,25	6,90	0,31	355,46	79,88	9,71	0,00	0,19	6,16	0,16	0,01	0,01	1,00
A9	89,14	224,98	7,03	0,10	512,04	47,49	7,61	0,14	0,19	7,00	0,00	0,00	0,00	1,60
B2	95,64	74,41	1,66	0,28	509,37	19,65	0,39	0,00	0,02	1,15	0,00	0,00	0,00	0,58
S3	90,69	101,11	1,61	0,16	238,69	14,16	217,24	0,00	6,14	3,19	0,00	0,00	0,00	2,51
S4	89,62	70,03	1,81	0,15	163,73	57,13	28,08	0,00	0,53	1,56	0,00	0,01	0,01	1,39

Tableau 2 : Analyses géochimiques par ICP/MS des grains d'or des concentrés testés en isotopie du plomb.

Concernant les teneurs en Au et Ag obtenues en ICP/MS, quatre échantillons montrent une corrélation positive (A2, A5, S3 et S4) Cette corrélation est cependant fortuite car il est très probable qu'une fraction de l'Ag a précipité sous forme de chlorures. Les quatre autres échantillons s'éloignent significativement de cette droite de corrélation, A9 caractérisé par des teneurs très faible en Au, contrairement à A3, A7 et B2 très riches en Au (Figure 75a).

Une corrélation positive est observée entre Bi et Te en accord avec la présence d'inclusions de tellures de bismuth observés au MEB dans les grains d'or (Figure 75b). Une corrélation positive de moins bonne qualité est également observée entre Cu et Te alors qu'aucune inclusion CuTe n'a été identifiée (Figure 75c). Cu et Zn sont globalement anti-corrélés (Figure 75d). Aucune autre corrélation n'a été mise en évidence entre les différents dosés (Figure 75e, f, g, h).

Le diagramme le plus discriminant pour tracer la provenance des échantillons semble être Te versus Cu dans lequel les districts de provenance des différents concentrés sont bien individualisés (Figure 75c). Les concentrés du district de Saint-Élie montrent les teneurs les plus élevées en Cu et Te, ceux du district de Saül (Crique Marc et Dagobert) sont caractérisés par des teneurs inférieures et ceux du Surinam (S3 et S4) et de Régina (A5, Montagne Tortue) montrent les teneurs les plus faibles. Les mêmes regroupements sont observés sur le diagramme Zn versus Cu dans lequel les concentrés de Saint-Élie montrent les teneurs les plus élevées en Cu et les plus faibles en Zn (Figure 75d).

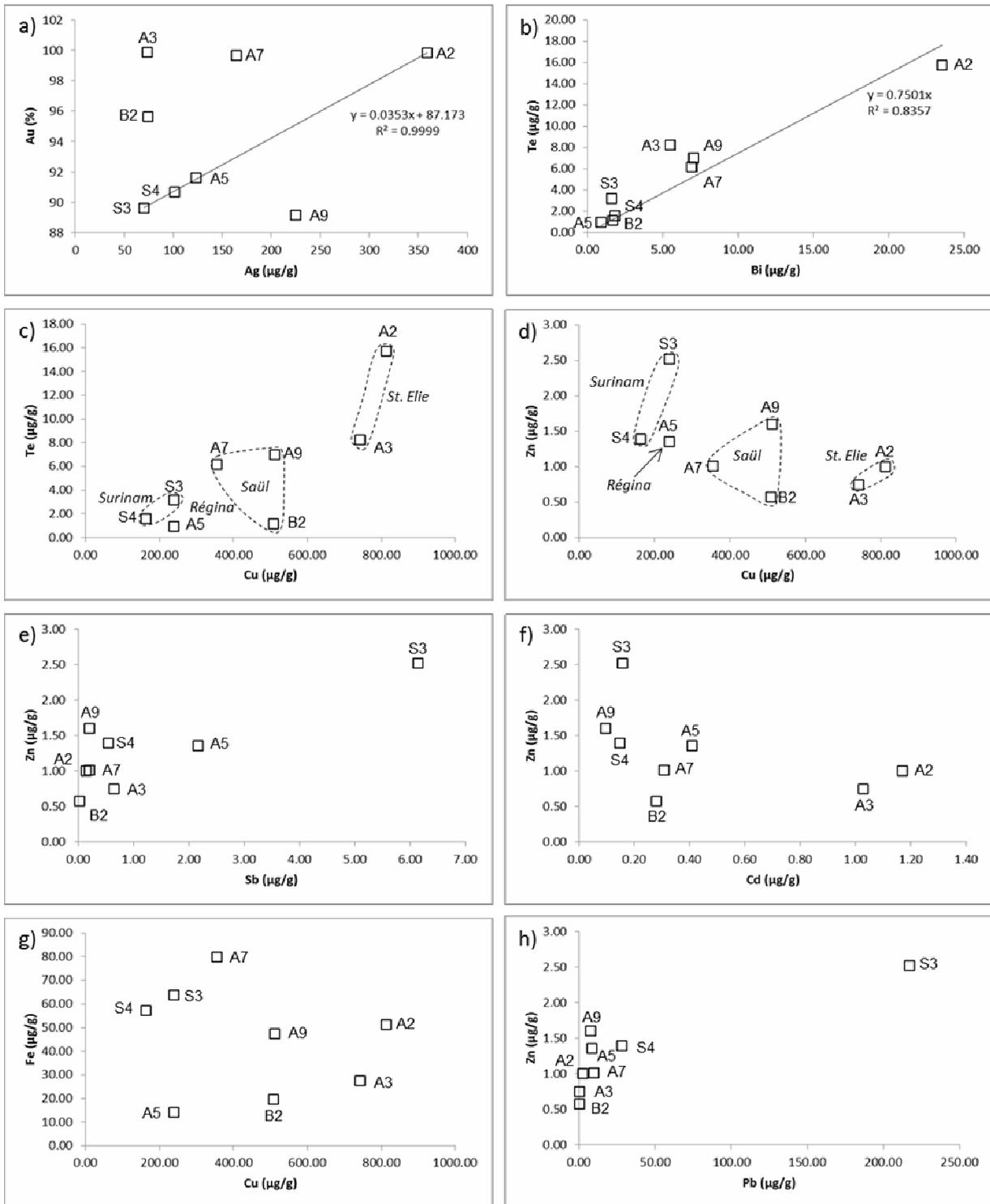


Figure 75 : Diagrammes de représentation des analyses ICP/MS des grains d'or sélectionnés pour l'analyse isotopique.

7. Analyses des grains d'or par ablation laser (LA-ICP-MS)

7.1. *Présentation de l'ablation laser couplée à un spectro-mètre de masse plasma (LA-ICP-MS)*

Ces analyses ont été réalisées au laboratoire Geosciences Montpellier à l'Université Montpellier 2. L'ingénieur responsable du spectromètre de masse plasma est Olivier Bruguier.

Les analyses ont été réalisées sur un spectromètre de type Finnigan. La fréquence du laser a été fixée à 5 Hz. Le diamètre des spots est déterminé en fonction de la taille des grains. Le diamètre utilisé préférentiellement est de 77 µm car c'est le diamètre donnant les meilleures analyses sur ce spectromètre. Certains copeaux ont dû être analysés avec un diamètre de 51 µm ou 26 µm car ils n'étaient pas assez larges pour être ablatés avec un faisceau de 77 µm. 6 à 14 grains avec une majorité de 10 grains par échantillon ont été analysés. Tous les échantillons fournis ont été analysés en 5 postes de travail d'une journée.

Les standards suivants ont été choisis : MASS1 (sulfure), JK37 (acier), Po726 (sulfure) et NIST612 (silicate). L'utilisation de plusieurs standards est nécessaire car ils sont complémentaires pour analyser tous les éléments sélectionnés. Nous avons également recherché à utiliser des standards ayant des matrices différentes (sulfurée, métallique et silicatée) pour savoir quelle matrice était la plus adaptée pour analyser de l'or en LA-ICP-MS. Les standards servent dans un deuxième temps à convertir le nombre de coups par seconde (cps) reçus par le spectromètre de masse en ppm à partir d'un élément commun à un standard et à l'or et dont la teneur est connue dans chaque grain d'or. Ainsi à partir de cet élément sélectionné comme standard interne, la méthode permet théoriquement de calculer la concentration des autres éléments. Nous avons donc testé différents couples éléments/standard pour tester la méthode : Cu/MASS, Ag/MASS, Hg/MASS, Au/Po726, Cu/JK37, Cu/NIST. Cependant aucun des couples éléments/standard testés ne nous a permis d'obtenir des concentrations exploitables : on constate que les valeurs mesurées en LA-ICP-MS montrent une différence supérieure à 10 % par rapport à celles déterminées à la microsonde électronique ou par rapport aux valeurs connues des standards, elles sont même dans la majorité des échantillons 2 à 3 fois inférieures ou supérieures aux données validées. Il n'a donc pas été possible d'exploiter quantitativement les données obtenues en LA-ICP-MS. De telles différences entre les données obtenues à la microsonde et celles obtenues en LA-ICP-MS peuvent être dues à un effet de matrice entre les échantillons et les standards. Les standards utilisés sont soit des sulfures (Po726 et MASS1), soit un alliage métallique (acier JK37). L'absorption du faisceau laser par les échantillons d'or d'une part et par les standards utilisés d'autre part est très différente, ce qui peut expliquer les différences observées. Par ailleurs, les standards utilisés ont des teneurs en Au, Ag, Cu et Hg très différentes de celles connues dans les grains d'or (voir tableau ci-dessous).

	Au	Ag	Cu	Hg
MASS1	0 ppm	50 ppm	134000 ppm	57 ppm
Po726	30 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm
JK37	0 ppm	0 ppm	9360 ppm	0 ppm
Or	820000 à 1020000 ppm	712 à 215000 ppm	315 à 23610 ppm	<1900 ppm

Une analyse quantitative est impossible avec ces standards. Cependant une étude qualitative reste possible à partir des intensités en coups par seconde. Les intensités de chaque élément ont été convertie en indice Gold Normalized Intensity (GNI) suivant la formule :

$$\text{GNI} = \frac{\log\left(\frac{I_e}{I_g} \times 10^{n-1}\right)}{n - 1} \times 100\% \quad (\text{Zhongxing Chen, 1997})$$

Où I_e est l'intensité de l'or mesurée en coups, I_g l'intensité de l'élément sélectionné en coups. L'intensité de l'or étant de l'ordre de 1.10^7 coups ainsi $n=7$.

7.2. Résultats

7.2.1. Traitement des résultats par éléments

Les teneurs en S

La technique d'ICP/MS par ablation laser permet de distinguer deux isotopes du soufre S^{33} et S^{34} . Ces deux éléments sont corrélés positivement mais il n'apparaît pas possible de distinguer les concentrés des dorés des différents sites sur la base des teneurs en S^{33} et S^{34} , tous les échantillons montrant la même variation de teneurs (Figure 76a). La même observation peut être faite pour les galettes du Surinam.

Les teneurs en Cd et Zn

Pour le cadmium comme pour le soufre, deux isotopes sont distingués Cd^{111} et Cd^{112} . Les teneurs en Cd des dorés montrent une corrélation positive mais ne sont pas discriminantes pour distinguer efficacement leur provenance (Figure 76b). Seul l'échantillon B5 (St. Elie) se distingue par des teneurs plus élevées. Les teneurs en Cd des concentrés sont trop aléatoires pour être discriminantes. Zn et Cd ayant un comportement géochimique voisin, un diagramme binaire corrélant ces deux éléments a été dessiné pour les dorés (Figure 76c). La plupart des dorés montrent une même variation des teneurs en Cd^{111} , à l'exception de B5 (Saint-Élie) nettement plus riche en Cd^{111} . En revanche, ces échantillons se distinguent au niveau de leur « teneur » en Zn. Le doré de Crique Marc est le plus pauvre tandis que les échantillons de Saint-Élie se divisent en trois groupes (Figure 76d).

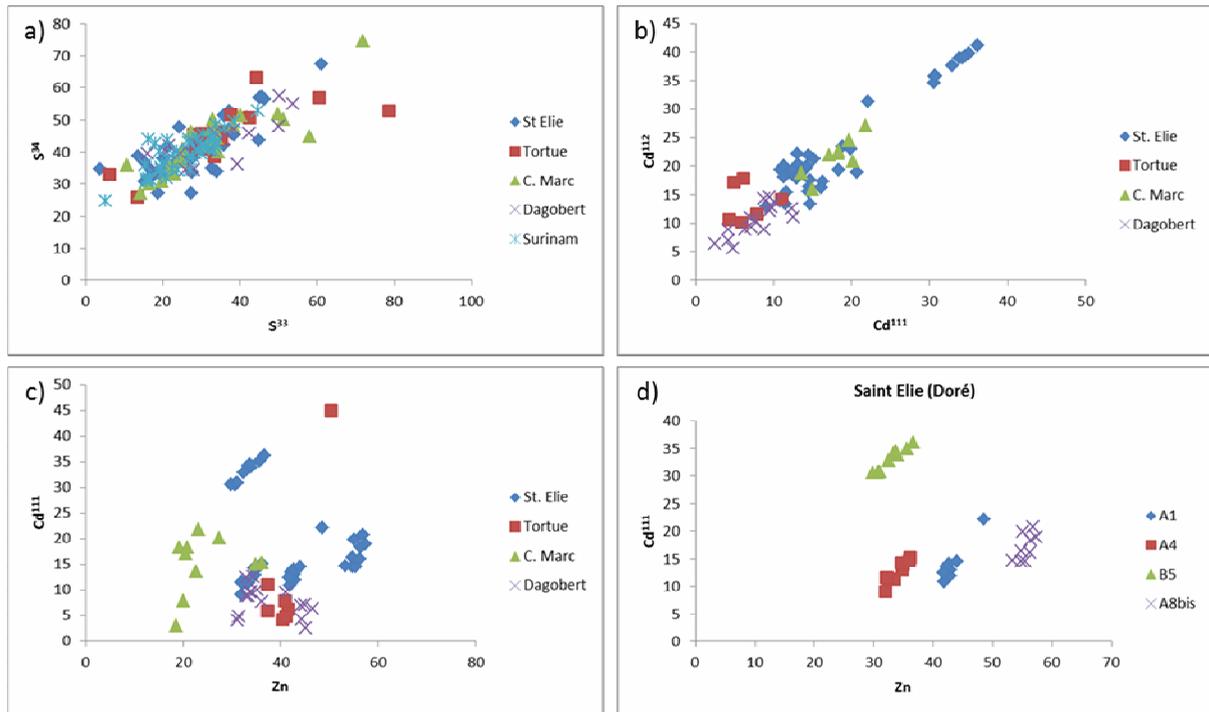


Figure 76 : Diagrammes de corrélation binaire pour les dorés des différents sites.

Les teneurs en Bi, Pb et Te

Les résultats des teneurs relatives en Bi et Pb permettent de bien différencier les concentrés des dorés. En effet pour chacun des sites, les « teneurs » en Bi et Pb des dorés sont systématiquement plus élevées que celles des concentrés (Figure 77). Les dorés contiennent de fréquentes micro-inclusions d'alliages contenant du plomb. Ces inclusions sont moins fréquentes dans les concentrés mais peuvent être également présentes. Malgré les précautions prises lors des analyses en ablation laser, il est possible que certains points d'analyse correspondent à l'analyse combinée du grain d'or et de micro-inclusions non visibles à la surface du grain. C'est par exemple le cas pour un point d'analyse de concentré du site de Tortue qui montre des teneurs en Pb identiques à celle des grains du doré.

Il ne semble pas possible de distinguer les concentrés les uns des autres sur la base de leurs « teneurs » en Bi et Pb (Figure 77). Les échantillons du Surinam sont également caractérisés par des « teneurs » en Pb et Bi voisines de celles des concentrés des sites guyanais. En revanche, il apparaît que les échantillons de doré sont caractérisés à la fois par des rapports Bi/Pb constant au sein d'un échantillon et des teneurs en Bi très différentes (Figure 77f). Les dorés de St. Elie se distinguent également par des teneurs en Pb plus importantes que celles autres sites. Il semble donc possible d'utiliser le rapport Bi/Pb et les teneurs en Bi pour distinguer la provenance des dorés.

Bi versus Te montrent une bonne corrélation positive et il est possible de distinguer la plupart des dorés les uns des autres, Tortue, Crique Marc et Saint Elie, montrant dans cet ordre une augmentation croissante des teneurs en Bi et Te. Seul l'échantillon A4 provenant de Saint-Élie montre un recouvrement avec Crique Marc (Figure 77g & h).

À ce stade de l'étude, il n'est pas possible de distinguer la provenance des concentrés sur la base des éléments en trace détectés en ICP/MS-LA.

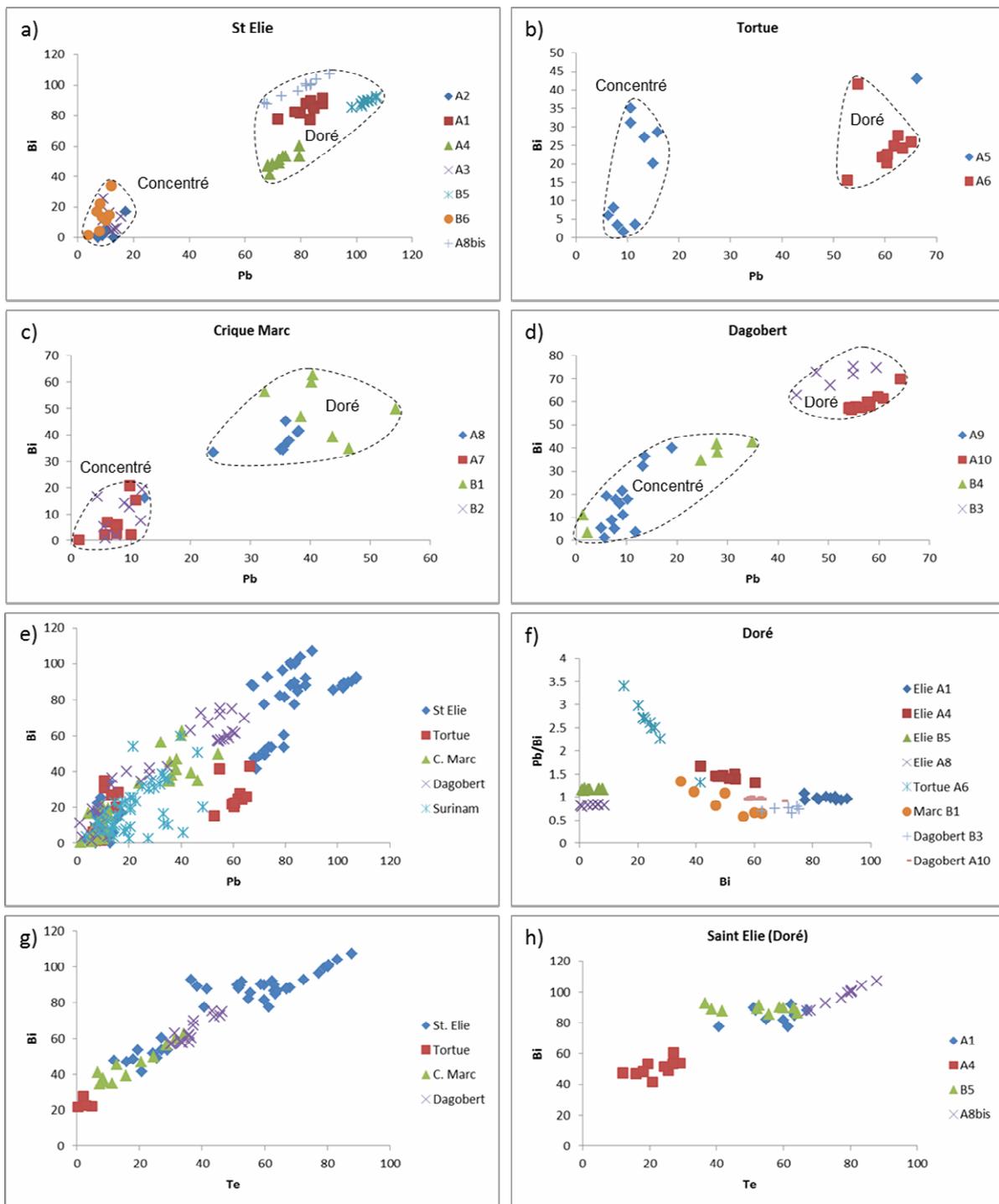


Figure 77 : Diagramme de corrélation Bi versus Pb pour les concentrés et les dorés des différents sites (a à e) et Pb/Bi versus Bi (f) et Bi versus Te pour les dorés (g à h).

7.2.2. Traitement des résultats par lieu d'extraction

On peut également constater que les spectres des dorés, des concentrés de Guyane et des galettes du Surinam ont des allures caractéristiques. Ainsi l'étude d'un spectre peut nous permettre de dire si l'échantillon est un concentré, un doré de Guyane ou un échantillon du Surinam.

Les échantillons contiennent tous (sauf cas les particuliers cités ci-dessus) Bi, Pb, Tl, Hg, Pt, Sb, Sn, Cd¹¹², Cd¹¹¹, As, Zn, Cr, S³⁴, S³³ et Si²⁹. Dans les concentrés, les intensités de ces éléments sont très faibles et sont généralement inférieures à 10 GNI. Seul le mercure a une intensité généralement égale 60 GNI. Les dorés contiennent en plus Te, Se, Ni⁶², Fe et Ca. Ces échantillons se caractérisent par des indices très élevés égaux à 50 GNI en Pb et Bi, 40 GNI en Zn, 30 GNI en As, 20 GNI en Te et Sb. Les échantillons du Surinam contiennent plus d'éléments que les concentrés mais leurs indices évoluent entre ceux d'un concentré et ceux d'un doré (Figure 78).

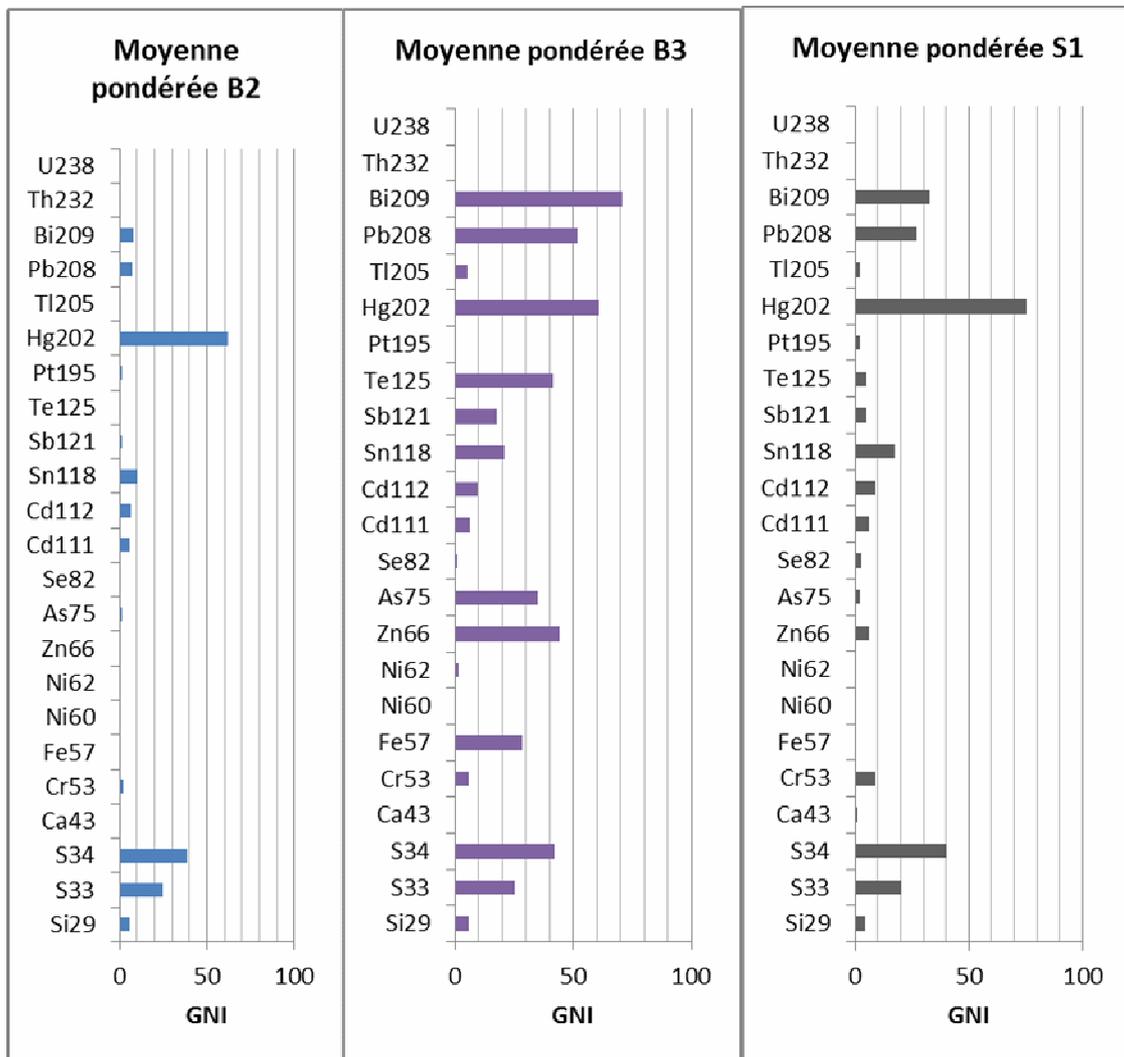


Figure 78 : Spectres des Gold Normalized Intensity (GNI) des grains du concentrés B2, du doré B3 et des galettes du Surinam S1 caractéristiques des échantillons de concentrés, de dorés de Guyane et des galettes du Surinam.

Notons que tous les spectres de concentrés, de dorés de Guyane et des galettes du Surinam se ressemblent chacun dans leur type. Cependant Il est possible d'observer quelques différences parmi ces types :

- l'échantillon A7 est le seul concentré à contenir du Te,
- l'échantillon B6 est le seul concentré à ne contenir quasiment pas de Si,
- l'échantillon S3 est le seul du Surinam à ne pas contenir de Zn
- l'échantillon A9 est le seul échantillon parmi tous les échantillons analysés à ne pas contenir de Cd¹¹².

Ainsi il est possible d'apporter quelques informations complémentaires pour différencier les échantillons A9, A7, B6 et S3 à partir des GNI (Figure 79).

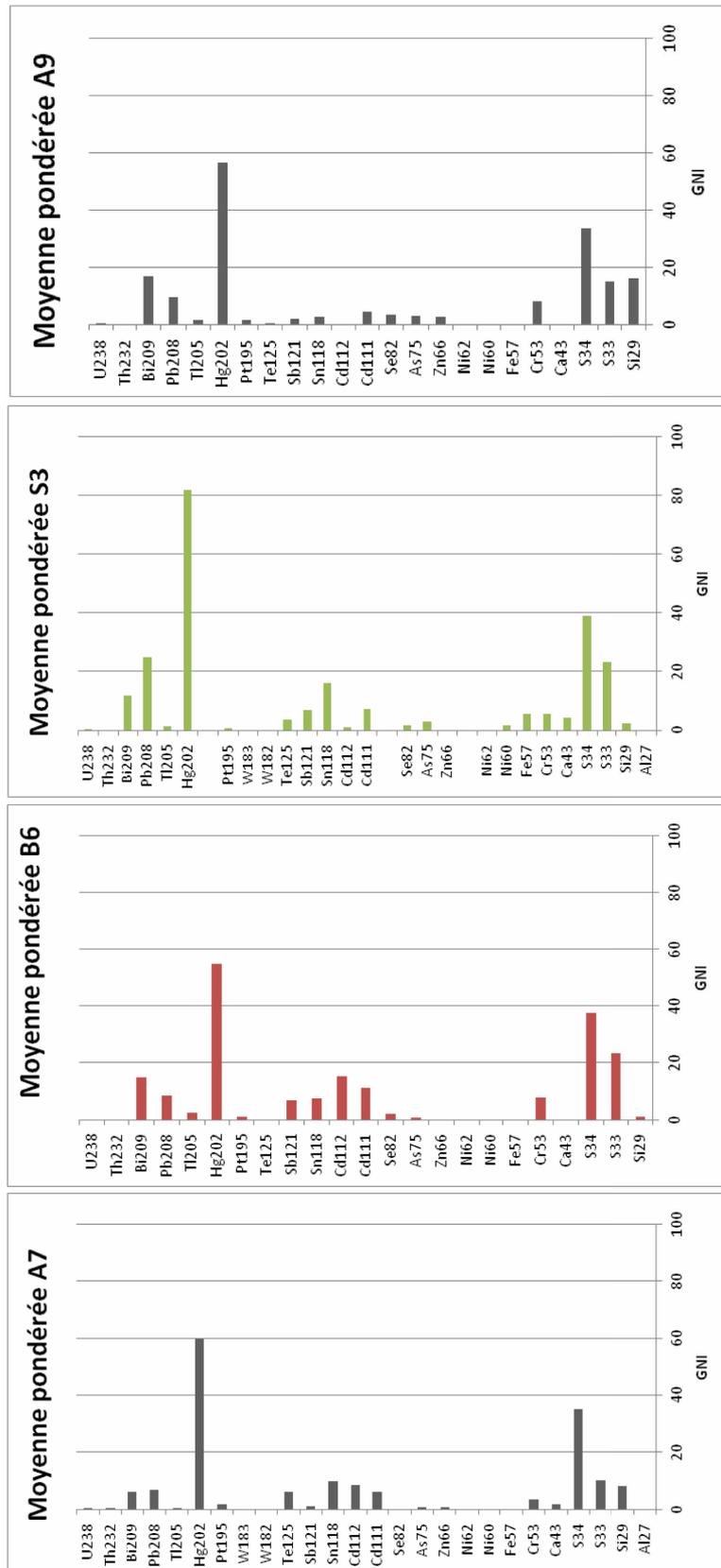


Figure 79 : Spectre GNI des échantillons A7, B6, S3 et A9.

7.2.3. Limite de la méthode

Il est difficile de trouver des points communs entre les échantillons d'un même site car tous les spectres se ressemblent. Il est uniquement possible de dire si un échantillon est un concentré de Guyane, un doré de Guyane ou une galette du Surinam.

Il est impossible d'identifier avec certitudes les inconnus. L'échantillon X4 est un cas extrême puisqu'il ne contient pas de Pb alors que tous les échantillons en contiennent minimum 7 GNI. Cette impossibilité d'identifier les échantillons inconnus ne peut être expliquée par la variabilité du spectromètre de masse lors des mesures car les grains sélectionnés des échantillons A6 et A10 ont été analysés une deuxième fois à 24h d'intervalle et présentent les mêmes spectres. Cette différence pourrait être expliquée par une importante variabilité de composition en éléments traces entre les grains d'un même échantillon.

7.3. *Corrélation entre la méthode ICP-MS et LA-ICP-MS*

Les analyses ICP-MS révèlent la présence de Fe dans les échantillons A2, A5, A7, A9, B2 et S4, or les analyses LA-ICP-MS ne décèlent pas la présence de ces éléments dans ces échantillons. La présence de fer dans les analyses ICP-MS pourrait être due à une contamination en Fe provenant d'une ou des micro-inclusion(s) d'oxyde de fer ou de sulfure de fer lors de la dissolution de l'or.

Les analyses ICP-MS montrent une grande variabilité en Cu entre les différents échantillons allant de 163,73 ppm à 812,56 ppm or le GNI du Cu obtenu par LA-ICP-MS a une très faible variabilité puisqu'il est compris entre 36,16 GNI et 49,80 GNI.

8. Géochimie isotopique du plomb

8.1. *Résultats d'analyses isotopiques du plomb commun sur des concentrés d'or de Guyane et du suriname*

8.1.1. **Échantillons**

Les rapports isotopiques du plomb commun ont été analysés sur six échantillons de concentré d'or (primaire, éluvionnaire et alluvionnaire) provenant de Guyane et deux provenant du Surinam afin de vérifier l'existence d'une signature isotopique propre à chaque site et/ou à chaque typologie d'échantillon.

Les dorés n'ont pas été analysés à cause de la présence de Pb d'origine anthropique.

Les échantillons sélectionnés proviennent de Guyane et du Surinam (Figure 80) et sont décrits dans le Tableau 1.

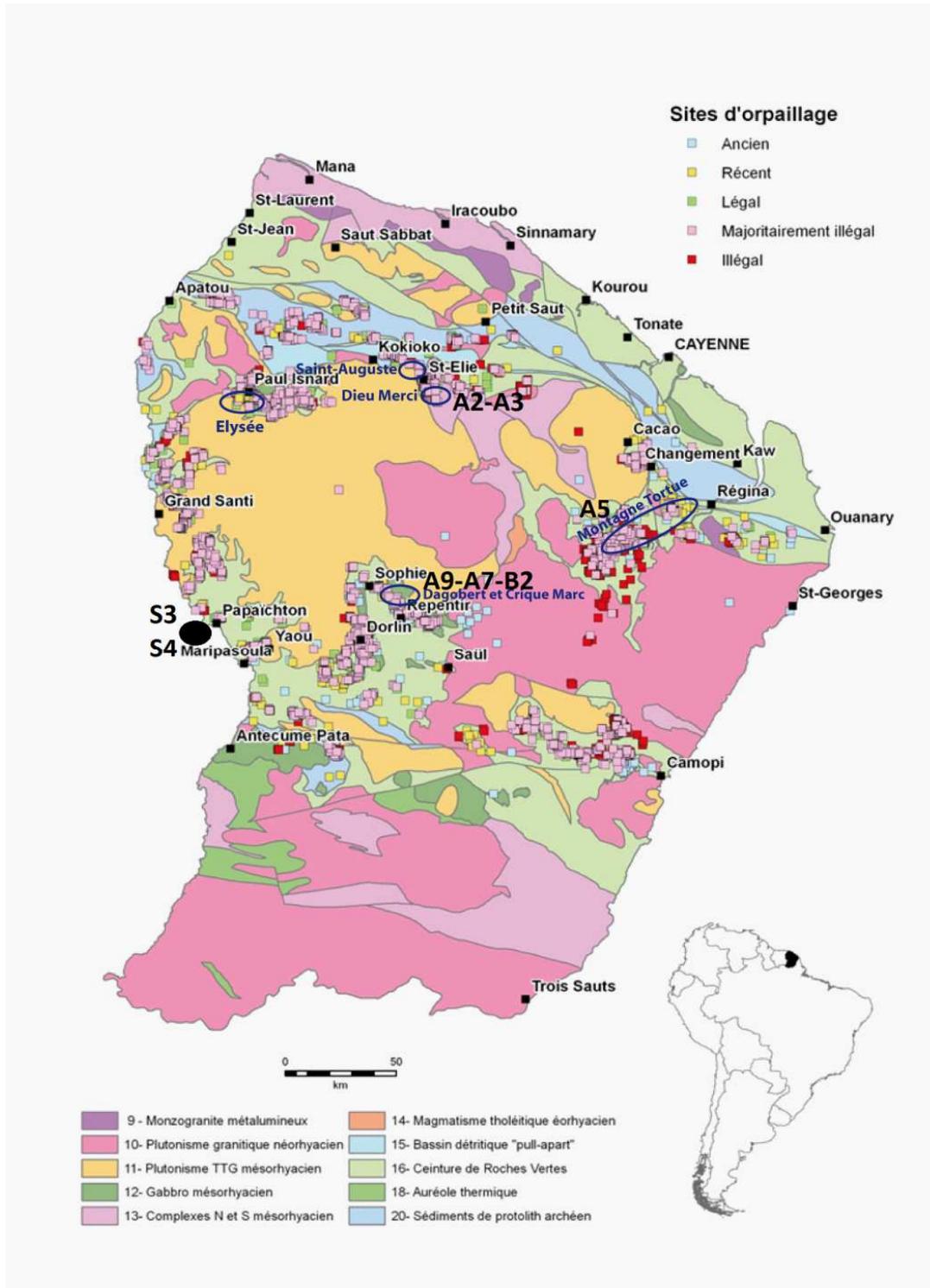


Figure 80 : Localisation des échantillons analysés pour les isotopes du plomb.

Éch	Site (lieu-dit)	Commune	Exploitant	Origine	Type	Observation
A2	Saint-Élie (Saint-Auguste)	Saint-Élie	SMSE	primaire	concentré	Mélange hétérogène, or, silicates, sulfures, oxydes, hydroxydes. Or en paillettes ou grains souvent entremêlés avec d'autres minéraux.
A3	Saint-Élie (Saint-Auguste)	Saint-Élie	SMSE	éluvionnaire	concentré	Pépites d'or pouvant contenir des silicates, des oxydes ou hydroxyde. État de surface assez propre.
A5	Montagne Tortue	Régina	Mydas (Costa)	alluvionnaire	concentré	Mélange hétérogène, or, silicates, sulfures, oxydes, hydroxydes. Or en petits grains aplatis souvent entremêlés avec d'autres minéraux. Hydroxydes en surface.
A7	Crique Marc	Saül	Ermina	alluvionnaire	concentré	Paillettes ou pépites relativement propres
A9	Dagobert	Saül	Ermina	primaire	concentré	Or très fin en mélange avec silicates, sulfures, oxydes. Quelques grains mixtes. État de surface propre.
B2	Crique Marc	Saül	Ermina	alluvionnaire	concentré	Grosses pépites aplaties finement entremêlées avec des oxydes, des silicates, des hydroxydes (±sulfures ?). Nettoyage difficile. Sélection de petits grains
S3	Pois-é	Benzdorp	chantier indépendant	alluvionnaire a priori	galette	Grosses galettes d'or amalgamé, intégrant d'autres minéraux (silicates, oxydes, etc.). Nettoyage difficile, sélection manuelle des grains les plus propres en surface.
S4	Benzdorp (à quelques centaines de mètres du bourg)	Benzdorp	chantier indépendant	alluvionnaire	galette	Grosse galette d'or amalgamée, intégrant d'autres minéraux (silicates, oxydes, etc.) mais en moindre quantité que S3. Nettoyage difficile. Galette écrasée et sectionnée, sélection de petits morceaux les plus propres possible.

Tableau 3 : Description des échantillons (voir photos Figure 81).

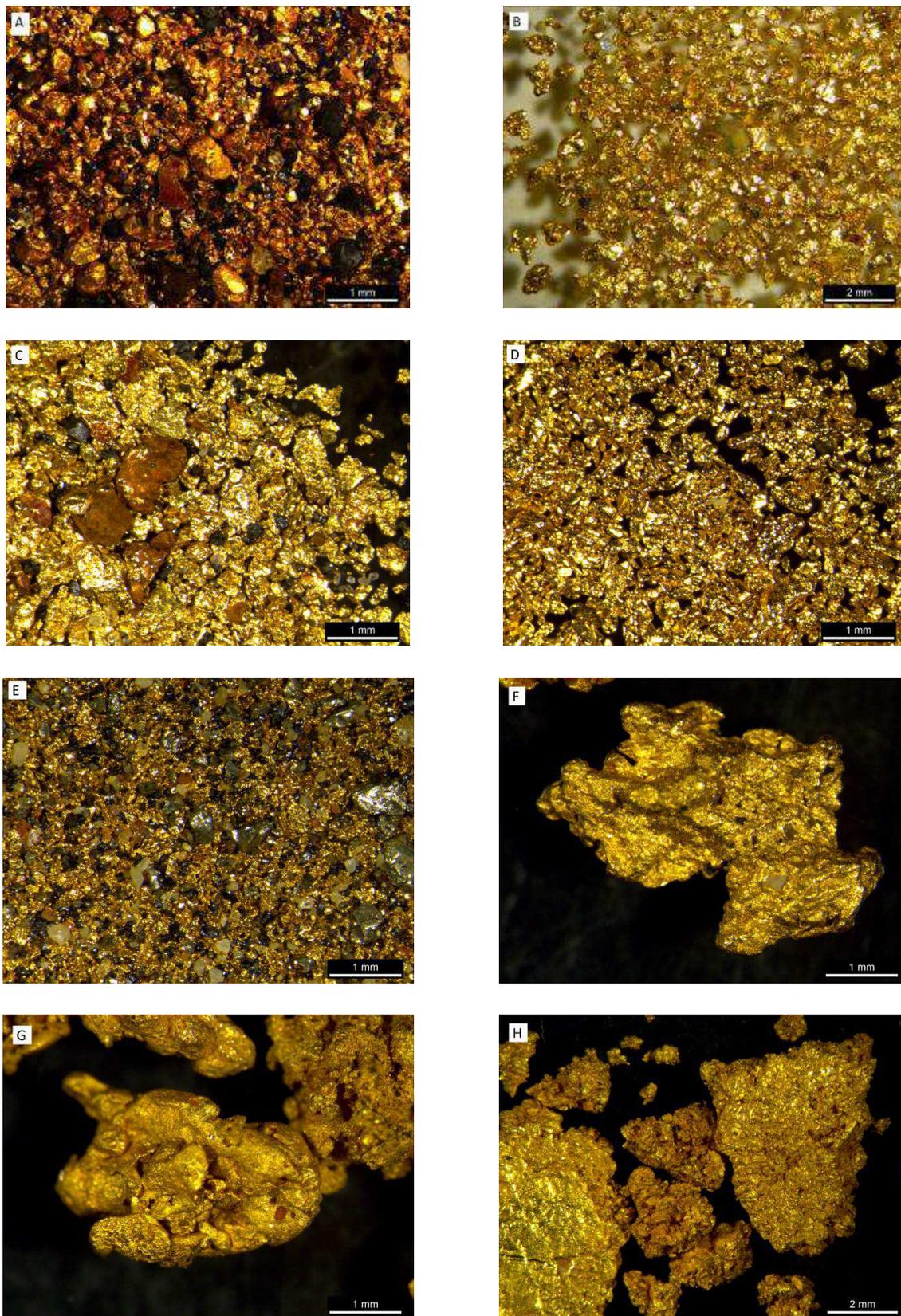


Figure 81 : Concentrés d'or (A : A2 ; B : A3 ; C : A5 ; D : A7 ; E : A9 ; F : B2 ; G : S3 ; H : S4).

8.1.2. Méthode analytique

Les préparations et purifications (si nécessaire) sont effectuées en salle blanche et les produits utilisés sont tous de qualité suprapure ou purifiés par subboiling dans nos laboratoires.

Les concentrés ont été examinés sous loupe binoculaire, et un nettoyage manuel a été réalisé afin d'éliminer toutes les impuretés visibles (silicates, sulfures, oxydes, métaux, etc.). Environ 100 mg ont été utilisés par échantillon. Afin d'éliminer les hydroxydes éventuels, un nettoyage à froid en HCl 8N pendant 1 heure (dont deux fois 15 minutes aux ultrasons) a été effectué. Les échantillons sont ensuite nettoyés à l'eau puis les sulfures éventuels sont mis en solution par un nettoyage en HNO₃ 7N pendant 1 heure à froid (dont deux fois 15 minutes aux ultrasons) puis nettoyés à nouveau à l'eau. Les échantillons d'or sont ensuite mis en solution par 3 ml d'eau régale (¼ HNO₃ 14N + ¾ HCl 8N) en bécher fermé mis sur plaque chauffante à 100 °C pendant 10 jours. Les silicates possiblement piégés dans les grains d'or ne sont pas mis en solution par cette attaque acide, par contre un lessivage partiel peut libérer des éléments chimiques. En cas de présences de sulfures au sein des grains d'or, ces minéraux seront par contre dissous avec l'or.

La solution obtenue est diluée avec de l'eau jusqu'à obtention d'un volume de 50ml. Un précipité blanc d'AgCl insoluble, plus ou moins important se forme, virant au noir au cours du temps.

Une aliquote de cette solution est réservée pour la détermination des teneurs de différents éléments, une autre aliquote est utilisée pour la mesure isotopique.

L'aliquote pour l'isotopie du plomb est évaporée à sec.

Pour cette matrice particulière, trois étapes de purification chimique sont nécessaires :

- les échantillons sont repris en HCl 6N, et chargés sur une colonne contenant de la résine anionique AG1-X8. Le plomb est immédiatement récupéré, l'or reste sur la résine. La solution contenant le plomb est évaporée à sec ;
- la seconde étape consiste en une reprise de l'échantillon en HBr 1N que l'on charge sur une résine AG1-X8, par la suite nettoyée successivement en HBr 1 N puis HCl 2N. La matrice est éluée, le plomb reste sur la résine. Le plomb est récupéré en HCl 6N et évaporé à sec ;
- l'étape finale, après reprise de l'échantillon en HCl 2N se fait également sur résine anionique avec récupération du plomb en HCl 6N. Après évaporation le résidu est repris par 3 gouttes d'HNO₃ 14N et évaporé à nouveau.

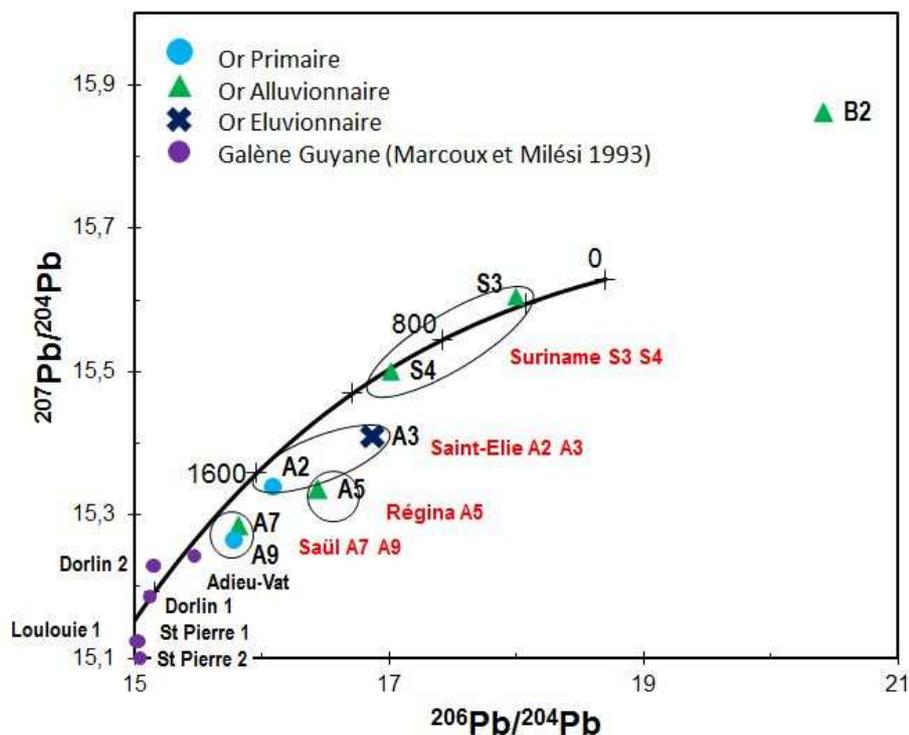
Le résidu, prêt pour l'analyse en spectrométrie de masse est repris par un volume d'H₃PO₄ 0.25N amenant à une concentration en Pb de l'ordre de 50ng/µl. 2µl de cette solution sont chargés sur monofilament de rhénium avec du silicagel et ce filament est porté à 1.3A jusqu'à ce que le dépôt soit sec, puis le courant est augmenté jusqu'à libération des vapeurs de H₃PO₄, et ensuite porté au rouge vif pendant une seconde. L'analyse en spectrométrie de masse s'effectue sur un multicollecteur Finnigan MAT262, muni de 9 cages de Faraday mobiles. L'analyse des 4 masses du plomb est donc effectuée en simultané sur quatre cages de Faraday. 10 blocs de 10 scans sont ainsi mesurés, avec une intensité de l'ordre de 3 à 5 volts sur la masse 208. La précision interne sur la mesure est généralement inférieure à 0.01% (2σ_m) sur tous les rapports. La reproductibilité externe (2σ) est de 0.06% pour le rapport ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, 0.09% pour le rapport ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb et 0.12% pour le rapport ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb. Le fractionnement est de 0.14%/u.m.a. Les résultats pour les échantillons correspondent aux valeurs moyennes corrigées du fractionnement. Les diagrammes ont été construits en utilisant le programme ISOPLOT/EX, version 2.06d (Ludwig, 1999). La courbe d'évolution du plomb commun (Stacey et Kramers, 1975) est utilisée dans certains diagrammes.

8.1.3. Résultats

Les résultats obtenus sur ces échantillons sont reportés dans le Tableau 4.

n° Éch.	Pb µg/g	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
A2	2.40	16.0838	15.3396	35.8848	2.2311	0.9537
A3	0.30	16.8694	15.4101	36.7061	2.1760	0.9135
A5	8.41	16.4381	15.3360	36.0761	2.1947	0.9330
A7	9.71	15.8176	15.2851	35.3255	2.2334	0.9663
A9	7.61	15.7760	15.2658	35.4015	2.2441	0.9677
B2	0.39	20.4143	15.8620	37.8724	1.8552	0.7770
S3	217.24	17.9975	15.6046	37.9575	2.1091	0.8670
S4	28.08	17.0142	15.5003	36.7328	2.1590	0.9110

Tableau 4 : Rapports isotopiques du plomb sur l'or de Guyane et du Surinam.



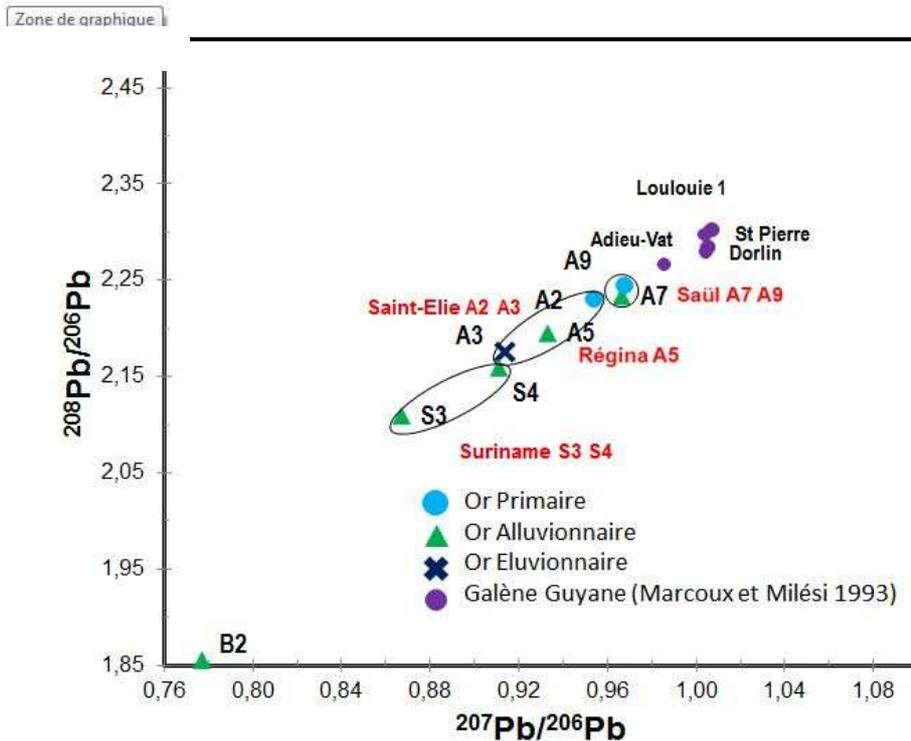
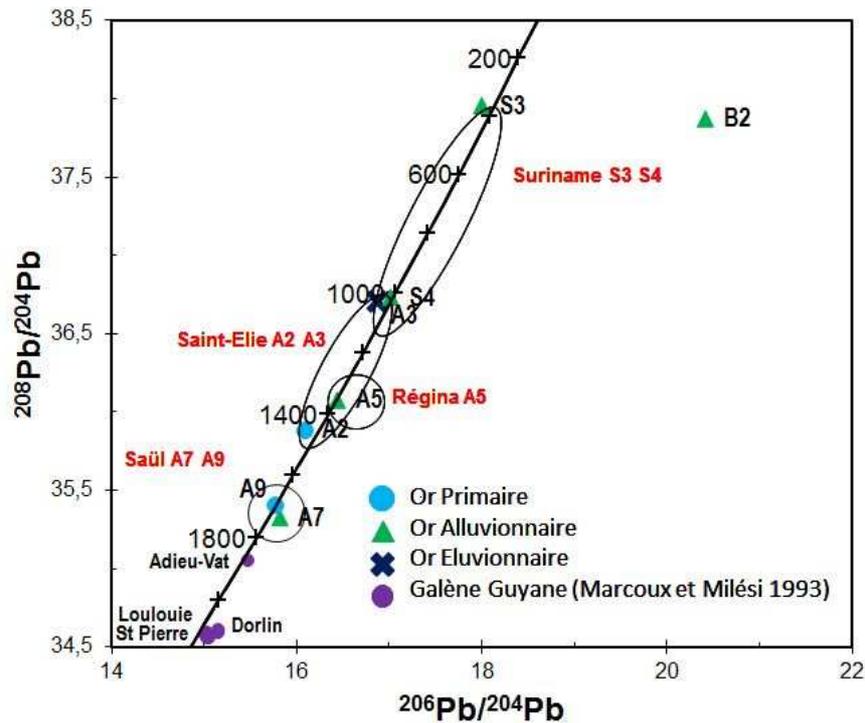


Figure 82 : Compositions isotopiques du plomb des échantillons d'or de Guyane. Sont également reportées les valeurs obtenues sur des galènes de Guyane associées à des gisements d'or (Marcoux et Milési, 1993).

Les rapports isotopiques du plomb obtenus sur ces concentrés d'or sont très variés, allant de relativement peu radiogéniques à très radiogéniques (B2) (Tableau 4). Ces points sont très dispersés dans les différents diagrammes de plomb commun (Figure 82) et plus radiogéniques que des analyses de galènes associées à des gisements d'or guyanais (Marcoux et Milési, 1993).

Les rapports plus radiogéniques des échantillons du Surinam, corrélés à des teneurs en plomb élevées pourrait correspondre à la présence de plomb récent (minéral, fragment métallique, plombs de chasse ?) inclus dans les galettes de concentré, comme observé sur les échantillons bruts, et non accessibles au nettoyage.

Les rapports isotopiques relativement élevés de l'échantillon B2, associés à une faible teneur en plomb suggèrent soit une évolution avec un rapport U/Pb élevé, possiblement liée à des micro-inclusions primaire d'ilménite observées dans certains grains de cet échantillon, soit une contamination due à la présence de minéraux secondaire, hérités à l'intérieur des grains d'or, que l'on n'a pas pu éliminer lors des nettoyages successifs et ayant cette composition isotopique.

Bien que disposant de relativement peu de données, il semble que l'on puisse effectuer des regroupements par district, en fonction du caractère radiogénique des concentrés. Il est assez probable que cette signature reflète plutôt celle des inclusions dans les grains d'or (dont on a vu qu'elles étaient relativement spécifiques d'un district à l'autre), plutôt que la signature des grains d'or eux-mêmes. Une solution consisterait à effectuer des mesures in situ des isotopes de Pb sur les grains d'or eux-mêmes par ICP MS-MC après ablation laser.

9. Géochimie isotopique du cuivre et de l'argent

9.1. Introduction

Si les variations isotopiques du plomb ou du strontium sont des marqueurs bien connus de l'origine d'une roche ou d'un produit ayant été en contact avec celle-ci, il s'avère que depuis la fin des années 90, de nouvelles techniques ont permis de mettre en évidence la possibilité de mesurer des rapports isotopiques d'éléments précédemment considérés comme stable. De fait, ces nouveaux instruments (MC-ICP-MS) ont montré que ces éléments étaient finalement sujets à de faibles variations isotopiques. Celles-ci ne sont mesurables qu'en mettant en œuvre des techniques de séparations chimiques assez complexes mais bien maîtrisées dans certains laboratoires. Des travaux sur des pièces de monnaies argent ont été effectués par le laboratoire de géologie de l'ENS-Lyon et ont montré qu'il était possible d'utiliser les variations isotopiques de l'argent et du cuivre en supplément de celles du plomb pour tracer l'origine de l'argent (Desaulty *et al.* 2011). Cette même méthode a été utilisée pour mesurer les isotopes de l'argent et du cuivre dans les échantillons d'or provenant d'exploitations de Guyane et fournis par le WWF dans le cadre du projet TAO.

9.2. Méthode

Les échantillons ont été tout d'abord minéralisés à l'aide d'acides puis le cuivre et l'argent ont été séparés sur colonnes échangeuses d'ions dans le but d'obtenir chaque élément sous sa forme la plus pure possible. Les fractions purifiées ont ensuite été analysées sur MC-ICP-MS à l'ENS-Lyon avec une précision de l'ordre de ± 0.05 ‰ mais au cas par cas et en particulier sur l'argent, on peut être au-dessus quand les teneurs sont trop faibles. Les erreurs sont données dans le Tableau 5 récapitulatif ci-dessous. Chaque fraction a été analysée plusieurs fois (2 fois pour cuivre et de 5 à 8 fois pour l'argent) de manière à obtenir une valeur moyenne et une bonne reproductibilité des résultats.

Echantillon	dCu (‰)	Ecart-type dCu	dAg (‰)	Ecart-type dAg	Site (lieu-dit)	Commune
A1	0,47	ND	0,12	0,15	Saint-Elie (Saint-Auguste)	Saint-Elie
A2	0,42	0,02	0,11	0,15	Saint-Elie (Saint-Auguste)	Saint-Elie
A3	0,21	0,01	0,30	0,06	Saint-Elie (Saint-Auguste)	Saint-Elie
A4	0,39	0,02	0,26	0,04	Saint-Elie (Saint-Auguste)	Saint-Elie
A5	0,54	0,00	0,09	0,06	Montagne Tortue	Régina
A6	0,33	0,00	0,69	0,20	Montagne Tortue	Régina
A7	0,07	0,01	0,57	0,12	Crique Marc	Saül
A8	0,22	0,02	0,49	0,03	Crique Marc	Saül
A9	0,27	0,03	0,68	0,15	Dagobert	Saül
A10	0,18	ND	0,46	0,03	Dagobert	Saül
B1	0,01	0,02	0,40	0,06	Crique Marc	Saül
B2	-0,46	0,06	0,52	0,08	Crique Marc	Saül
B3	0,12	ND	0,34	0,05	Dagobert	Saül
B4	0,08	0,02	0,35	0,10	Dagobert	Saül
B5	0,15	0,02	0,30	0,04	Saint-Elie	Saint-Elie
B6	0,73	0,03	0,10	0,09	Saint-Elie	Saint-Elie
S1	-0,33	0,00	0,46	0,07	Yellow star	Benzdorp
S2	0,04	0,01	0,31	0,08	Baixão do Benzdorp	Benzdorp
S3	0,31	0,03	0,49	0,09	Pois-é	Benzdorp
S4	-0,15	0,00	0,57	0,18	Benzdorp (à qq centaines de mètre du bourg)	Benzdorp
S5	-0,03	0,00	0,54	0,21	Baixão da onça	Benzdorp
X1	0,38	ND	0,31	0,11		
X2	-0,36	0,03	0,44	0,23		
X3	0,19	0,02	0,49	0,27		
X4	0,78	0,02	0,17	0,03		
Y1	0,48	ND	0,47	0,16		

Tableau 5 : Résultat des données isotopiques Ag et Cu pour chaque échantillon.

9.3. Résultats

Les données sont relatives au standard Ag (SPEX) et au NBS 976 pour le cuivre. Ce sont donc des variations par rapport à un standard spécifique et non pas des valeurs absolues. Il est donc tout à fait normal d'obtenir des valeurs positives ou négatives étant donné que la valeur du standard est fixe. Nous obtiendrons donc des deltas (écarts) par rapport au standard choisi qui seront notés dCu ou dAg avec comme unité le millième (‰).

9.3.1. Correspondance provenance – type

On constate qu'il y a peu voire pas de correspondance entre un concentré primaire et éluvionnaire ou alluvionnaire pour un même district. On peut éventuellement à l'échelle du district distinguer Saint Elie (A2, A3 et B6) de Saül (A7, A9 et B2), les premiers ayant des valeurs de Ag inférieures. Cependant l'échantillon de Régina (Montagne Tortue, A5) correspond au champ de Saül.

9.3.2. Correspondance concentrés – dorés

Les échantillons ont été regroupés deux par deux avec un prélèvement de type « dorés » correspondant à de l'or sous forme fondue et sous forme « concentré » correspondant à de l'or en sortie de table à secousse (poudre). Sur un même site, il est naturel de penser que ces deux échantillons doivent donner des résultats voisins. De fait ceci n'est le cas que pour les couples A1/A2, A3/A4, A7/A8 et B3/B4. Nous n'avons pas les mêmes correspondances dans les autres cas et cela nous amène à nous poser la question du prélèvement.

Le diagramme dCu (‰) vs dAg (‰) Figure 83 est donné ci-dessous et permet de voir les regroupements évidents.

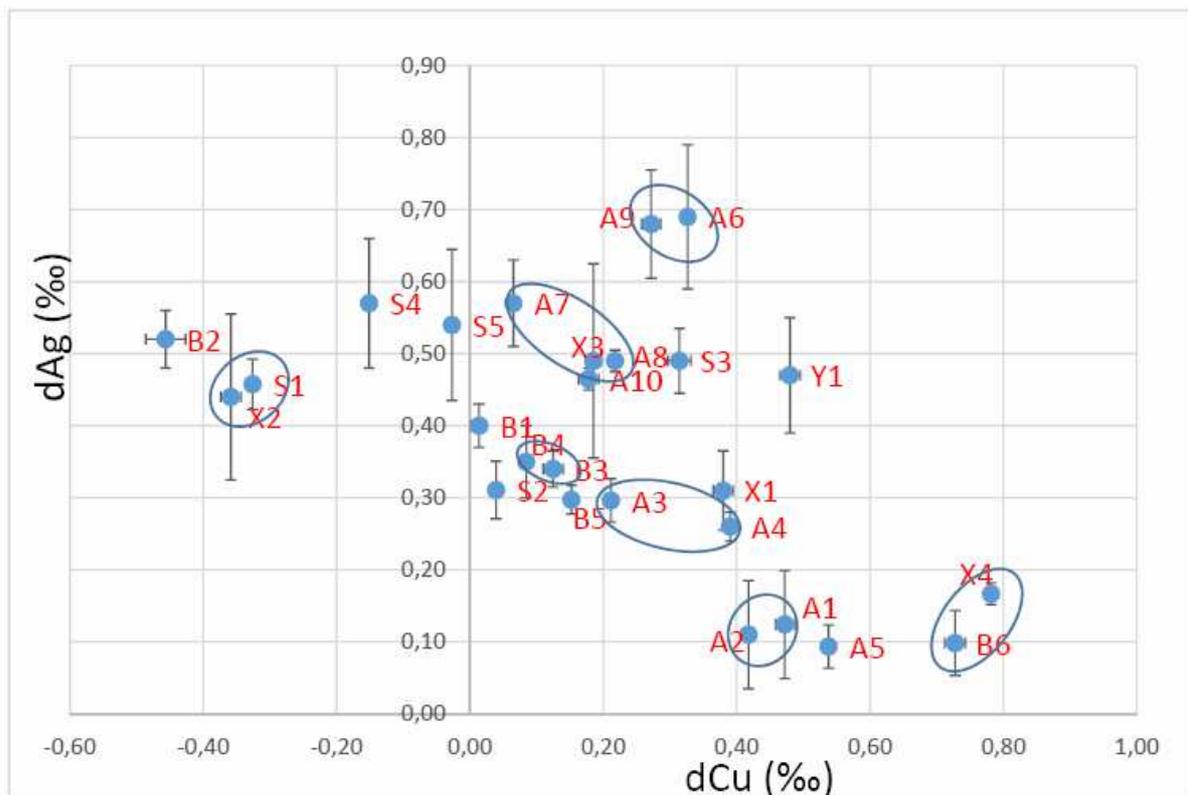


Figure 83 : Corrélation dCu (‰) vs dAg (‰) pour l'ensemble des échantillons.

Nous avons le cas A5/A6, B1/B2, B5/B6 où les deux données (dorés et concentrés correspondants) sont totalement écartées sans qu'un problème analytique ou de mesure soit possible, l'écart A9/A10 est un peu élevée mais acceptable. Il faudra donc envisager que le problème vient de l'échantillonnage pour ces lots. Une explication possible est la très probable pollution des dorés par des plombs de chasse et autres particules anthropiques incorporées lors de la fusion.

9.3.3. Correspondance connus – inconnus

En ce qui concerne les inconnus nous pouvons voir que la signature de X4 par exemple correspond directement à B6 (Saint-Élie) même si on a B5 (doré correspondant à B6) qui est très différent de B6 sans aucune explication. De même dans le cas de X2 qui correspond clairement à B2 ou S1 tout en ayant B1 (doré correspondant) très différent de B2. Dans le

cas de X2, il est possible de donner deux possibles origines que sont Yellow Star (Surinam, S1) ou Crique Marc (B2).

Pour X1, il y a une signature identique à A4 donc Saint-Élie (Tableau 6).

Inconnus	Signature commune	Emplacement
X1	A4	Saint-Élie
X2	B2 ou S1	Crique Marc ou Suriname (Yellow star)
X3	A8 ou A10	Crique Marc ou Dagobert
X4	B6	Saint-Élie
Y1	A4 (erreur importante sur Ag)	Saint-Élie Saint-Augustin

Tableau 6 : Correspondances suggérées connus – inconnus sur la base des données isotopiques Ag – Cu.

9.4. Conclusions

La mesure des rapports isotopiques du cuivre et de l'argent permet de faire une présélection assez fine des échantillons de provenance guyanaise. Il faut utiliser cette méthode pour exclure des origines plutôt que d'en définir la provenance. Dans un certain nombre de cas, la poudre et les dorés d'une même provenance ne donnent pas du tout les mêmes résultats et montrent a priori une pollution de l'un ou l'autre des échantillons.

10. Identification des échantillons inconnus

Les cinq échantillons « inconnus » correspondent tous, sur la base des observations microscopiques et des analyses en ablation laser (Figure 84), à des concentrés. Morphologiquement, ils se distinguent aisément des galettes du Surinam caractérisées par leur texture en chou-fleur liée à l'amalgamation au mercure.

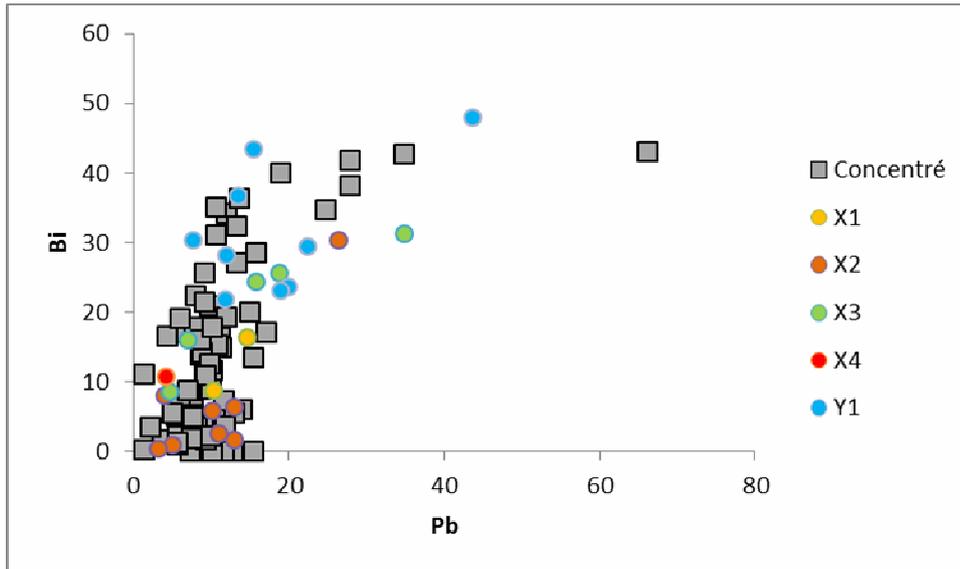


Figure 84 : Comparaison des « teneurs en GNI » en Bi et Pb des concentrés des différents sites et des échantillons inconnus.

L'échantillon X2 peut être rapproché de l'échantillon B2 sur la base de la taille des grains. X2 et B2 sont les seuls échantillons présentant des grains d'or aussi grossiers. En termes de chimie des grains, la Figure 85 montre la distribution similaire des rapports Au/Ag et des teneurs en Cu entre les deux échantillons. X2 pourrait également être rapproché de A7 mais la taille des grains n'est pas du tout comparable.

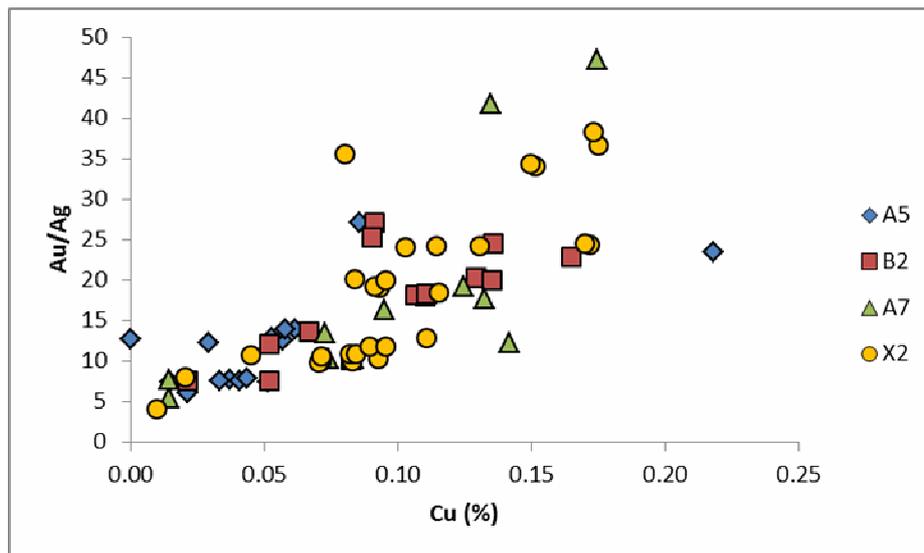


Figure 85 : Rapport Au/Ag versus Cu des concentrés alluvionnaires et de l'échantillon inconnu X2.

Les échantillons X1 et Y1 correspondent à des concentrés alluvionnaires (soit A5 soit A7) car la plupart des grains montrent des enrichissements en or au niveau de leurs bordures. L'échantillon X1 est à rapprocher de A5 sur la base de la morphologie vermiforme fréquente des grains d'or. Au contraire, Y1 est à rapprocher de A7 caractérisé par des grains relativement trapus.

Les échantillons X3 et X4 ne montrent pas ces enrichissements, ils correspondent donc à des concentrés primaires ou éluvionnaire (A2, A3, B6, A9 ou B4). L'échantillon X3 montre la présence d'inclusions de sulfure de fer (pyrrhotite), également observées dans A9 et B4. Sur la base des données microscopiques, il reste difficile de clairement identifier la provenance de ces deux inconnus. S'agissant de concentrés primaires leur chimisme va être comparé à celui des concentrés de primaire dont la provenance est connue. De par ses teneurs élevée en Au, l'échantillon X4 serait à rapprocher de l'échantillon B6 de Saint-Élie, tandis que l'échantillon X3 serait à rapprocher de A9 ou B4 (Dagobert) (Figure 86, Figure 87). Des grains similaires contenant de très abondantes micro-inclusions de minéraux à Bi associés à des oxydes de fer sont observés dans X4 et B6 confortant ce rapprochement.

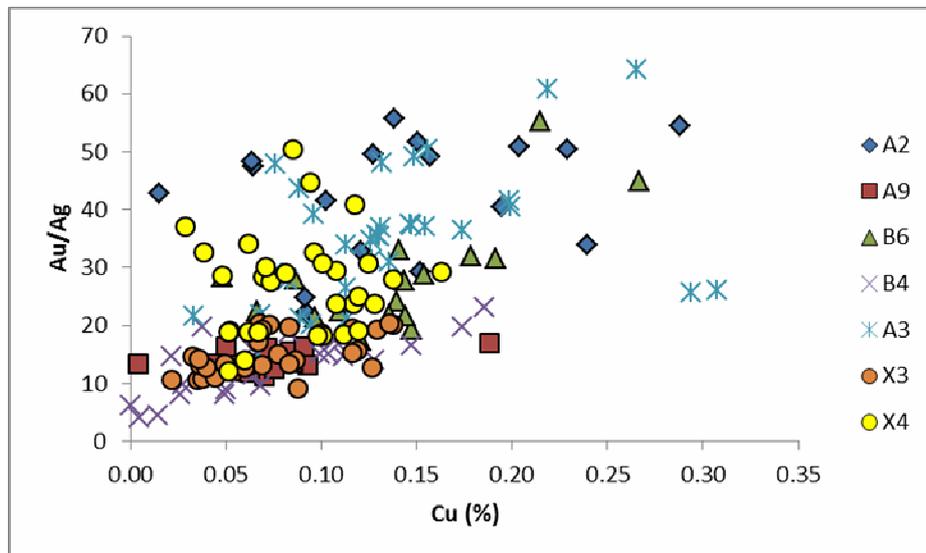


Figure 86 : Au/Ag versus Cu des concentrés primaires comparés aux échantillons inconnus.

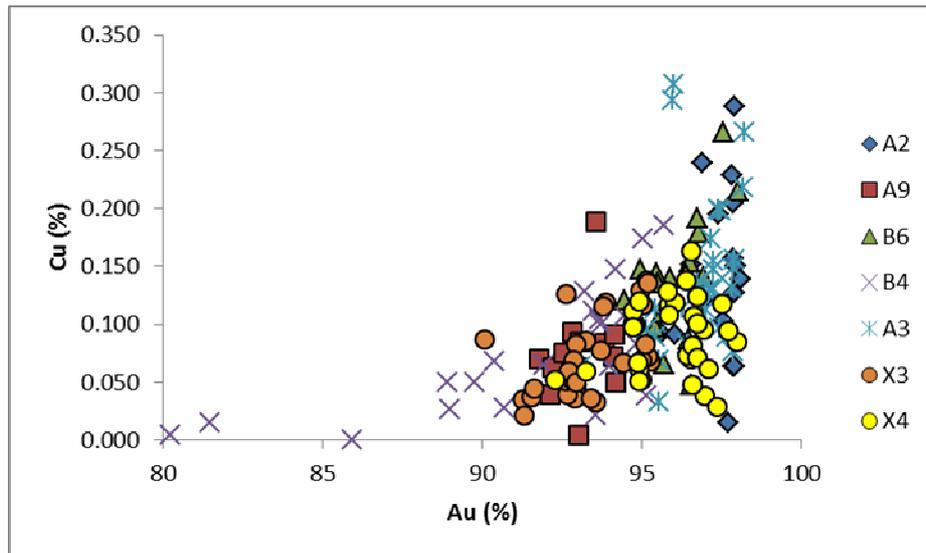


Figure 87 : Cu versus Au des concentrés primaires comparés aux échantillons inconnus X3 et X4.

En conclusion nous proposons les équivalences suivantes de manière certaine : X2 = B2, X3 = A9 ou B4 et de manière moins certaine, X1 = A5, Y1 = A7. Les conclusions spécifiquement obtenues à partir des données isotopiques de l'argent et du cuivre (paragraphe 9.3.3) confortent ces résultats pour les concentrés inconnus X2 et X4.

À l'issu de ce travail le WWF nous a fourni les lieux de prélèvement des concentrés inconnus (Tableau 7) :

Éch inconnu	Équivalent	Site	District	Exploitant
X1	A5	Montagne Tortue	Régina	Mydas
X2	B2	Crique Marc	Saül	Ermina
X3	B4	Dagobert	Saül	UMS
X4	B6	Saint-Élie	Saint-Élie	SMSE
Y1	Non spécifié	Bélizion ou Saül		Ermina

Tableau 7 : Origine des échantillons inconnus

Par rapport à nos conclusions, nous avons retrouvé les origines de X1, X2 et X4. Les échantillons A9 et B4 provenant du même site mais produit par un exploitant différent, il n'était pas étonnant de ne pas pouvoir les distinguer. On peut donc en conclure que l'on a aussi retrouvé sa provenance. Quant à l'échantillon Y1, dont la provenance était soit Bélizion soit Saül, nous l'avons identifié de manière certaine comme provenant de Saül. Il est donc fort probable qu'il provienne de ce district. On aurait donc retrouvé la provenance de l'ensemble des échantillons inconnus.

11. Conclusions et perspectives

L'objectif de ce projet, à l'initiative du WWF, était de tester la possibilité de caractériser et d'identifier les sites de provenance de concentrés aurifères (primaires, éluvionnaires, alluvionnaires) et de « dorés » en Guyane, pour ensuite idéalement certifier une production qui se retrouve sur le marché. La finalité est donc une meilleure transparence des filières aurifères en Guyane et dans la région, et la limitation du blanchiment et de l'écoulement des productions illégales. L'enjeu pour la profession et pour la puissance publique est d'abord socio-économique, en restreignant l'exploitation des gîtes d'or à des secteurs et des pratiques autorisées mais également en valorisant d'éventuelles productions traçables et responsables, par exemple au moyen d'une certification ou d'un label d'origine.

L'approche mise en œuvre sur des concentrés de Guyane et du Suriname est relativement exploratoire, et différentes techniques ont été utilisées :

- la microscopie optique couplée au microscope électronique à balayage ;
- des analyses in-situ à la microsonde électronique ;
- des analyses in-situ en ICP/MS-Ablation laser ;
- des analyses isotopiques du plomb, du cuivre et de l'argent.

Les observations réalisées en microscopie optique se sont attachées à la morphologie des grains d'or, à la présence d'éventuelles zonations chimiques et à la localisation d'inclusions minérales. Il apparaît possible de distinguer les concentrés primaires des concentrés alluvionnaires. Les premiers montrent fréquemment des faces planes et les empreintes des minéraux accompagnateurs. Ils ne montrent généralement pas de zonations chimiques. Les seconds sont caractérisés par des morphologies plus arrondies et une zonation chimique typique avec des bordures enrichies en or par rapport au cœur des grains. Les concentrés éluvionnaires partagent des caractéristiques rencontrés dans les deux familles précédentes. Les surfaces planes et les empreintes de minéraux accompagnateurs sont fréquentes et des enrichissements en or sont également visibles. Les grains d'or du Suriname sont difficilement comparables à ceux de Guyane dans la mesure où ils ont subi une amalgamation au mercure à l'origine d'une texture caractéristique en « chou-fleur » avec de nombreux vermicules d'or en bordure des grains.

Les caractérisations au MEB ont permis de localiser les micro-inclusions minérales présentes dans les grains d'or et d'obtenir leur composition chimique qualitative. L'abondance des inclusions est variable d'un grain à l'autre au sein d'un même concentré. Certains dorés montrent une grande abondance d'inclusions en liaison possible avec le caractère impure du concentré fondu, la présence d'une pollution par des plombs de chasse est ainsi fortement suspectée pour les dorés de Saint-Élie. Compte-tenu de la nature et de l'abondance de ces micro-inclusions, il apparaît possible de distinguer le district de provenance des concentrés et dans certains cas le site d'extraction. Il est également possible de distinguer la « marque de fabrique » des exploitants et producteurs de dorés. Il existe en revanche peu de relation entre les caractéristiques des concentrés et des dorés correspondants.

Les analyses à la microsonde électronique se sont focalisées sur les teneurs en Cu et Hg en plus des teneurs en Au et Ag. Sur la base des analyses du cœur des grains d'or, il est possible de distinguer les concentrés primaires des concentrés alluvionnaires considérant la variabilité des teneurs en Au et Ag. La variabilité des teneurs des concentrés primaires est limitée en comparaison de celle observée pour les concentrés alluvionnaires, suggérant pour ces derniers des provenances différentes. La seule exception concerne l'échantillon B4,

qualifié de primaire, mais qui montre une variabilité des teneurs en Au et Ag comparable voire plus forte que celle des alluvionnaires. Le seul concentré éluvionnaire étudié est caractérisé, comme les concentrés primaires, par une variabilité limitée des teneurs en Au et Ag.

Les teneurs en mercure des échantillons de Guyane (concentrés et dorés) sont nulles ou inférieures au seuil de détection dans les conditions analytiques choisies. Au contraire, les échantillons du Surinam, qui correspondent à des grains d'or amalgamés au mercure, présentent des teneurs fréquemment élevées au niveau des bordures des grains.

Pour les concentrés primaires, il est possible de distinguer les échantillons de Saint-Élie de ceux provenant de Dagobert, sur la base des teneurs en Au, plus élevées à St-Elie qu'à Dagobert. Il est plus difficile de distinguer les concentrés alluvionnaires les uns des autres, on observe, en moyenne des teneurs plus élevées en Ag et plus pauvres en Cu pour le concentré A5 (Montagne Tortue) en comparaison des concentrés B2 et A7 qui montrent logiquement des teneurs voisines en Ag, Au et Cu puisqu'ils proviennent tous deux du site de Crique Marc. La provenance des dorés est relativement bien discriminée sur la base des teneurs en Au, Ag et Cu. Il est à noter que les dorés produits par Auplata (A8bis et A7bis) sont systématiquement plus riches en Cu que les autres dorés.

Les analyses par ICP/MS avec ablation laser ont été réalisées sur les grains auparavant analysés à la microsonde électronique. Comme il n'a pas été possible d'obtenir un échantillon standard dont la composition se rapproche de celle des grains à analyser, nous n'avons obtenu que des valeurs relatives sur les éléments mineurs et en traces des grains analysés, ce qui n'est pas réellement pénalisant, dans la mesure où notre démarche consistait à comparer des valeurs pour différents sites. Malgré tout, cette approche ne s'est pas révélée discriminante.

Les isotopes du plomb sont couramment utilisés pour tracer la source des minéralisations. Contrairement aux techniques décrites précédemment, cette analyse nécessite la mise en solution des grains d'or. Cette technique n'a été appliquée que sur les concentrés, les dorés montrant des évidences de pollution anthropique par le plomb. Les solutions obtenues ont été analysées non seulement pour les isotopes du plomb mais également, en ICP/MS, pour leurs teneurs en Au, Ag, Cd, Zn, Pb, Cu, Th, U, Bi, Fe, Pt, Te, Sb, Tl. Les teneurs en Cu, Te et Zn permettent de discriminer les concentrés provenant des districts de Saint-Élie, de Saül et de Régina. En revanche, le concentré de Régina (concentré alluvionnaire de Montagne Tortue) présente des teneurs très proches des deux échantillons du Surinam testés. Quant aux isotopes du plomb, il semble que l'on puisse effectuer des regroupements par district, en fonction du caractère radiogénique des concentrés. Il est assez probable cependant que cette signature reflète plutôt celle des inclusions dans les grains d'or (dont on a vu qu'elles étaient relativement spécifiques d'un district à l'autre), plutôt que la signature des grains d'or eux-mêmes.

La mesure des rapports isotopiques du cuivre et de l'argent permet de faire une présélection assez fine des échantillons de provenance guyanaise. Il faut utiliser cette méthode pour exclure des origines plutôt que d'en définir la provenance. Dans un certain nombre de cas, la poudre et les dorés d'une même provenance indiquent une correspondance parfaite ; dans d'autres cas, ils ne donnent pas du tout les mêmes résultats ce qui pourrait a priori s'expliquer par une pollution de l'un ou l'autre des échantillons (cf. pollution par du Pb dans les dorés).

Enfin, concernant l'exercice qui consistait à retrouver cinq concentrés « inconnus » de Guyane parmi les 8 fournis, on estime avec certitude en avoir identifié trois et, de manière moins certaine, deux. Ces résultats sont partiellement corroborés par les données isotopiques du cuivre et de l'argent.

Ainsi donc les approches les plus simples à mettre œuvre, c'est-à-dire l'étude morphoscopique des grains, l'étude des inclusions de minéraux dans les grains d'or et la composition chimique ponctuelle (Au, Cu, Ag, Hg) obtenue par microsonde électronique à balayage permettent de discriminer de manière satisfaisante la nature et l'origine géographique des concentrés.

Pour conforter ces résultats, il serait souhaitable de poursuivre ce travail d'une part en testant d'autres sites, et d'autre part en étudiant la variabilité dans le temps des produits extraits. En effet les concentrés obtenus correspondent à un prélèvement d'une zone donnée du gisement, dont on ne connaît pas a priori la variabilité. Ainsi en testant la même approche sur des concentrés (et des dorés) prélevés à plusieurs semaines de distance, on pourrait conforter les conclusions de cette étude.

12. Bibliographie

12.1. *Références citées*

Chamel, T. (2014). Caractérisation minéralogique et chimique de l'or de Guyane : du primaire au placer, Rapport Master de Sciences de la Terre et de l'Environnement, Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre, 27p.

Greffié, C., Bailly, L., Milési, J.P. (2002). Supergene alteration of primary ore assemblages from low-sulfidation Au-Ag epithermal deposits at Pongkor, Indonesia, and Nazareño, Peru, *Economic Geology* 97, 561-571.

Gruget, O. (1979). Étude de la sulfuration par le soufre de la pyrite d'un minerai garniérique de nickel en vue de sa valorisation par flottation. Orléans : éditions BRGM.

Ludwig K.R., 1999.- Isoplot/Ex version 2.06 : A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication N° 1a. 49p.

Machairas, G. (1963). Métallogénie de l'or en Guyane française (avec comparaison des districts aurifères d'El Callao, Venezuela, de Porcupine, Canada et de Ity, Côte d'Ivoire). Paris: Editions BRGM.

Marcoux E., Milési J.P., 1993.- Lead isotope signature of Early Proterozoic Ore Deposits in Western Africa : Comparison with Gold Deposits in French Guiana. *Economic Geology*, 88 : 1862-1879

Stacey J.S., Kramers J.D. 1975.- Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. *Earth Planet. Sci.*

Zhongxing Chen, W. D. (1997). Application of laser microprobe inductively coupled plasma mass spectrometry for trace metal fingerprinting of native gold. *Geological survey of Canada*, 1997-D, pp. 57-62.

12.2. *Compléments bibliographies*

12.2.1. *Microsonde électronique*

Chapman, R.J., Leake, R.C., Moles, N.R. (2000) The use of microchemical analysis of alluvial gold grains in mineral exploration: experiences in Britain and Ireland, *J. Geochemical Exploration* 71, 241-268.

Chapman, R.J., Leake, R.C., Warner, R.A., Cahill, M.C., Moles, N.R., Shell, C.A., Taylor, J.J. (2006) Microchemical characterization of natural gold and artifact gold as a tool for provenancing prehistoric gold artefacts: a case study in Ireland, *Applied Geochemistry* 21, 904-918.

Chapman, R.J., Mortensen, J.K. (2006) Application of microchemical characterization of placer gold grains to exploration for epithermal gold mineralization in regions of poor exposure, *Journal of Geochemical Exploration* 91, 1-26.

Constantinescu, B., Bugoi, R., Cojocaru, V., Voiculescu, D., Grambole, D., Herrmann, F., Ceccato, D. Romanian ancient gold objects provenance studies using micro-beam methods : the case of « Pieyroasa » hoard.

Grigorova, B., Anderson, S., de Bruyn, J., Smith, W., Stülpner, K., Barzev, A. (1998) The AARL gold fingerprinting technology, *Gold Bulletin* 31, 26-29.

Guerra, M.F., Calligaro, T. (2004) Gold traces to trace gold, *Journal of Archaeological Science* 31, 1199-1208.

Guerra, M.F., Radtke, M., Reiche, I., Riesemeier, H., Strub, E. (2008) Analysis of trace elements in gold alloys by SR-XRF at high energy at the BAMline, *Nucler Instruments and Methods in Physics Research B266*, 2334-2338.

12.2.2. ICP/MS-LA

Brostoff, L.B., Gonzales, J.J., Jett, P., Russo, R.E. (2009) Trace element fingerprinting of ancient chinese gold with femtosecond laser ablation-inductively coupled mass spectrometry, *Journal of Archaeological Science* 36, 461-466.

MacCandless, T.E., Baker, M.E., Ruiz, J. (1997) Trace element analysis of natural gold by laser ablation ICP-MS: a combined external/internal standardization approach, *Geostandards Newsletter* 21, 271-278.

Outridge, P.M., Doherty, W., Gregoire, D.C. (1998) Determination of trace element signatures in placer gold by laser ablation – inductively coupled plasma – mass spectrometry as a potential aid for gold exploration, *J. Geochemical Exploration* 60, 229-240.

Watling, R.J., Herbert, H.K., Delev, D., Abell, I.D. (1994) Gold fingerprint by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 49, 205-219.

12.2.3. Caractérisation isotopique

Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Titley S., Walshe J. (2001) A detrital model for the origin of gold and sulfides in the Witwatersrand basin based on Re-Os isotopes, *Geochimica and Cosmochimica Acta* 65, 2149-2159.

Desaulty, A.M. Telouk, Ph., Albalat, E., Albarède, F. (2011) Isotopic Ag–Cu–Pb record of silver circulation through 16th–18th century Spain, *PNAS* 108, 22, 9002–9007.

12.2.4. Étude de cas

Henney, P.J., Styles, M.T., Wetton, P.D., Bland, D.J. (1995) Characterisation of gold from the Raub area, Pahang, Malaysia, Technical report WC/95/20, British Geological Survey, 70 p.

Henney, P.J., Styles, M.T., Wetton, P.D., Bland, D.J. (1995) Characterisation of gold from the Penjom area, near Kuala Lipis, Pahang, Malaysia, Technical report WC/95/21, British Geological Survey, 67 p.

Leake, R.C., Styles, M.T., Bland, D.J., Henney, P.J., Wetton, P.D. Naden, J. (1995) The interpretation of alluvial gold characteristics as an exploration technique, Technical report WC/95/22, British Geological Survey, 45 p.

Leake, R.C., Chapman, R.J., Bland, D.J., Stone, P., Cameron, D.G., Styles M.T. (1998) The origin of alluvial gold in the Leadhills area of Scotland: evidence from interpretation of internal chemical characteristics, *J; Geochemical Exploration* 63, 7-36.

Macheiras, G. (1963) Métallogénie de l'or en Guyane française, *Mémoire du BRGM n°22*, 211 p.

Marquez-Zalavia, M., Southam, G., Craig, J.R., Galliski, M.A. (2004) Morphological and chemical study of placer gold from the San Luis Range, Argentina, *The Canadian Mineralogist* 42, 169-182.

Mosier, E.L., Cathrall, J.B., Antweiler, J.C., Tripp, R.B. (1989) *Journal of Geochemical Exploration* 31, 97-115.

Pitfield, P.E.J., Styles, M.T., Taylor, C.D., Key, R.M., Bauer, W., Vonimanitra Ralison, A. Gold deposit styles and placer gold characterization in northern and east-central Madagascar.

Styles, M.T., Wetton, P.D., Bland, D.J. (1995) Characterisation of gold from Zimbabwe: Part 2. Alluvial and soil gold, Technical report WC/95/5, British Geological Survey, 72 p.

Vasilescu, A., Constantinescu, B., Bugoi, R. (2011) Micro-SR-XRF studies of gold provenance in archaeology, *Romanian Journal of Physics* 56, 366-372.

Zitnan, P., Bakos, F., Schmiderer, A. (2010) Importance of alluvial gold geochemistry for exploration: examples from placers in the Western Carpathians, *Mineralia Slovaca* 42, 57-68.

Annexe 1 - Caractérisation des inclusions minérales dans les grains d'or

Oxyde de fer

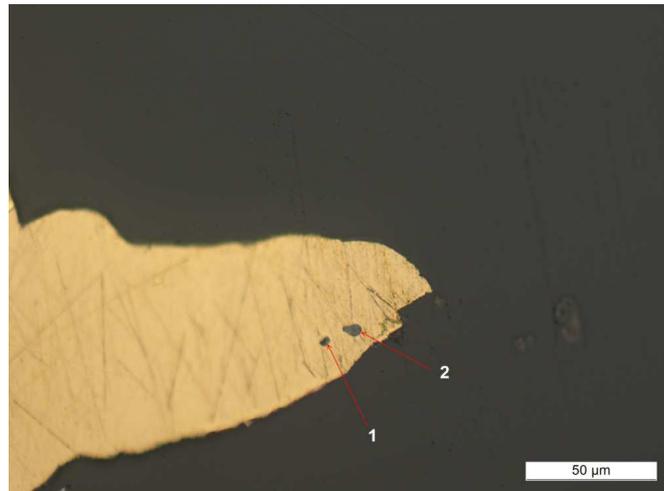


Figure 88 : Photographie d'inclusions d'oxyde de fer. Les oxydes de fer ont une couleur gris foncé violet trouvées dans un grain de l'échantillons B6.

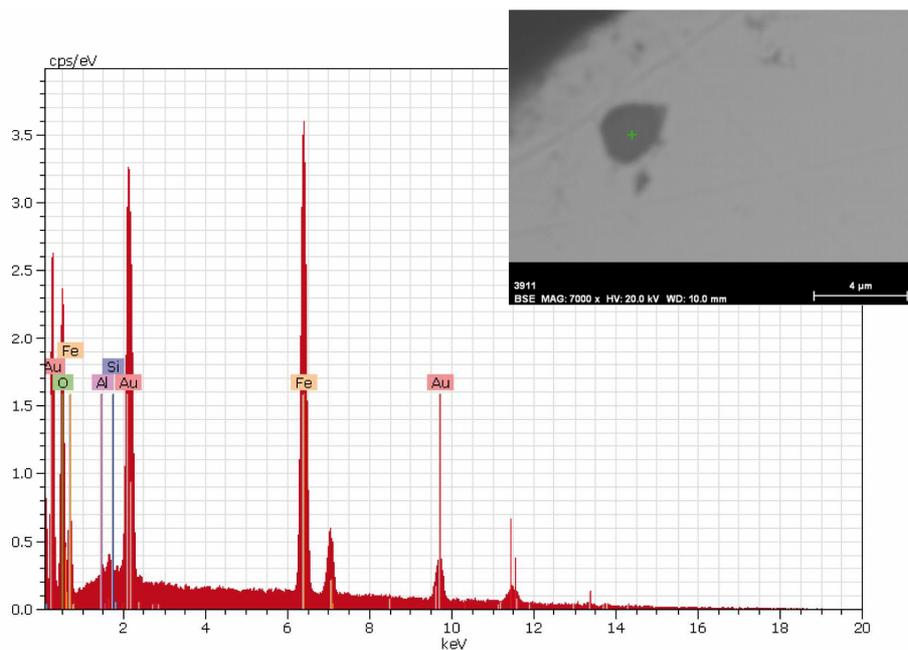
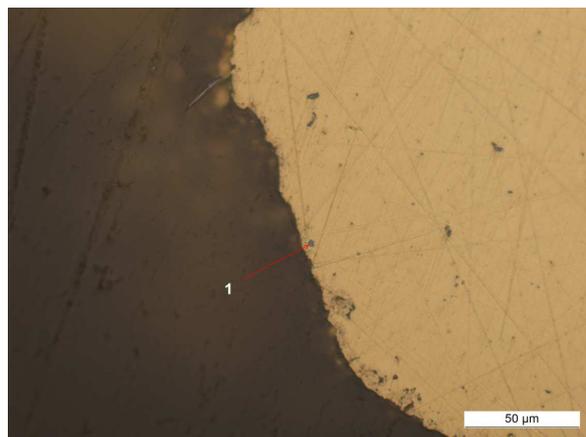


Figure 89 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion d'oxydes de fer. Les oxydes de fer sont de couleur gris foncé violet au microscope et noirs au MEB.- vu dans l'échantillon A2.

Ilménite

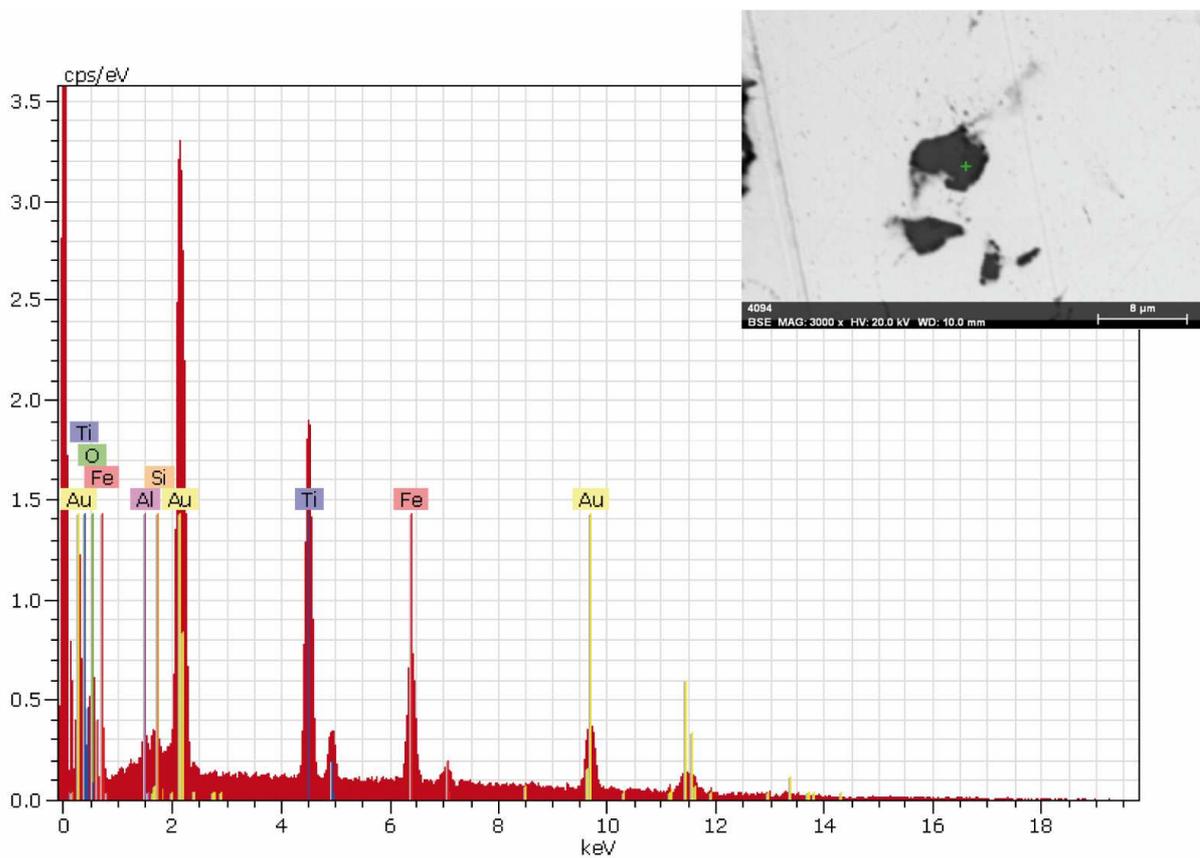
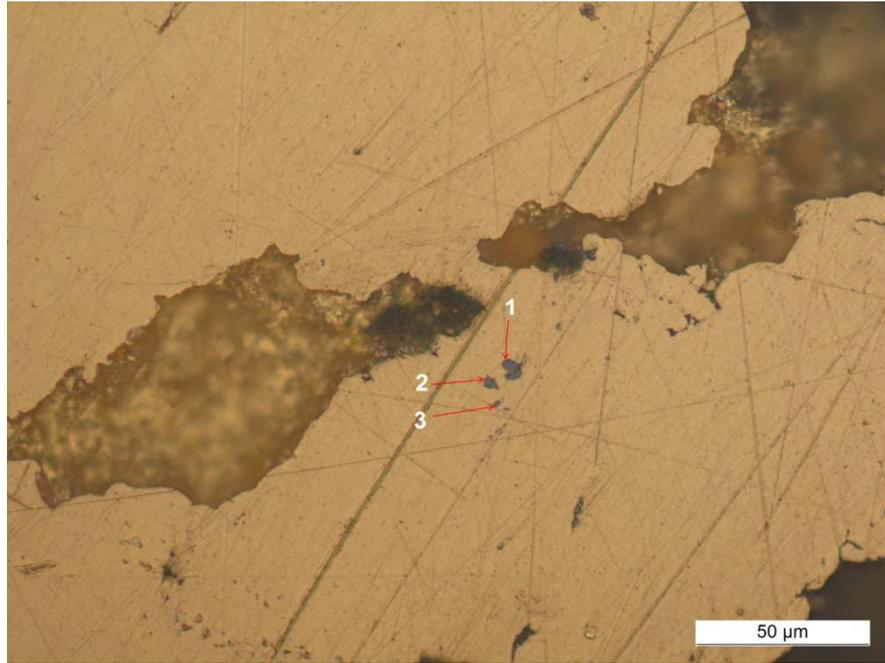


Figure 90 : Photographie au microscope en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion d'ilménite. Les micro-inclusion d'ilménite sont de couleur gris foncé au microscope et sont visibles au MEB. - vu dans l'échantillon A7.

Oxyde d'aluminium

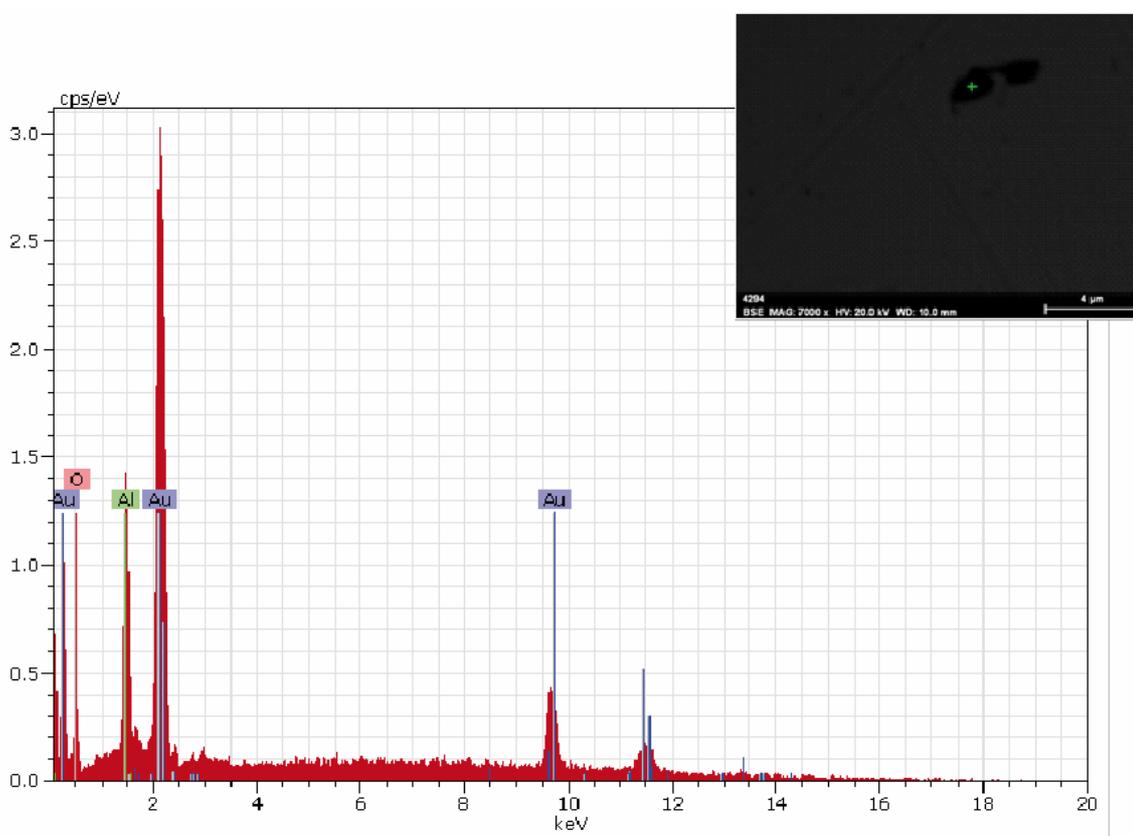
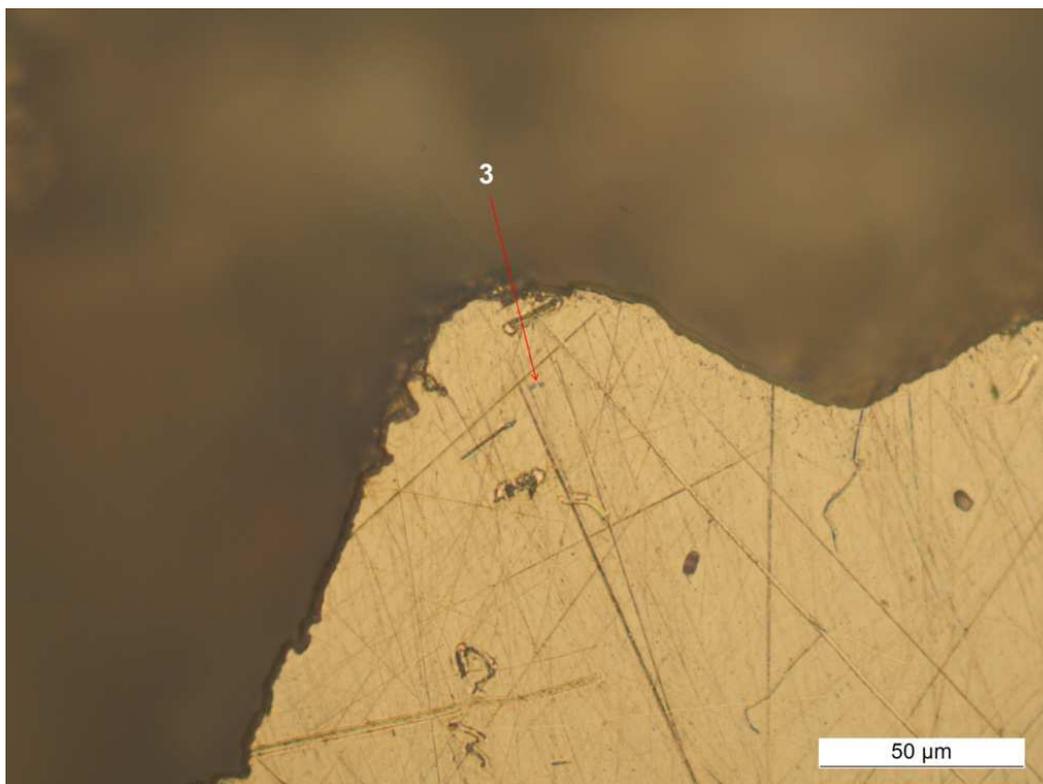


Figure 91 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion d'oxyde d'aluminium. Les oxydes d'aluminium apparaissent gris violet au microscope et sont noirs au MEB.
- vu dans l'échantillon B6.

Bismuth ou alliage or bismuth

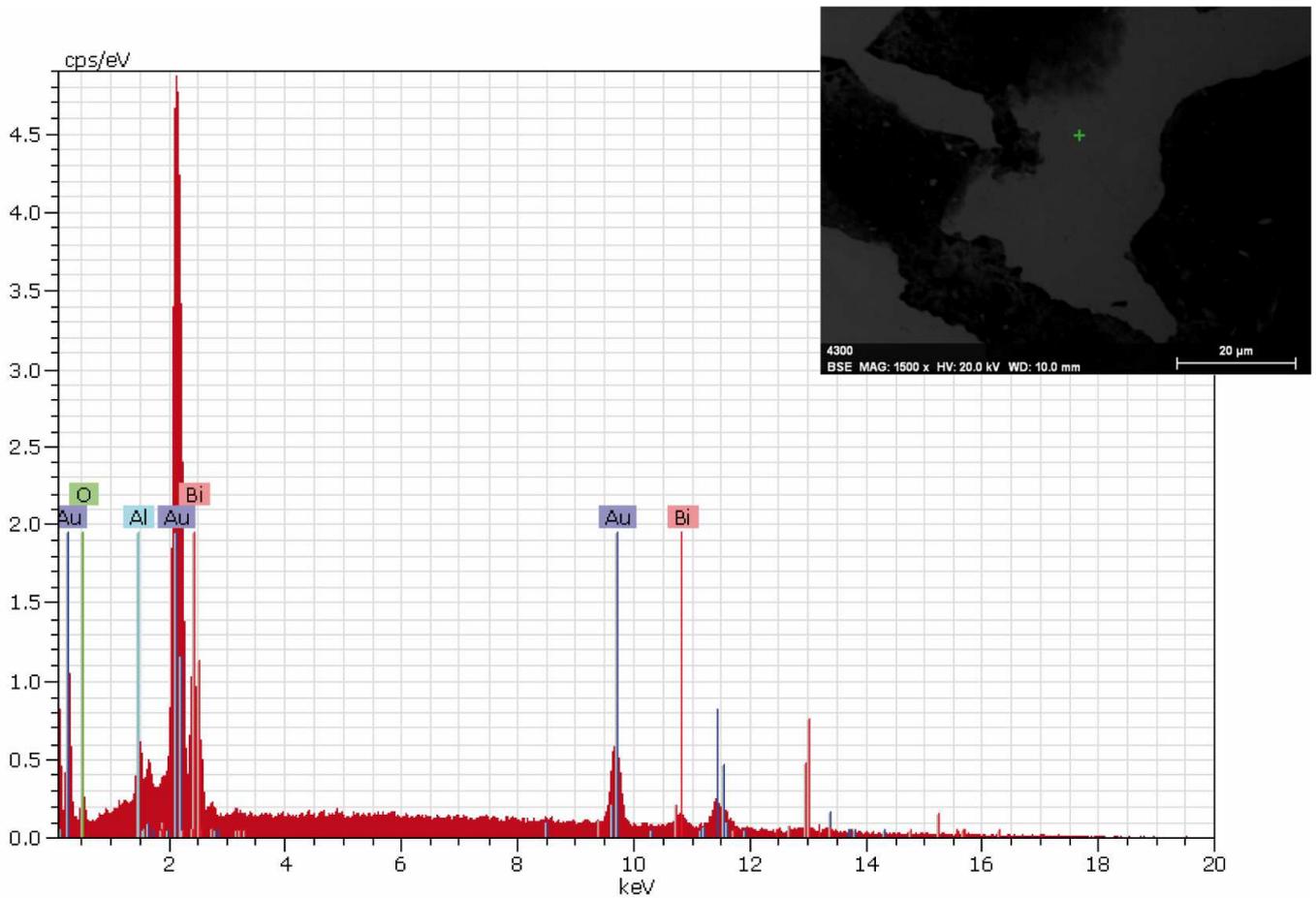
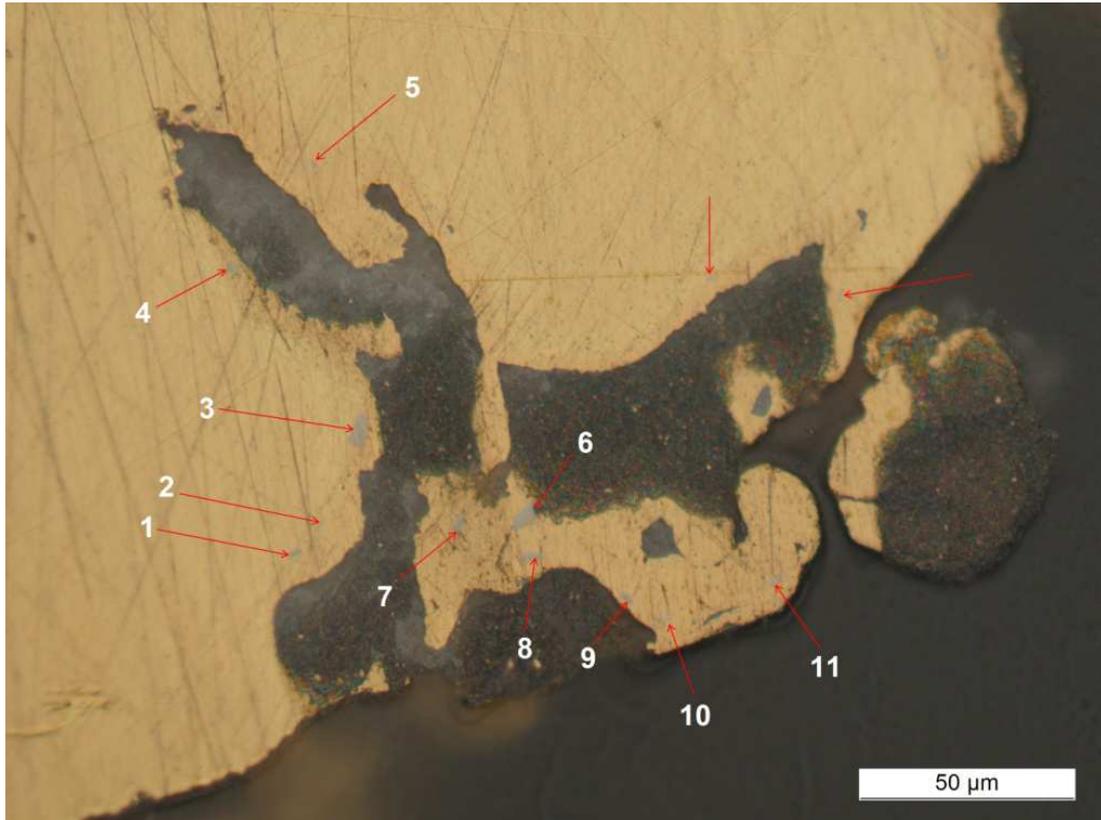


Figure 92 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB d'une micro-inclusion de Bi (ou d'un alliage Au₂Bi). Les micro-inclusions de Bi peuvent apparaître gris clair au microscope et sont le plus souvent invisibles au MEB.

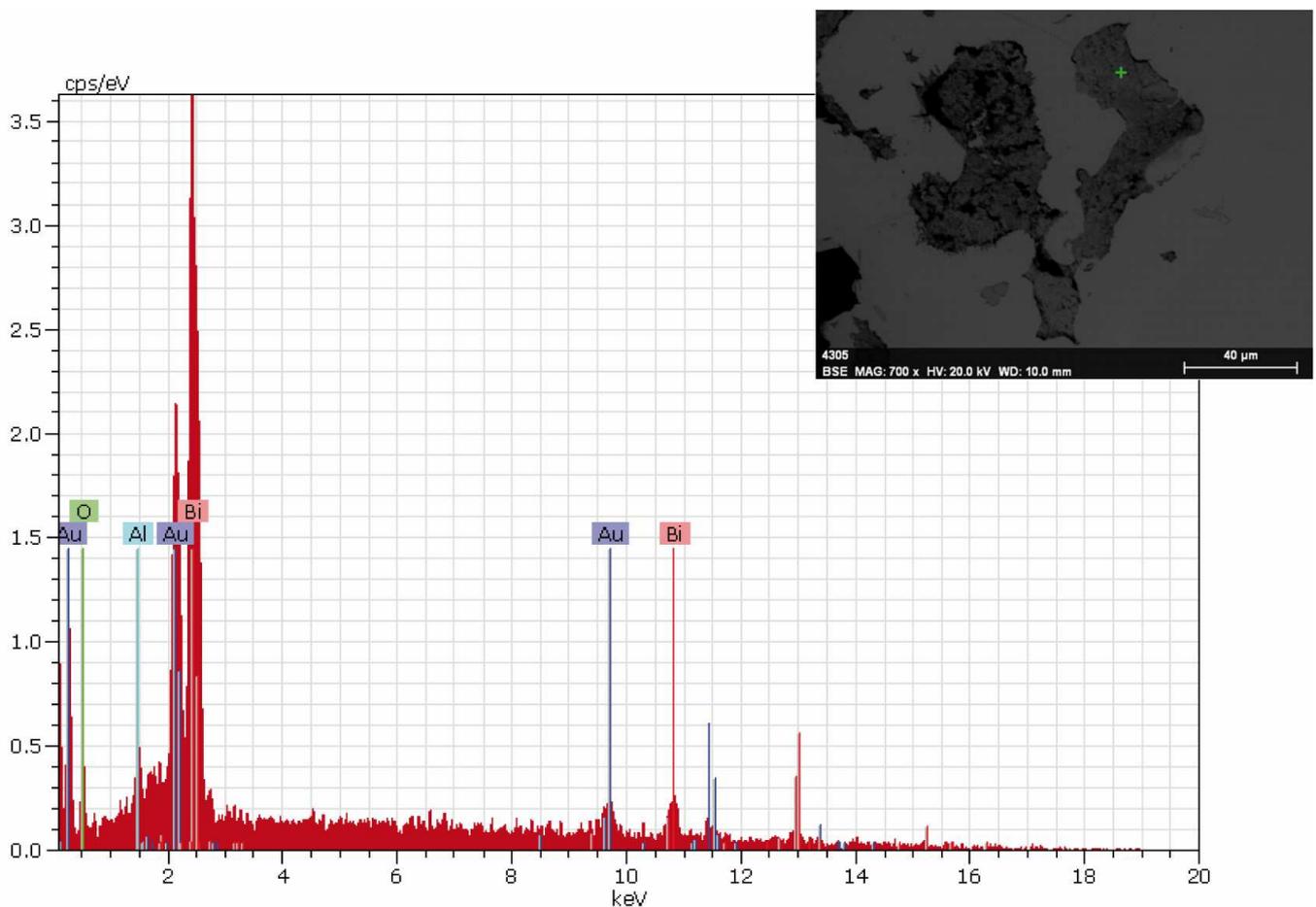
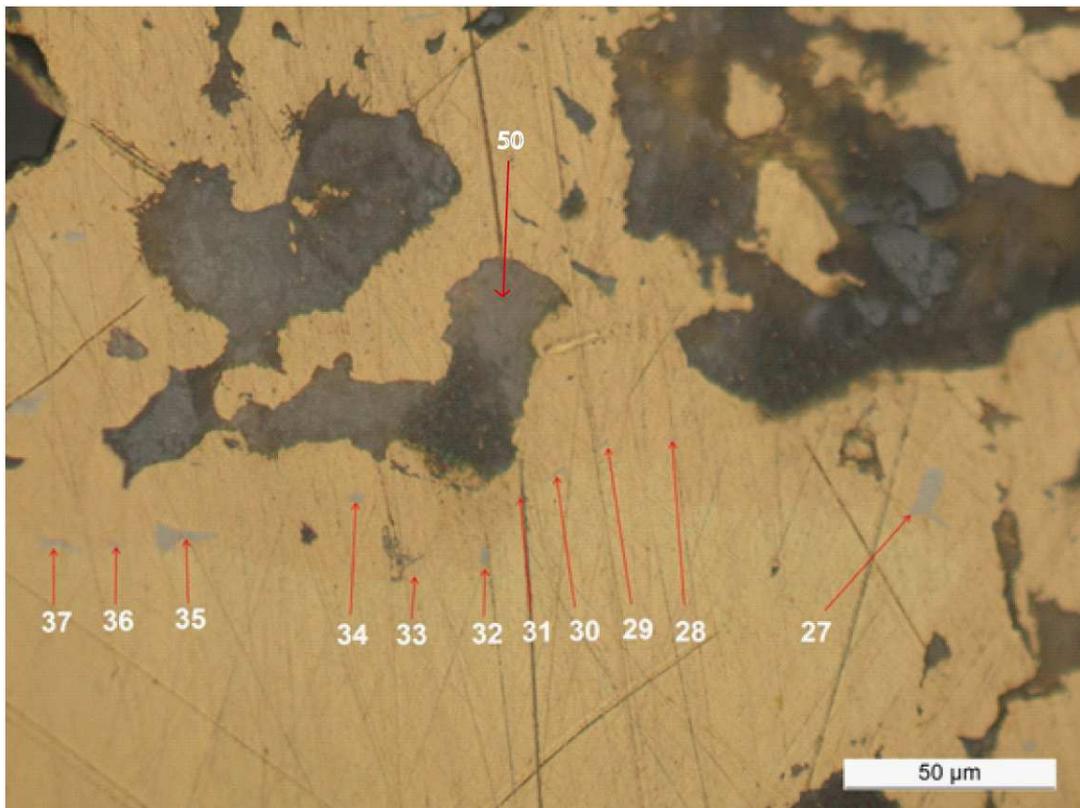


Figure 93 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB d'une micro-inclusion de Bi (n° 50 sur la photographie). Les micro-inclusions de Bi peuvent apparaître gris foncé bleu ou gris foncé violet au microscope et dans ce cas le signal en bismuth est plus intense. - vu dans l'échantillon B6.

Alliage or plomb et tellure de plomb

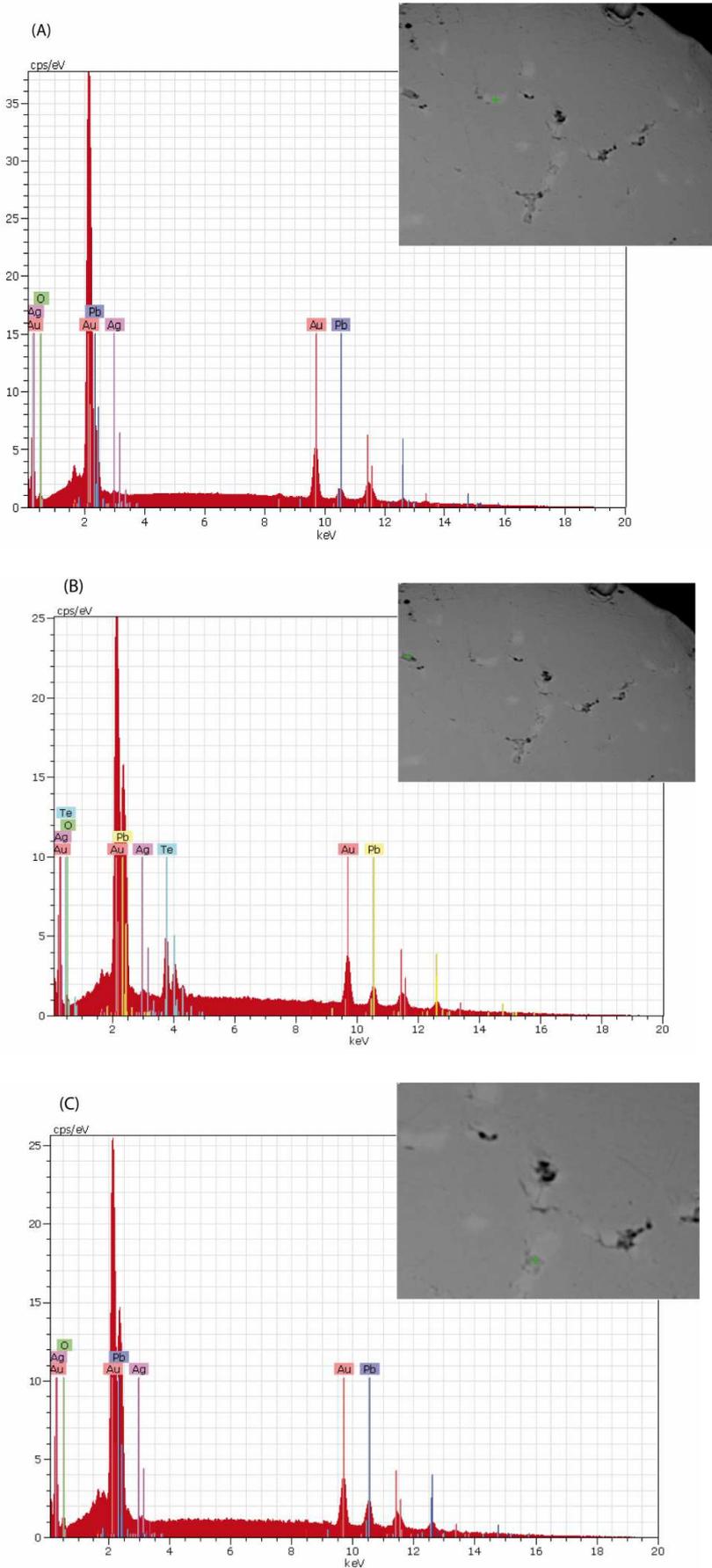


Figure 94 : Analyses au MEB : (A) veine contenant peu de plomb. Les veines à faible teneur en plomb apparaissent blanches au MEB et avec des délimitations diffusent (B) TePb. Les tellurures de plomb apparaissent gris clair au MEB

(C) veine contenant de forte teneur en Pb. Les veines à fortes teneurs en Pb apparaissent grises au MEB ; elles sont de même couleur que les tellures de Pb. – vues dans le copeau étudié de l'échantillon B5.

Tellure de bismuth

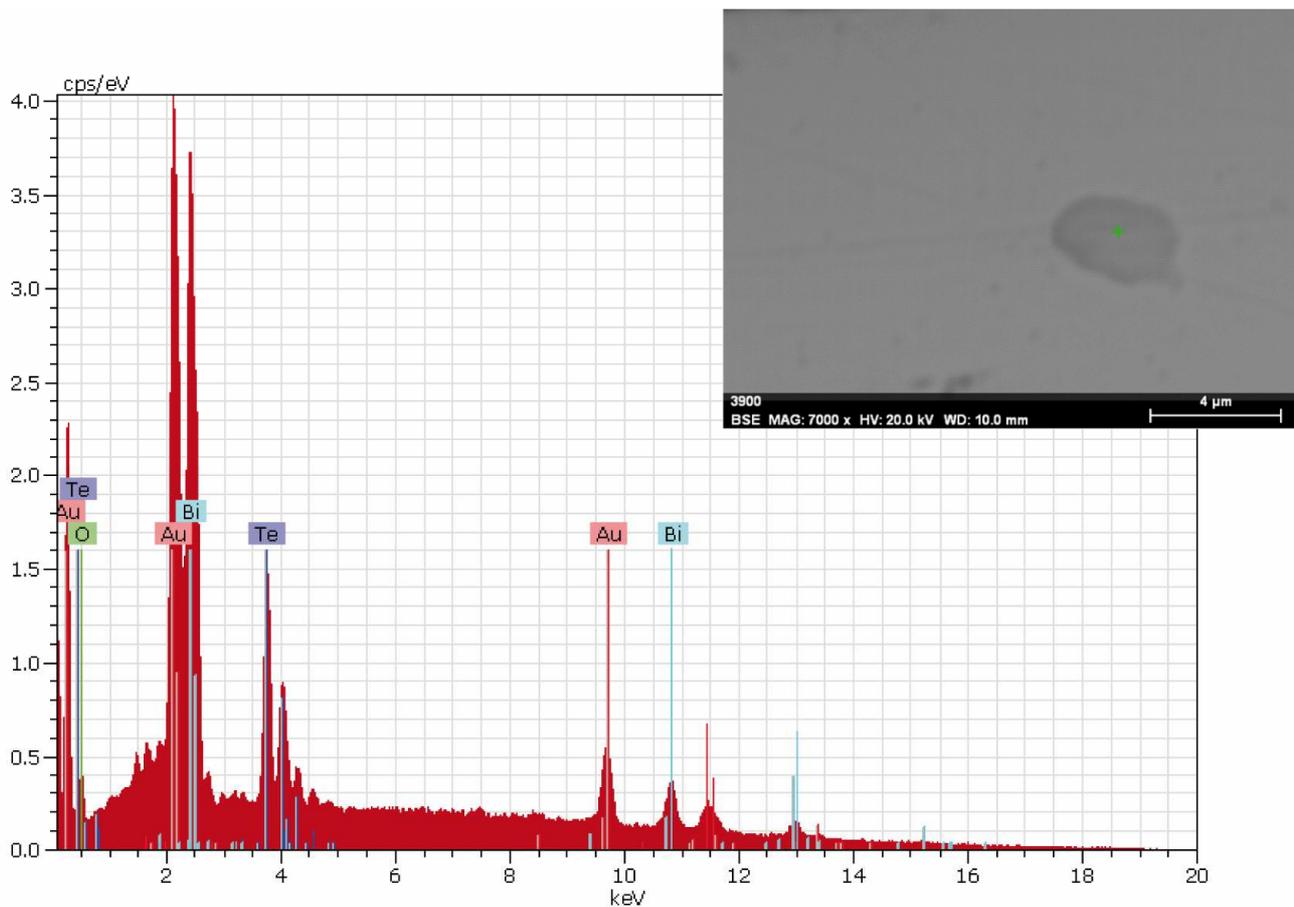
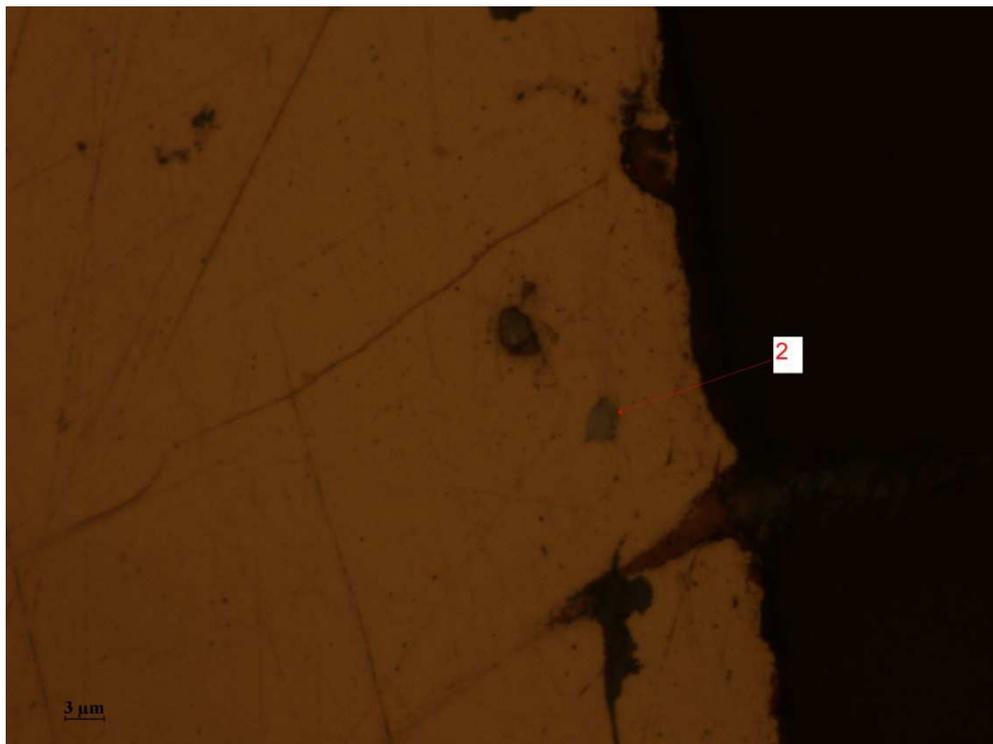
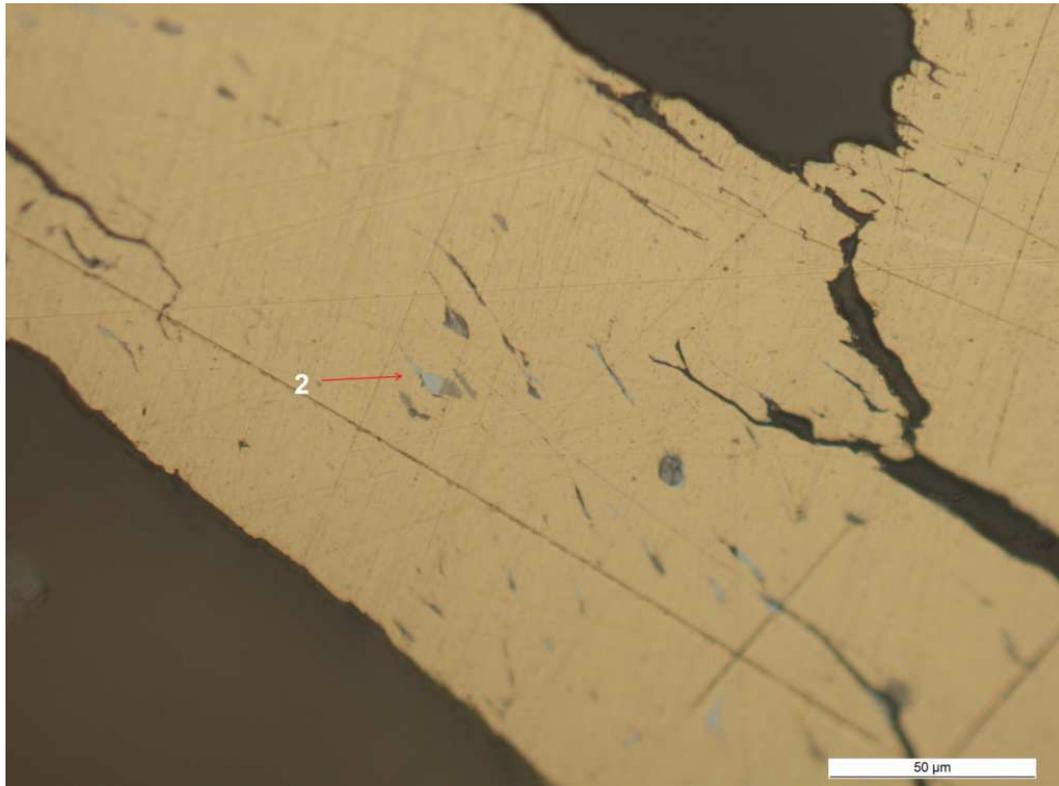


Figure 95 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre de la micro-inclusion n°2 de tellure de bismuth. Les micro-inclusions de tellures de bismuth apparaissent gris clair au microscope et sont bien visible au MEB. - vu dans l'échantillon A2.

Tellure de Plomb



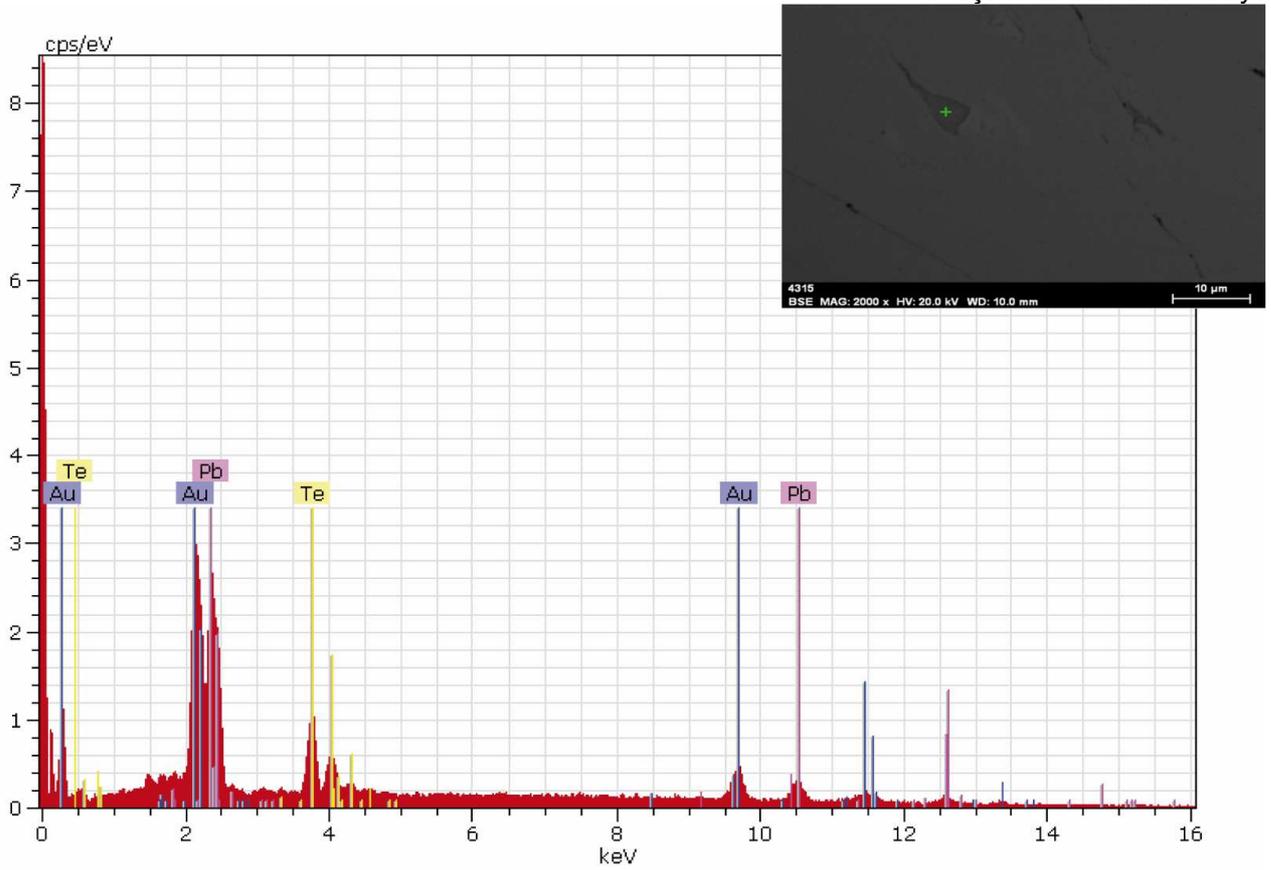
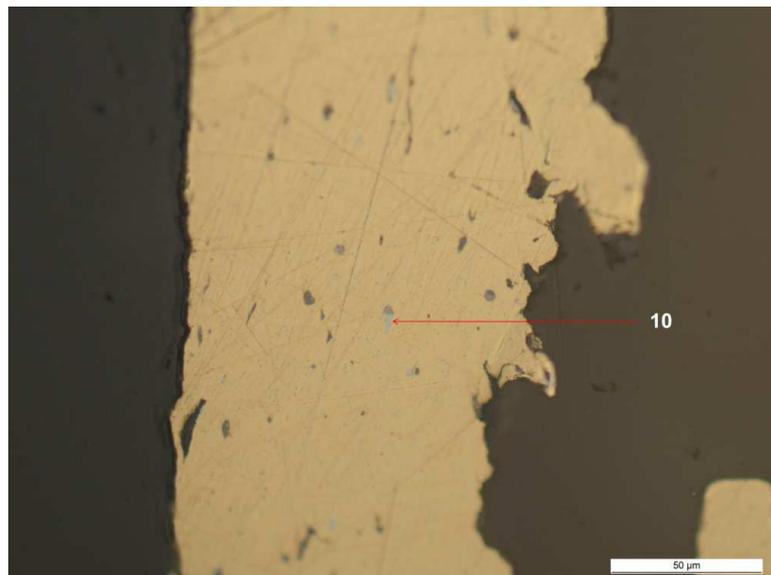


Figure 96 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion de tellure de plomb. Les micro-inclusions de tellure plomb apparaissent gris clair au microscope et sont visibles au MEB. - vu dans l'échantillon A1.

Alliage or plomb bismuth



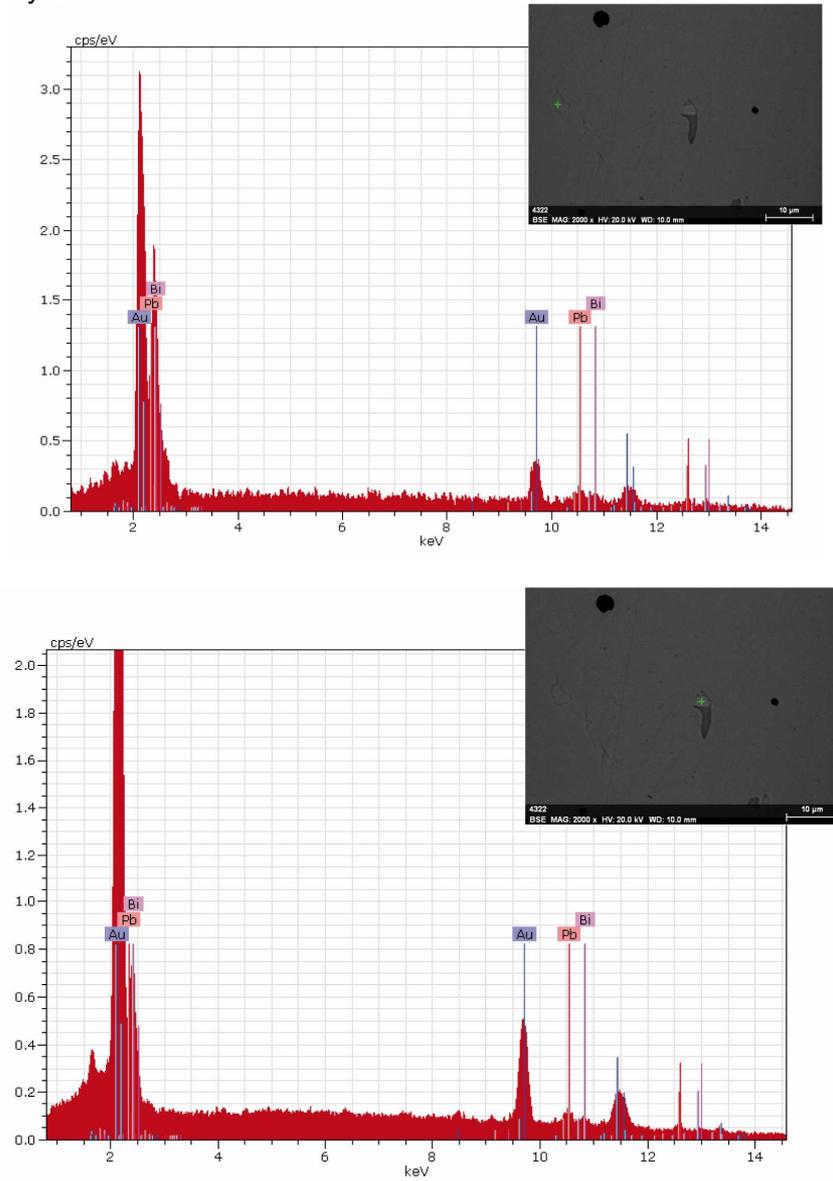
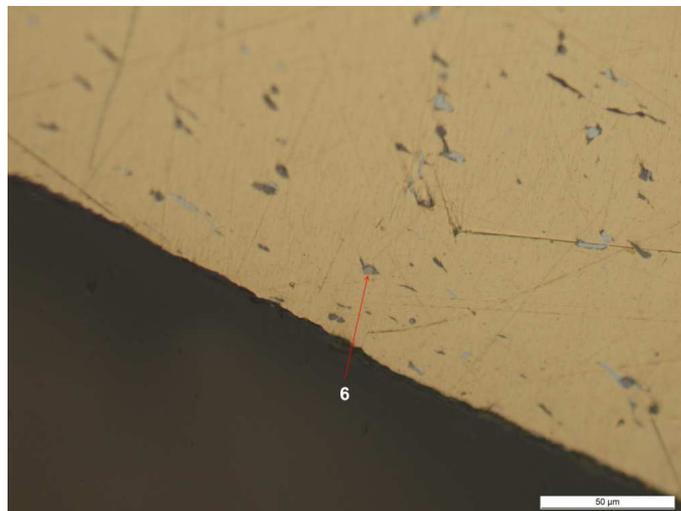


Figure 97 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre de deux inclusions AuPbBi. L'alliage à forte teneur en PbBi apparaît gris foncé au microscope et est visible au MEB. L'alliage à faible teneur en PbBi apparaît gris lin clair au microscope et est peu distinguable de l'or au MEB.- vu dans l'échantillon A1.



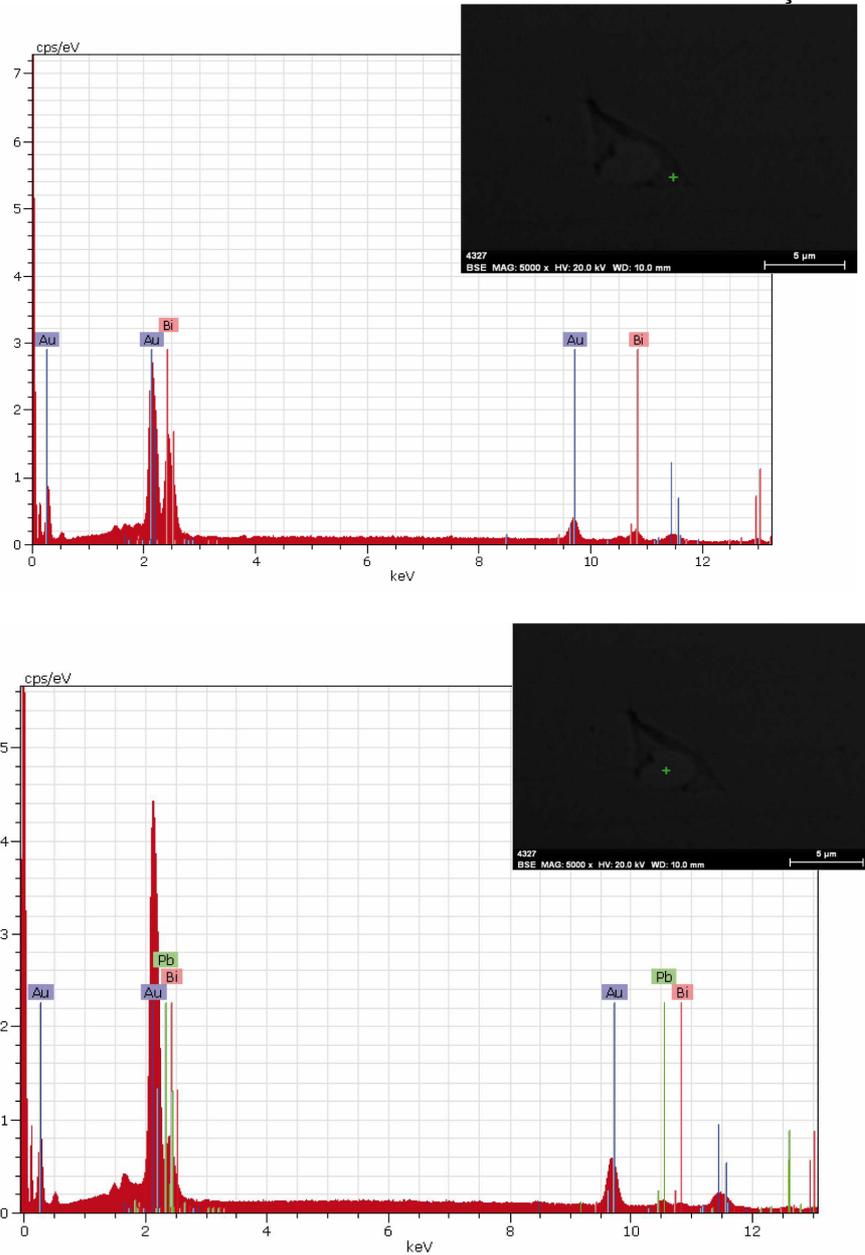


Figure 98 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB d'une micro-inclusion contenant un alliage AuPbBi et AuBi. L'alliage AuPbBi à faible teneur en Pb et Bi apparaît gris lin clair au microscope et est peu distinguable de l'or au MEB. L'alliage AuBi à forte teneur en Bi apparaît gris lin foncé et est visible au MEB. – vu dans l'échantillon A1.

Arsenopyrite(CoNi) ou cobalto-gersdorffite

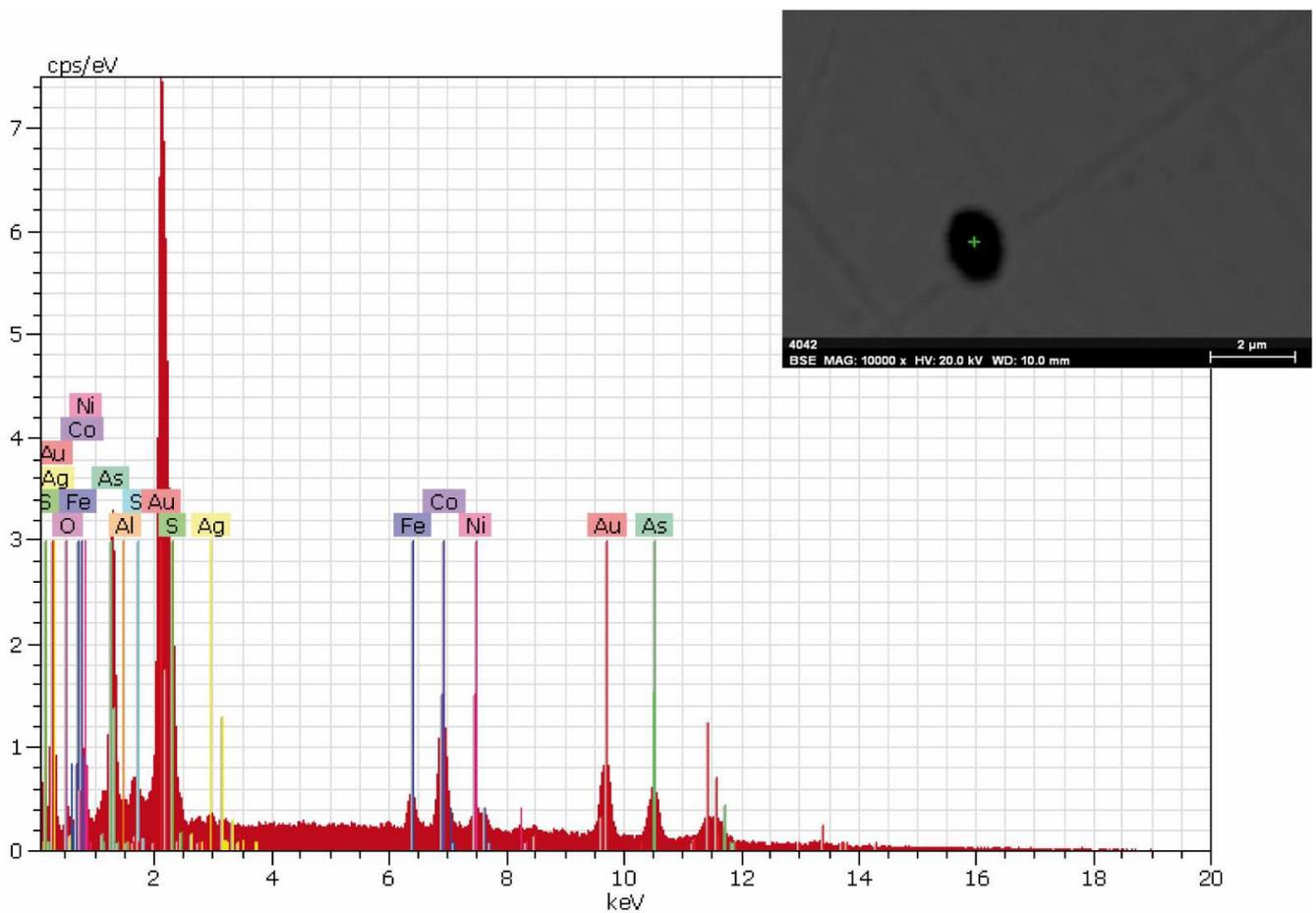
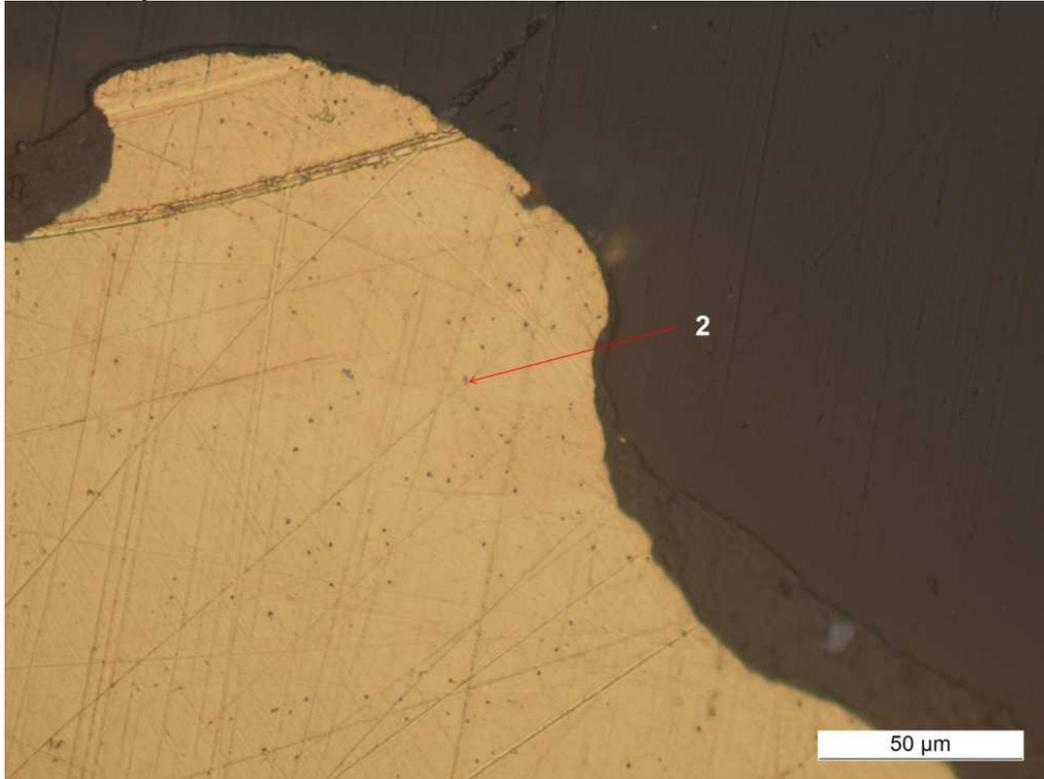


Figure 99 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion de FeCoNiAsS (arsenopyrite(CoNi) ou cobalto-gersdorffite) automorphe. Ces micro-inclusions apparaissent gris clair au microscope et noir au MEB.- vu dans l'échantillon A3.

Galène

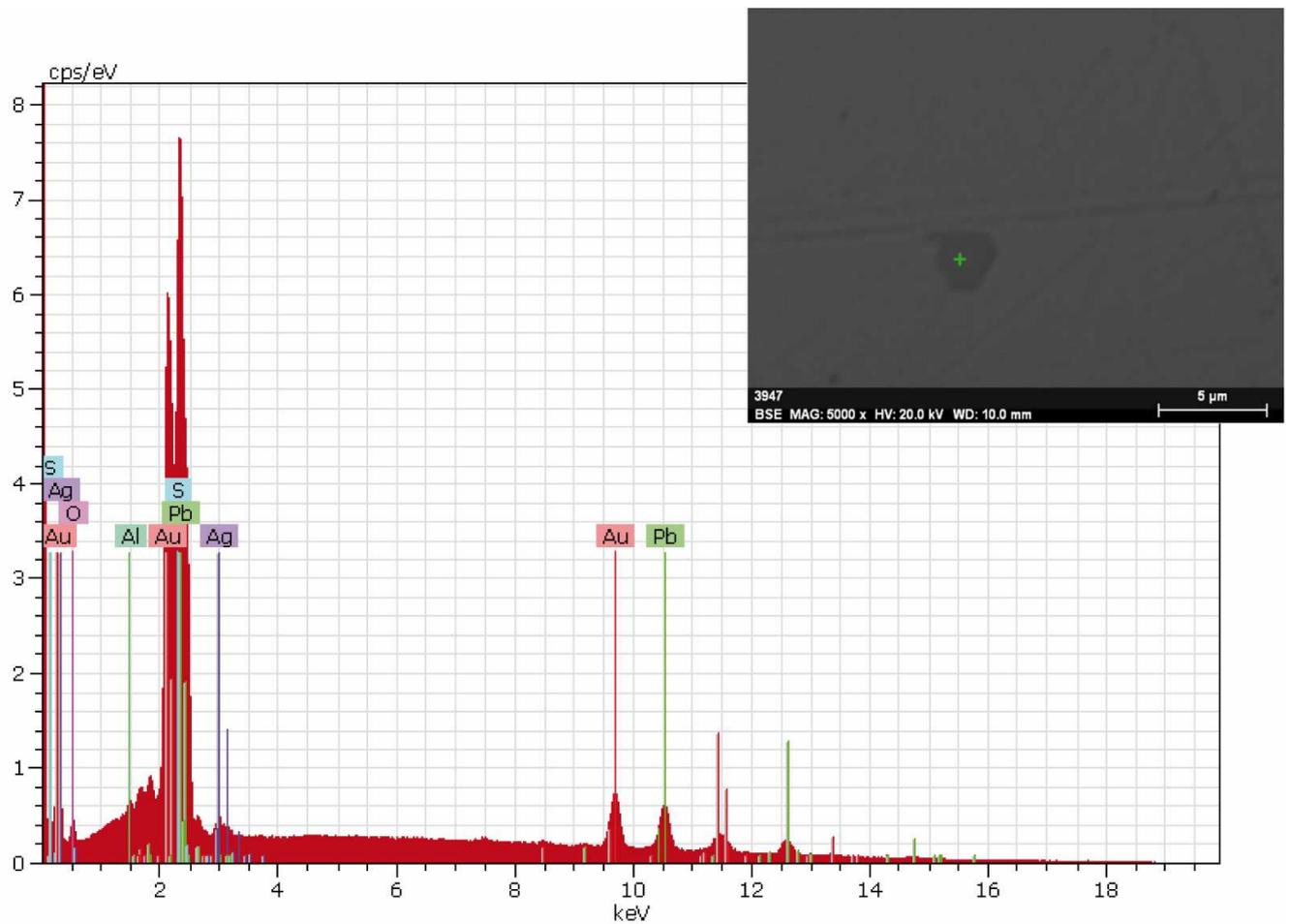
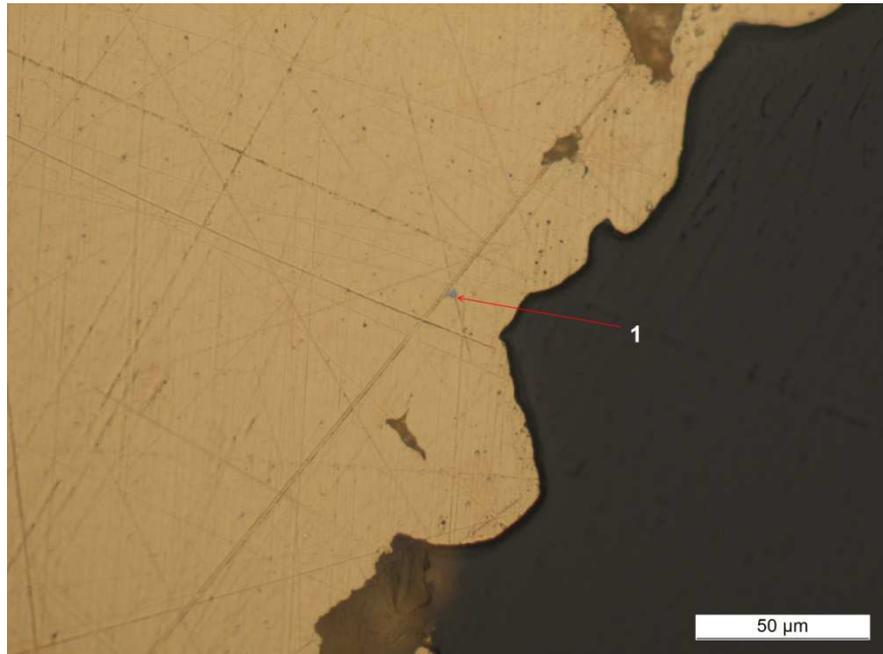


Figure 100 : Photographie au microscope en lumière réfléchie et au MEB et spectre d'une micro-inclusion de galène. Les micro-inclusions de galène apparaissent de couleur gris claire au microscope et sont visibles au MEB.

Arsénopyrite

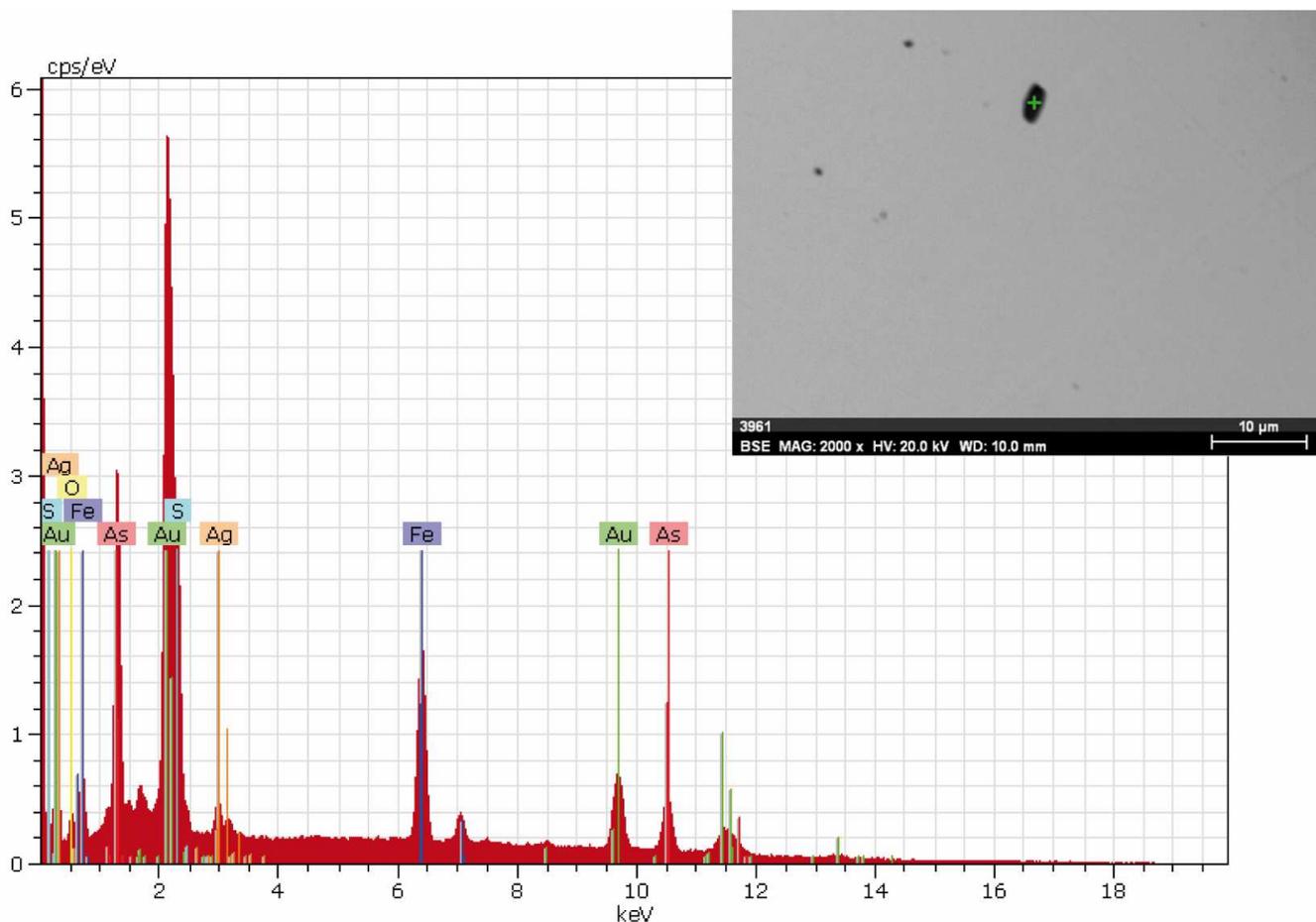
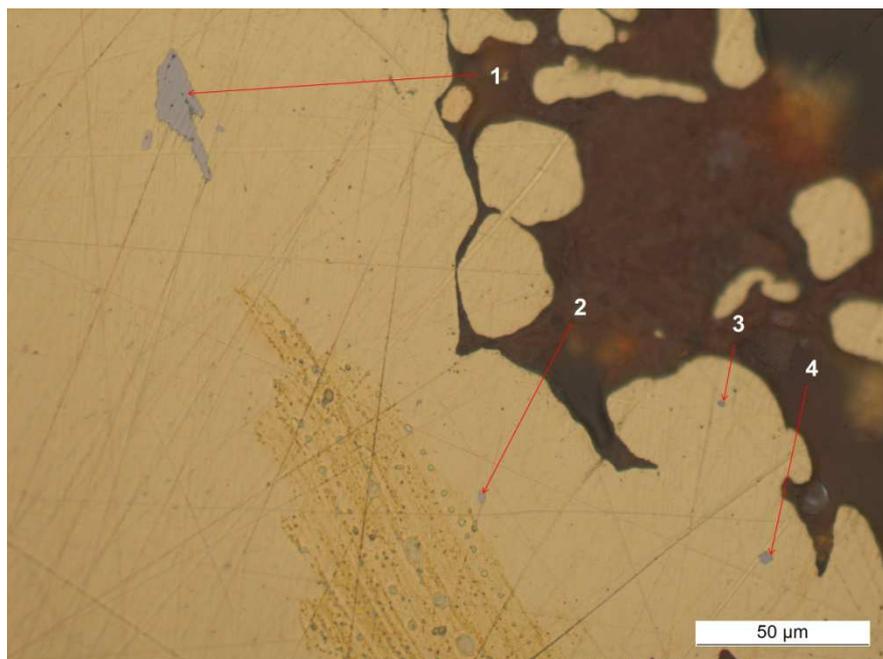


Figure 101 : Photographie de la micro-inclusion n°2 au microscope en lumière réfléchie et spectre d'une micro-inclusion d'arsénopyrite. Les micro-inclusions d'arsénopyrite apparaissent gris clair légèrement violet au microscope et noirs au MEB. Elles sont visuellement difficilement différenciable avec une inclusion de sulfure de fer comme la n° 1 sur la photo au microscope.

Tungstène

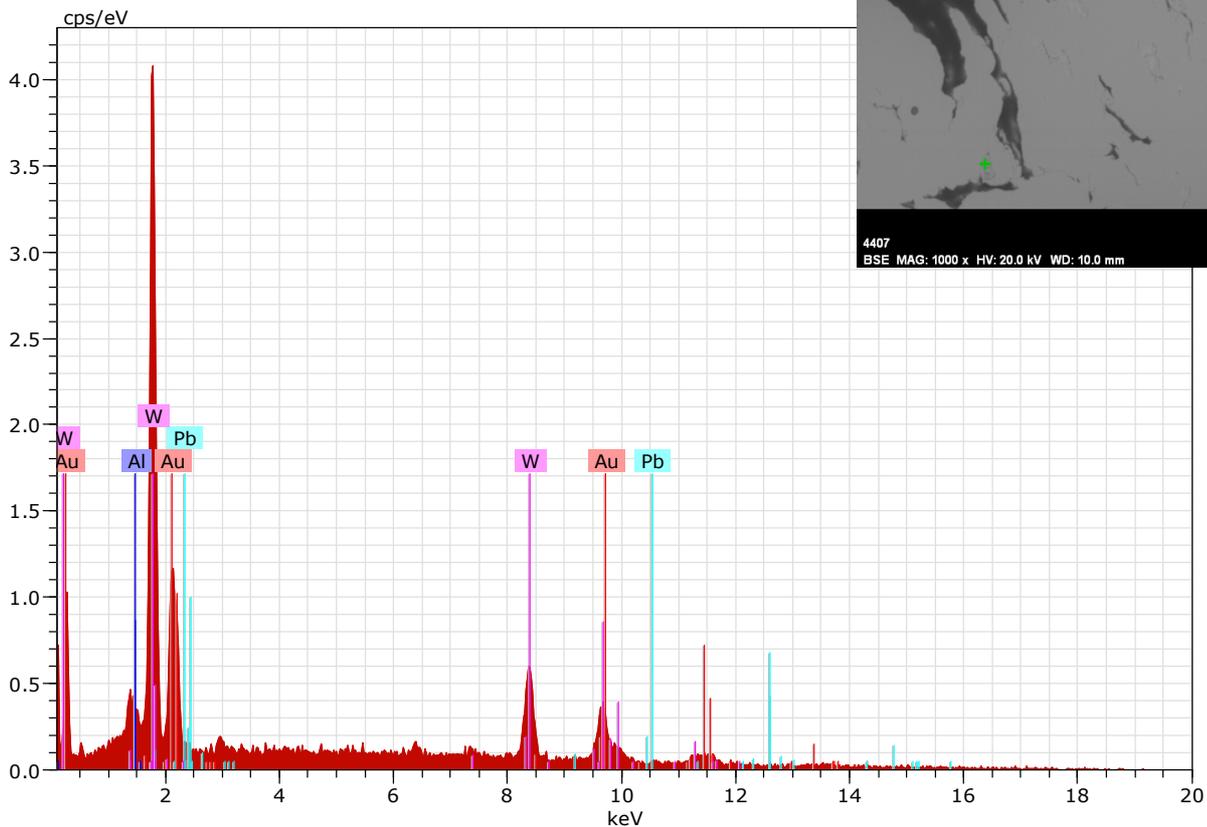
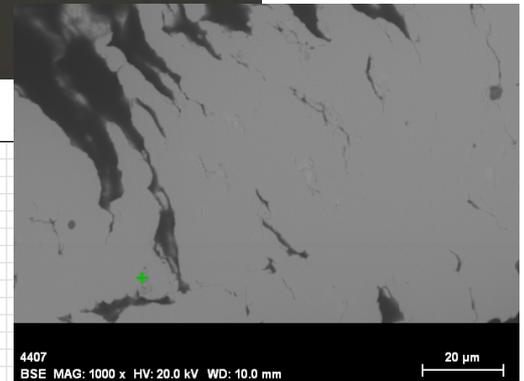


Figure 102 : Photographie en lumière réfléchie et au MEB et spectre de deux micro-inclusions de tungstène (le plomb qui apparaît sur le spectre n'est pas présent dans ces micro-inclusions, l'opérateur l'a inséré par erreur dans le spectre). Le tungstène apparaît blanc en lumière réfléchie et est peu visible au MEB.- vu dans l'échantillon A7bis.

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des observations microscopiques et des signatures de chaque échantillon.

Site	Échantillon	Concentré (C) ou doré (D)	Origine	Nombre de grain étudiés	Nombre total d'inclusions Dans l'échantillon	Nombre de grain avec des inclusions	% de grain ayant des inclusions	Principales inclusions	Signature
Saint-Élie	B6	C	Primaire	41	101	14	34,1 %	41 % Bi 48 % FeO	Bi FeO
Saint-Élie	B5	D	Primaire	1	–	–	–	Veines de Pb et TePb, Quelques FeS	Abondance veines de Pb et TePb
Saint-Élie (Saint Auguste)	A2	C	Primaire	56	51	20	35,7 %	48 % TeBi 43 % FeO	TeBi FeO
Saint-Élie (Saint Auguste)	A1	D	Primaire	1	96	–	–	47 % TePb 20 % FeS 19 % AuPbBi	TePb (FeS) (AuPbBi)
Saint-Élie (Saint Auguste)	A3	C	Éluvionnaire	105	9	7	6,7 %	45 % FeS 30 % FeCoNiAsS 20 % BiTe	Quasi absence d'inclusions
Saint-Élie (Saint Auguste)	A4	D	Éluvionnaire	1	104	–	–	54 % TePb 22 % AuPb 22 % FeS	TePb (AuPb) (FeS)
Dieu-Merci	A8bis	D	Primaire	1	–	–	–	58 % TeBi 25 % FeS	TeBi (FeS)

Traçabilité de l'or en Guyane

Élysée	A7bis	D	Primaire	2	227	–	–	77 % AuPb 18 % FeS	AuPb (FeS)
Montagne Tortue	A5	C	Alluvionnaire	47	53	13	23,4 %	44 % FeS 29 % PbS 19 % FeAsS	FeS PbS FeAsS
Montagne Tortue	A6	D	Alluvionnaire	29	60	14	48,3 %	47 % AuPb 35 % Al	AuPb Al
Crique Marc	A7	C	Alluvionnaire	42	14	6	14 %	43 % PbS 22 % TiFeO	Quasi absence d'inclusions
Crique Marc	A8	D	Alluvionnaire	28	51	13	46,4 %	99 % Al	Al
Crique Marc	B2	C	Alluvionnaire	16	65	13	81,25 %	61 % FeO 22 % TiFe(Mn)O 16 % TiFeO	FeO (TiFe(Mn)O) (TiFeO)
Crique Marc	B1	D	Alluvionnaire						
Dagobert	A9	C	Primaire	52	60	13	25%	82% FeS 12% TiFeO	FeS (TiFeO)
Dagobert	A10	D	Primaire	10	263	9	90%	80% FeS 14% Al	FeS (Al)
Dagobert	B4	C	Primaire	62	38	11	17,7%	34% FeS 16% FeO 13% FeO+TeBi	FeS (FeO) (FeO+TeBi)
Dagobert	B3	D							

Annexe 2 - Résultats des analyses microsonde (sur CD-ROM)

Annexe 3 - Résultats des analyses ICP/MS ablation laser (sur CD-ROM)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr