



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès réservé

Potentiel de récupération de l'or de gisements guyanais par voie gravimétrique

Rapport final

BRGM/RP-72973-FR

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Vérificateur :

Nom : [REDACTED]

Fonction : Chef de projet / Ingénieur
procédés

Date : 39 3740 46 -625 11/08/2023

Approbateur :

Nom : [REDACTED]

Fonction : Responsable d'Unité

Date : 04/09/2023

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

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMqFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés :

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

████████████████████ (2023) – Potentiel de récupération de l'or de gisements guyanais par voie gravimétrique. Rapport final BRGM/RP-72973-FR, 90 p.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-22/09/2022

Synthèse

La production d'or en Guyane provient très majoritairement de l'exploitation, par des petits opérateurs miniers, de gisements alluvionnaires, dans lesquels l'or libéré est récupéré par des procédés minéralurgiques de faible complexité basés sur des opérations de débouillage, de criblage et de séparation sur moquettes. Le complément de production est assuré par l'exploitation de gisements primaires, dans lesquels l'accessibilité de l'or est plus faible du fait notamment de son encapsulation dans des matériaux de gangue, généralement silicatés ou carbonatés, et de sa dissémination sous une forme ultrafine dans diverses phases minéralogiques. Sa récupération à des taux économiquement rentables nécessite alors la mise en œuvre de traitements hydrométallurgiques poussés.

La contribution de l'exploitation des gisements primaires à la production aurifère guyanaise devrait augmenter dans les années à venir, du fait de l'épuisement du stock d'or alluvionnaire. Ceci constitue une menace pour l'écosystème des petits opérateurs et la filière de production. Toutefois, la plupart des gisements primaires présentent des profils d'altération dans lesquels l'or est en partie libéré, et donc potentiellement récupérable selon les mêmes procédés que pour l'or alluvionnaire. Dès lors, les opérateurs pourraient se tourner vers l'exploitation de ces gisements sans modifier significativement leur outil de production.

Dans ce contexte, le Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires, via la DGALN, a commandité au BRGM une étude visant à évaluer ce potentiel de récupération par des procédés minéralurgiques simples pouvant être déployés dans des unités mobiles en forêt amazonienne.

Le présent rapport décrit la démarche mise en œuvre pour caractériser ce potentiel et les résultats obtenus sur trois cas d'application, correspondant à trois minerais échantillonnés sur site. La partie introductive explicite les objectifs techniques et la structuration de la démarche, définis conjointement entre la DGALN et le BRGM. La deuxième partie décrit les démarches mises en œuvre pour l'échantillonnage des minerais, ainsi que les outils et équipements utilisés pour leur caractérisation en termes de composition chimique et minéralogique, et leur traitement par voie minéralurgique. La troisième partie détaille et discute l'ensemble des résultats obtenus, et propose une estimation théorique des rendements potentiels de récupération pour deux des trois minerais échantillonnés. Ces taux de récupération sont de l'ordre 80 à 85 %.

Sommaire

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 11 |
| 1.1. Motivation de l'étude | 11 |
| 1.2. Objectifs techniques et démarche suivie | 12 |
| 2. Matériels et méthodes | 13 |
| 2.1. Echantillonnage..... | 13 |
| 2.2. Préparation et caractérisation des lots | 15 |
| 2.2.1. <i>Préparation des lots</i> | 15 |
| 2.2.2. <i>Caractérisations expérimentales</i> | 23 |
| 2.3. Essais préliminaires de traitement..... | 26 |
| 2.4. Essais de traitement à grande échelle..... | 26 |
| 2.5. Evaluation des erreurs d'échantillonnage..... | 28 |
| 2.5.1. <i>Calcul théorique de l'erreur fondamentale d'échantillonnage</i> | 28 |
| 2.5.2. <i>Calcul empirique sur l'échantillon de Grande Usine</i> | 29 |
| 3. Résultats | 31 |
| 3.1. Echantillonnage..... | 31 |
| 3.1.1. <i>Echantillons de Dieu Merci</i> | 31 |
| 3.1.2. <i>Echantillons de Bélizon</i> | 34 |
| 3.1.3. <i>Echantillons de Grande Usine</i> | 37 |
| 3.1.4. <i>Evaluation des erreurs d'échantillonnage</i> | 40 |
| 3.2. Caractérisations | 43 |
| 3.2.1. <i>Echantillons de Dieu Merci</i> | 43 |
| 3.2.2. <i>Echantillons de Bélizon</i> | 49 |
| 3.2.3. <i>Echantillons de Grande Usine</i> | 52 |
| 3.3. Essais de séparation et de récupération de l'or à petite échelle | 56 |
| 3.3.1. <i>Principe des opérations</i> | 56 |
| 3.3.2. <i>Détails des conditions opératoires</i> | 56 |
| 3.3.3. <i>Résultats et interprétations</i> | 57 |
| 3.3.4. <i>Conclusions intermédiaires</i> | 61 |
| 3.4. Essais de séparation pilote..... | 61 |
| 3.4.1. <i>Objectifs et définition des traitements</i> | 61 |
| 3.4.2. <i>Détails des conditions opératoires</i> | 61 |
| 3.4.3. <i>Résultats et interprétations</i> | 63 |
| 3.4.4. <i>Calculs de rendements théoriques</i> | 69 |
| 4. Conclusions générales | 71 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Localisation des trois sites d'échantillonnage : Dieu Merci (DM), Bélizon (BZ) et Grand Usine (GU). En fond, carte géologique au 1/500 000 de la Guyane (d'après Delor et al., 2001). | 14 |
| Figure 2. Conditionnement des échantillons prélevés pour expédition au BRGM Orléans. | 14 |
| Figure 3. Tamiseuse Chauvin (à droite, posée sur la palette), et un tamis (à gauche) | 15 |
| Figure 4. Echantillonneur à pulpe 12 voies Minemet | 15 |
| Figure 5. Quarteurs à riffles pour le traitement des échantillons..... | 16 |
| Figure 6. Concasseurs utilisés | 16 |
| Figure 7. Broyeurs utilisés..... | 17 |
| Figure 8. Echantillonnage incrémental sur flux..... | 18 |
| Figure 9. Flowsheet général d'échantillonnage du lot prélevé à Dieu Merci | 18 |
| Figure 10. Flowsheet général d'échantillonnage du lot prélevé à Bélizon..... | 19 |
| Figure 11. Flowsheet général d'échantillonnage du lot prélevé à Grande Usine | 19 |
| Figure 12. Protocole de préparation des fractions à -2 mm du lot de Dieu Merci..... | 20 |
| Figure 13. Protocole de préparation des fractions à -2 mm du lot de Bélizon | 21 |
| Figure 14. Protocole de préparation des fractions 2/20 et +20 mm des lots de Dieu Merci et Bélizon..... | 21 |
| Figure 15. Protocole de préparation du sous-lot de Grande Usine pour analyse granulochimique | 22 |
| Figure 16. Protocole de préparation du sous-lot de Grande Usine pour l'analyse de sensibilité | 23 |
| Figure 17. Mise en pulpe avec Hg et agitation | 24 |
| Figure 18. Récupération des billes de mercure par décantation..... | 24 |
| Figure 19. Solutions obtenues après dissolution de l'amalgame en eau régale..... | 25 |
| Figure 20. Table à secousses de laboratoire Mozley | 26 |
| Figure 21. Vue générale d'une table à secousses..... | 27 |
| Figure 22. Aspect de la table à secousses en fin d'essai | 27 |
| Figure 23. Ecoulement de l'alimentation et des produits dans un séparateur Falcon | 28 |
| Figure 24. Schéma de préparation de l'échantillon Dieu Merci et Bélizon | 29 |
| Figure 25. Zone filonienne échantillonnée sur le site de Dieu Merci, ayant été caractérisée par tranchée et sondage par AuPlata Mining Group..... | 31 |
| Figure 26. Localisation des niveaux oxydés à quartz-oxydes de fer au sein de la zone filonienne, montrant des textures cariées à nombreux boxworks, résultant de l'altération de sulfures préexistants. Lors des tests à la batée, ces facies se sont révélés être les plus minéralisés en or | 32 |

| | |
|--|----|
| Figure 27. Facies cariés à quartz, oxyde de fer et pyrite résiduel (échantillon DM06 et DM08). On y observe de nombreuses cavités issues de l'altération de sulfures préexistants, probablement particulièrement abondants initialement dans ce type de facies | 32 |
| Figure 28. Prélèvement de l'échantillon DM01 sur le site de Dieu Merci. L'échantillonnage a consisté à effectuer un prélèvement composite sur la largeur de la zone filonienne | 33 |
| Figure 29. Détail des travaux clandestins référencés sur site. La zone échantillonnée dans le cadre du projet est représentée en jaune | 34 |
| Figure 30. Ancien puit opéré par les orpailleurs illégaux dans le cadre de l'exploitation clandestine du site | 35 |
| Figure 31. Observation à l'affleurement de la structure filonienne échantillonnée..... | 35 |
| Figure 32. Zone de prélèvement de l'échantillon BZ01 | 35 |
| Figure 33. Test à la batée, confirmant la présence d'or libre en quantité significative dans le matériel échantillonné | 36 |
| Figure 34. Gauche: échantillonnage du matériel minéralisé en sac de 30 kg. Droite : vue du minerai échantillonné, constitué d'un mélange de matériel argileux et de blocs de quartz résiduel | 36 |
| Figure 35. Blocs de quartz résiduel échantillonnés pour effectuer des analyses complémentaires | 37 |
| Figure 36. Puit d'orpaillage illégal sur le site de Grand Usine, permettant l'exploitation en souterrain des veines et des filons de quartz aurifère..... | 38 |
| Figure 37. Carte de synthèse du site de Grand Usine fournie par l'EMOPI. Les tas de quartz échantillonnés sont représentés en rouge | 39 |
| Figure 38. Photos des 4 tas prélevés, constituant l'échantillon global GU01 sur Grande Usine | 40 |
| Figure 39. Arbre d'échantillonnage de Grande Usine réalisé pour le calcul d'incertitude | 42 |
| Figure 40. Contribution de chaque étape à la variance totale | 42 |
| Figure 41. Répartition granulométrique après broyage – échantillon de Dieu Merci | 44 |
| Figure 42. Teneurs en or dans les fractions, échantillon de Dieu Merci (tirets oranges : teneur moyenne 5,2 ppm) | 44 |
| Figure 43. Répartition de l'or dans les fractions, échantillon de Dieu Merci | 45 |
| Figure 44. Pourcentage d'or libre obtenu par amalgamation, échantillon de Dieu Merci..... | 45 |
| Figure 45. Répartition des principaux oxydes, échantillon de Dieu Merci. Oxydes identifiés : CaO, K ₂ O, MgO, Na ₂ O, MnO, P ₂ O ₅ , TiO ₂ . (-) : valeur négative | 46 |
| Figure 46. Grains d'or associés à des oxydes de fer de remplacement de la pyrite et en inclusion dans la pyrite, échantillon de Dieu Merci. Echelle du microscope : 50 µm. | 47 |
| Figure 47. Quelques clichés MEB sur lames minces – Echantillons de Dieu Merci | 48 |
| Figure 48. Composition chimique aux spots 4 et 10 (localisation sur les clichés de la Figure 47) | 48 |
| Figure 49. Répartition granulométrique après broyage – échantillon de Bélizon..... | 49 |
| Figure 50. Teneurs en or dans les fractions, échantillon de Bélizon (tirets oranges : teneur moyenne 53 ppm) | 50 |
| Figure 51. Masse et répartition de l'or dans les fractions, échantillon de Bélizon..... | 50 |

| | |
|---|----|
| Figure 52. Répartition des principaux oxydes, échantillon de Bélizon. Oxydes identifiés : CaO, K ₂ O, MgO, Na ₂ O, MnO, P ₂ O ₅ , TiO ₂ . (-) : valeur négative..... | 51 |
| Figure 53. Cliché MEB sur lames minces et spectre EDS correspondant au spot 82 – Echantillon de Bélizon | 51 |
| Figure 54. Répartition granulométrique après broyage – échantillon de Grande Usine | 53 |
| Figure 55. Teneurs en or dans les fractions, échantillon de Grande Usine (tirets : teneur moyenne à 75 ppm) | 53 |
| Figure 56. Masse et répartition de l'or dans les fractions, échantillon de Grande Usine | 54 |
| Figure 57. Répartition des principaux oxydes, échantillon de Grande Usine. Oxydes identifiés : CaO, K ₂ O, MgO, Na ₂ O, MnO, P ₂ O ₅ , TiO ₂ . (-) : valeur négative. bdl : sous le seuil de détection. | 54 |
| Figure 58. Gauche : grains d'or en association avec différentes espèces de tellurures, échantillon Grande Usine. Droite : grains d'or en association avec les oxydes de fer. Echelle 50 µm..... | 55 |
| Figure 59. Cliché MEB sur lames minces – Echantillon de Grande Usine | 55 |
| Figure 60. Répartition de l'or à l'issue du premier (gauche) et du second (droite) passage, Dieu Merci..... | 58 |
| Figure 61. Répartition de l'or à l'issue du premier (gauche) et du second (droite) passage, Bélizon | 58 |
| Figure 62. Répartition de l'or à l'issue du premier (gauche) et du second (droite) passage, Grande Usine | 58 |
| Figure 63. Répartition de l'or à l'issue des deux passages..... | 59 |
| Figure 64. Ségrégation des particules sous l'effet de secousses horizontales | 60 |
| Figure 65. Répartition de l'or à l'issue du premier tablage des échantillons Bélizon | 64 |
| Figure 66. Répartition de l'or à l'issue du premier tablage des échantillons Dieu Merci..... | 64 |
| Figure 67. Récupération de l'or à l'issue du second tablage..... | 65 |
| Figure 68. Récupérations de l'or dans les fractions "Légers" et "Lourds" obtenues par séparation centrifuge..... | 68 |
| Figure 69. Schéma global de traitement des fractions Bélizon et Dieu Merci | 69 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Liste et caractéristiques des échantillons prélevés sur le site de Dieu Merci | 33 |
| Tableau 2. Liste et caractéristiques des échantillons prélevés sur le site de Bélizon..... | 37 |
| Tableau 3. Liste et caractéristiques des échantillons prélevés sur le site de Grand Usine | 38 |
| Tableau 4. Erreurs fondamentales d'échantillonnage de la préparation des échantillons de Dieu Merci et Bélizon | 41 |
| Tableau 5. Erreurs fondamentales d'échantillonnage de la préparation des échantillons de Grande Usine..... | 41 |
| Tableau 6. Erreurs fondamentales d'échantillonnage d'une préparation générique des laboratoires d'analyse | 41 |

| | |
|--|----|
| Tableau 7. Valeur moyenne, déviation standard, variance calculées à partir de l'arbre d'échantillonnage | 42 |
| Tableau 8. Erreurs fondamentale et empirique d'échantillonnage de l'arbre d'échantillonnage sur Grande Usine | 43 |
| Tableau 9. Synthèse des teneurs en or et quelques éléments majeurs et traces après analyse sur minerai brut des échantillons prélevés sur le site de Dieu Merci | 43 |
| Tableau 10. Synthèse des teneurs en or et en quelques éléments majeurs et traces après analyse sur minerai brut des échantillons prélevés sur le site de Bélizon | 49 |
| Tableau 11. Synthèse des teneurs en or et en quelques éléments majeurs et traces après analyse sur minerai brut des échantillons prélevés sur le site de Grand Usine | 52 |
| Tableau 12. Masses traitées et formées lors des essais de séparation gravimétrique sur table Mozley..... | 57 |
| Tableau 13. Teneurs en or initiale et par fraction produite par tablage Mozley | 57 |
| Tableau 14. Valeurs des paramètres pour la table Wilfley, 1 ^{er} passage..... | 62 |
| Tableau 15. Valeurs des paramètres pour la table Wilfley, 2 nd passage | 62 |
| Tableau 16. Détail des conditions opératoires des essais de séparation centrifuge..... | 63 |
| Tableau 17. Masses récupérées à l'issue des essais de tablage Wilfley, 1 ^{er} passage | 63 |
| Tableau 18. Teneurs et récupération à l'issue des essais de tablage Wilfley, 1 ^{er} passage. ⁽¹⁾ teneur recalculée..... | 63 |
| Tableau 19. Masses récupérées à l'issue des essais de tablage Wilfley, 2 nd passage..... | 65 |
| Tableau 20. Teneurs et récupérations à l'issue des essais de tablage Wilfley, 2 nd passage. ⁽¹⁾ teneur recalculée..... | 65 |
| Tableau 21. Teneurs et récupérations théoriques après les deux étapes de tablage..... | 67 |
| Tableau 22. Récupérations dans les Lourds aux différentes étapes de tablage. ⁽¹⁾ Calculée à partir des résultats des essais présentés en Tableau 18 | 67 |
| Tableau 23. Teneurs et récupérations à l'issue des essais de séparation centrifuge. ⁽¹⁾ Teneur recalculée..... | 68 |
| Tableau 24. Masses, teneurs et récupérations associées aux fractions produites par les différentes étapes de séparation, cas de Dieu Merci. n.a. : non applicable..... | 70 |
| Tableau 25. Masses, teneurs et récupérations associées aux fractions produites par les différentes étapes de séparation, cas de Bélizon. n.a. : non applicable. (1): voir texte ci-dessous | 70 |

Liste des annexes

| | | |
|----------|--|----|
| Annexe 1 | Analyse granulochimique des échantillons | 73 |
| Annexe 2 | Spectres DRX des échantillons | 85 |

1. Introduction

1.1. MOTIVATION DE L'ETUDE

La production d'or en Guyane repose à 90 % sur des gisements secondaires alluvionnaires, exploités par un écosystème de petits opérateurs selon des opérations mobiles de faible complexité, qui associent principalement débouillage, criblage du minerai et récupération de l'or par voie gravimétrique. Le complément de production est assuré par l'exploitation de gisements primaires, dans lesquels l'or, associé chimiquement à d'autres éléments dans des phases minéralogiques, ne peut être récupéré que par des traitements hydrométallurgiques complexes mis en œuvre dans des usines. Parmi ces traitements, le plus répandu consiste à lixivier l'or par un réactif cyanuré en milieu alcalin, à extraire sélectivement l'ion dicyanoaurate formé, par adsorption sur des résines ou des particules de charbon actif, puis, après élution, à le réduire sous forme d'or métal par électrodéposition cathodique, et enfin, à l'affiner par fusion à haute température.

La contribution des procédés hydrométallurgiques à la production aurifère guyanaise devrait augmenter dans les années à venir, du fait de l'épuisement progressif du stock d'or alluvionnaire¹. Or, ce type de procédé se révèle plus coûteux que les opérations mobiles de récupération, du fait notamment d'investissements plus lourds dans des usines et des infrastructures logistiques, et de coûts opératoires plus élevés, liés notamment à la mise en œuvre, à la maîtrise et au suivi d'opérations technologiquement plus complexes. A terme, ceci pourrait donc limiter le développement économique de la filière aurifère guyanaise.

La plupart des gisements primaires en Guyane présentent des profils d'altération caractérisés par l'existence d'une couche surfacique de plus ou moins grande épaisseur, dans laquelle une partie de l'or se trouve libérée et mélangée aux divers produits de décomposition de phases minéralogiques, à du quartz et à des argiles. Dès lors, cette fraction d'or pourrait potentiellement être récupérée par des traitements minéralurgiques proches dans leur principe de ceux utilisés pour l'or alluvionnaire. Ceci permettrait non seulement de diminuer le coût global de récupération de l'or dit primaire, en en extrayant une partie par des technologies moins coûteuses que des opérations hydrométallurgiques, mais également, par le déploiement d'unités mobiles de traitement, d'exploiter des gisements difficilement accessibles, pour lesquels le transport d'échantillons vers une usine de traitement hydrométallurgique rend le procédé non rentable.

Dans le cadre de la politique menée par le MTE-CT pour structurer une filière aurifère en Guyane, la DGALN souhaite ainsi étudier la possibilité de développer des chaînes de traitement mobiles adaptées à ce type de minerai, qui présenteraient des rendements économiques permettant d'accroître les surfaces exploitables et ainsi d'augmenter les réserves en or du territoire guyanais. L'étude vise également à apporter des compétences aux petits acteurs miniers, pour leur permettre d'exploiter les gisements primaires altérés, et ce faisant, de favoriser l'exploitation de sites aurifères par des acteurs légaux, inscrivant ainsi l'action dans le cadre de la lutte contre l'orpaillage illégal.

¹ L'exploitation de l'or alluvionnaire en Guyane : synthèse des techniques employées, recommandations et alternatives. BRGM/RP-67564-FR

1.2. OBJECTIFS TECHNIQUES ET DEMARCHE SUIVIE

Du point de vue technique, la mise en œuvre de la récupération de l'or dans des unités mobiles en contexte guyanais oriente le choix des traitements vers des opérations unitaires de minéralurgie, plus robustes et plus aisément pilotables que des opérations d'hydrométallurgie. L'objectif global de l'étude est ainsi de définir des opérations unitaires adaptées aux spécificités de ces couches primaires altérées et d'évaluer les rendements potentiels de ces opérations. Compte-tenu de la différence importante de densité entre l'or et les autres minéraux présents dans le minerai traité, le choix naturel pour ces opérations se porte vers des techniques gravimétriques, statiques ou centrifuges. L'évaluation des rendements de récupération nécessite de travailler avec des quantités de matière de l'ordre de quelques kilogrammes, ce qui implique de conduire une étape pilote de traitement au cours de l'étude.

La démarche technique comporte ainsi quatre étapes principales :

- Etape 1 : échantillonner sur site les quantités de minerai nécessaires pour les essais de concentration, à échelle laboratoire et à échelle pilote ;
- Etape 2 : préparer les échantillons pour les caractérisations chimiques et minéralogiques, réalisées au centre scientifique et technique du BRGM à Orléans ;
- Etape 3 : réaliser des essais préliminaires de concentration gravimétrique à petite échelle ;
- Etape 4 : réaliser des essais d'enrichissement à une échelle pilote, en vue de définir une chaîne de traitement adaptées aux sites considérés. Les méthodes évaluées dans l'étude sont l'utilisation le tablage et la séparation gravimétrique centrifuge.

Après concertation avec le MTE-CT, trois sites sont considérés dans l'étude : deux sites pour lesquels la société Amazone Gold (site de Bélizon) et le groupe AuPlata Mining Group (site de Dieu Merci) disposent d'un permis d'exploitation, et un site d'orpaillage illégal abandonné par les garimpeiros à la suite de l'intervention des forces armées françaises (Grande Usine). Le site de Bélizon est exploité pour l'or de couches altérées, selon un procédé reposant principalement sur l'utilisation de rampes de lavage équipées de moquettes. Le site de Dieu Merci est exploité par un procédé hydrométallurgique de cyanuration, appliqué pour l'heure sur un stock historique de résidus miniers. Les prélèvements sur ces deux sites seront donc représentatifs de minerais altérés par les conditions météoritiques. Enfin, les échantillons du site de Grande Usine ont été extraits du sous-sol par les orpailleurs illégaux et laissés en tas à la surface.

2. Matériels et méthodes

Cette partie présente la démarche d'échantillonnage sur site, les procédures de préparation et de caractérisation des lots, ainsi les procédés de traitement mis en œuvre pour la récupération de l'or.

2.1. ECHANTILLONNAGE

La phase d'échantillonnage a consisté à se procurer du minerai aurifère primaire altéré présentant des teneurs significatives en or et en quantité conséquente, afin de réaliser des tests de récupération gravimétrique. Trois sites ont été sélectionnés, et échantillonnés au cours d'une mission dédiée (Figure 1) :

- le site de **Dieu Merci** (DM), situé au niveau de la ceinture volcano-sédimentaire nord-guyanaise et opéré par la société AUPLATA, constituant un des sites historiques de l'exploitation aurifère en Guyane ;
- le site de **Belizon** (BZ), situé au sein du PER de la société AMAZONE GOLD, le long de la route de Bélizon et où des travaux clandestins en primaire altéré ont été identifiés ;
- le site de **Grand-Usine** (GU), localisé au niveau de la ceinture centre-guyanaise, reconnu comme un des sites majeurs de l'orpaillage illégal primaire et où de nombreux travaux souterrains par puits et galeries sont référencés. Lors de la mission d'échantillonnage, le site était occupé par les Forces Armées de Guyane depuis plusieurs mois, suite à une opération de destruction dans le cadre de la LCOI (Lutte Contre l'Orpaillage Illégal).

La mission a été réalisée du 04 au 15 avril 2022. Sur place, l'équipe de mission a été appuyée par la Direction Régionale du BRGM à Cayenne et a profité, pour intervenir sur chacun des sites, de l'appui logistique et organisationnel des différents partenaires ayant collaboré au projet : AUPLATA pour le site de Dieu Merci, AMAZONE GOLD pour celui de Bélizon et enfin les Forces Armées de Guyane et l'EMOPI² pour l'intervention sur le site de Grand-Usine.

Sur ces sites, 3 échantillons principaux ont été prélevés, conditionnés puis expédiés au Centre Scientifique et Technique du BRGM à Orléans pour effectuer les différents tests de séparation (Figure 2) :

- un échantillon d'environ 1 tonne (**DM01**) sur le site de Dieu Merci ;
- un échantillon d'environ 1 tonne (**BZ01**) sur le site de Bélizon ;
- un échantillon d'environ 180 kg (**GU01**) sur le site de Grand-Usine.

En parallèle, des échantillons de quartz individuels de plus petite taille (1 à 5 kg) ont également été prélevés sur chacun des sites afin de réaliser des analyses complémentaires, à savoir :

- évaluer les teneurs en or et en éléments en traces du minerai brut ;
- réaliser des études pétrographiques sur lame mince afin de déterminer précisément les paragenèses minérales.

² EMOPI : Etat-major de lutte contre l'orpaillage et la pêche illicite

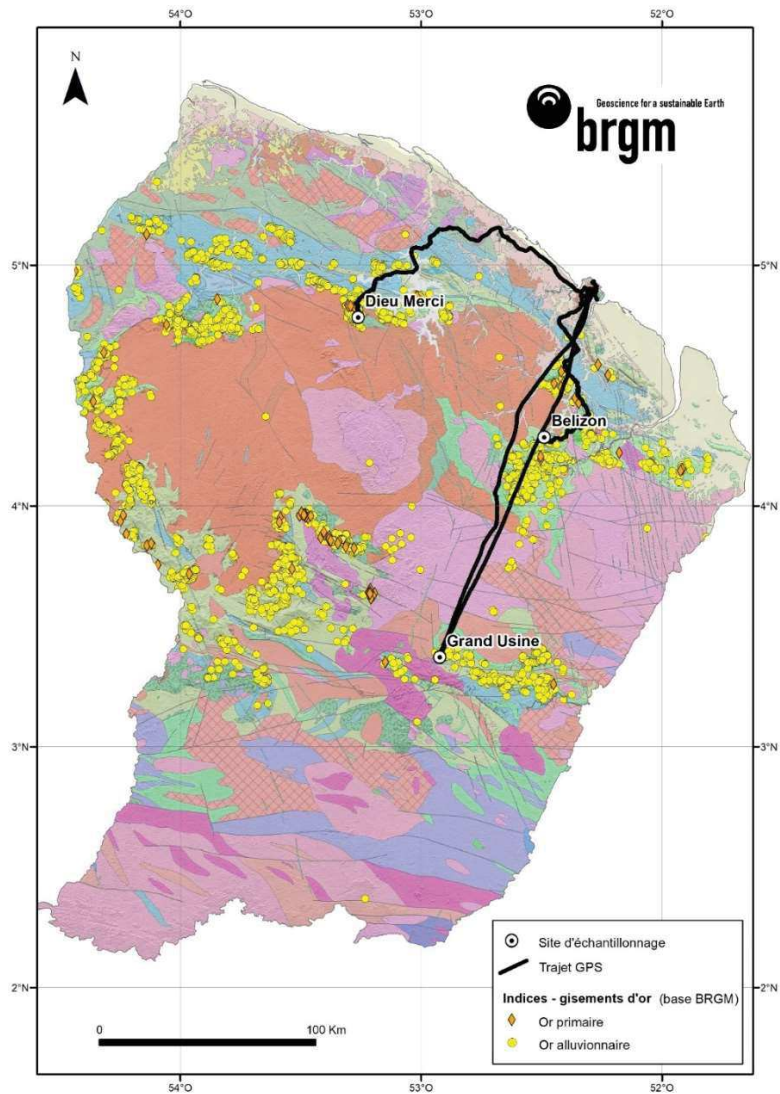


Figure 1 : Localisation des trois sites d'échantillonnage : Dieu Merci (DM), Bélizon (BZ) et Grand Usine (GU). En fond, carte géologique au 1/500 000 de la Guyane (d'après Delor et al., 2001³).



Figure 2. Conditionnement des échantillons prélevés pour expédition au BRGM Orléans.

³ Delor C., Lahondère D., Egal E., Marteau P. (2001) - Carte géologique de la France à 1/500 000, Département de la Guyane, 2^{ème} édition. BRGM.

2.2. PREPARATION ET CARACTERISATION DES LOTS

Le BRGM a réceptionné le 21/06/2022 à sa plateforme de traitement minéralurgique PLAT'INN à Orléans les lots prélevés sur les 3 sites de l'étude entre le 04 et le 15/04/2022. La préparation de ces lots consiste en une première étape d'échantillonnage pour former des sous-lots, puis en une seconde étape de traitement de ces sous-lots pour former des échantillons dédiés à la caractérisation granulochimique et minéralogique.

2.2.1. Préparation des lots

a) Equipements mis en œuvre

Tamisage

Les opérations de tamisage sont effectuées en voie humide sur une tamiseuse Chauvin équipée de tamis de 20, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 et 0.063 mm. La tamiseuse a un diamètre de 600 mm (Figure 3). De l'eau est ajoutée pour laver les particules grossières des fines.



Figure 3. Tamiseuse Chauvin (à droite, posée sur la palette), et un tamis (à gauche)

Mise en pulpe et Echantillonnage

La mise en pulpe est réalisée dans une cuve, en ajustant la quantité d'eau pour atteindre des taux de solide de l'ordre de 30 %, puis l'ensemble est mis sous agitation et pompé vers un échantillonneur à pulpe 12 voies (Figure 4), afin de produire des fractions homogènes.



Figure 4. Echantillonneur à pulpe 12 voies Minemet

Quartage

Le quartage est réalisé au moyen de quarteurs à raffles (Figure 5).



Diviseur à raffles 60 mm et 30 mm



Diviseur à raffles

Figure 5. Quarteurs à raffles pour le traitement des échantillons

Concassage

Trois concasseurs ont été utilisés pour les opérations de préparation : deux concasseurs à mâchoires (marques TEMA SIEBTECHNIK EB 200 × 125 et Pinette) comme concasseurs primaires pour les blocs les plus grossiers des prélèvements de Dieu Merci et pour la réduction de taille des prélèvements de Grande Usine, et un concasseur à cône comme concasseur secondaire sur le prélèvement de Grande Usine (Figure 6).

Les concasseurs à mâchoires sont constitués d'une mâchoire fixe et d'une mâchoire mobile. L'échantillon est introduit dans la partie supérieure de l'équipement et descend par gravité. La partie mobile est entraînée en rotation par une bielle excentrique, ce qui permet d'associer un mouvement latéral de compression des blocs par les deux mâchoires en regard l'une de l'autre, à un mouvement de haut en bas pour faciliter le convoyage du matériau concassé vers l'évacuation au bas de l'équipement.

Le concasseur à cône (ou giratoire) est un modèle de SIEBTECHNIK (KM65). Il est composé d'une chambre de broyage fixe circulaire et d'un corps tronconique mobile. Un mouvement circulaire est imposé au cône interne par une tige excentrique. La réduction de taille se fait par écrasement dans l'espace s'ouvrant et se fermant entre la paroi interne de la chambre et le cône lors du mouvement de ce dernier. L'écartement entre le cône et le blindage est réglable, entre 2 et 10 mm.



Concasseur à mâchoire
TEMA SIEBTECHNIK EB 200 x 125



Concasseur à mâchoire
Pinette SIEBTECHNIK EB 200 x 125



Concasseur à cône SIEBTECHNIK KM65

Figure 6. Concasseurs utilisés

Broyage

Deux types de broyeurs, à meule et planétaire, ont été utilisés sur les trois prélèvements de l'étude pour la réduction de granulométrie à 150 μm puis à 80 μm (Figure 7).



Broyeur à meule SIEBTECHNIK TEMA SBM 200



Broyeur planétaire SIEBTECHNIK

Figure 7. Broyeurs utilisés

L'étape de réduction de taille des échantillons de Grande Usine a nécessité la mise en place d'un système d'aspiration de poussière au niveau des broyeurs, et l'utilisation d'équipements de protection respiratoire avancés (masques de norme FFP3) pour éviter l'inhalation de particules micrométriques de silice cristalline.

b) Echantillonnage

Les lots de chacun des trois sites sont regroupés et homogénéisés, puis divisés en sous-lots représentatifs selon un protocole d'échantillonnage probabiliste, pour que chaque particule d'or ait une probabilité égale d'être retenue lors de l'échantillonnage. Le protocole diffère selon la nature, et donc l'origine, des lots.

Prélèvements du site de Dieu Merci

Les prélèvements du site de Dieu Merci semblent d'aspect relativement homogène, avec toutefois une distribution de taille des constituants relativement étendue. L'or pouvant être localisé dans les blocs de roches comme dans les fractions fines altérées, il est important de conserver des proportions granulométriques similaires dans les échantillons de travail. Pour cela, les éléments les plus grossiers, ceux dont l'une des dimensions est supérieure à 15 cm environ, sont tout d'abord retirés manuellement, puis concassés grossièrement à -2 cm, et réintroduits dans le lot global constitué de l'ensemble des prélèvements.

Ce lot global subit ensuite un échantillonnage incrémental réalisé sur flux : placé dans une trémie, il est déchargé progressivement à vitesse constante sur une bande transporteuse, et des prélèvements incrémentaux sont réalisés en jetée de bande (Figure 8).



Trémie d'alimentation et bande transporteuse



Prélèvement de 10 incréments

Figure 8. Echantillonnage incrémental sur flux

Le débit massique moyen en sortie de la bande est déterminé par pesée lors d'un premier passage de l'intégralité de l'échantillon, ce qui permet de définir la durée et le pas de prise pour former un échantillon de masse cible en 10 prélèvements. A titre d'exemple pour former un échantillon composite d'une cinquantaine de kg (Figure 9) pour le lot de Dieu Merci, l'échantillonnage incrémental a été réalisé avec un débit de 28,4 kg/min, un pas de temps entre deux prélèvements de 20 secondes, une durée de prélèvement de 10 secondes, et un nombre d'incrément par échantillon de 10.

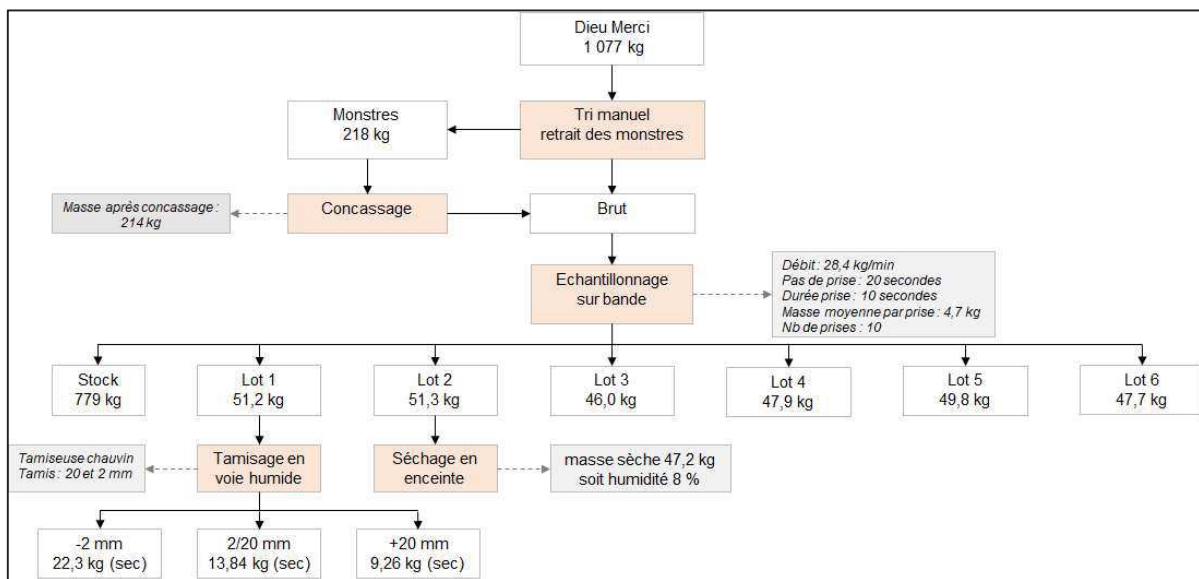


Figure 9. Flowsheet général d'échantillonnage du lot prélevé à Dieu Merci

Par la suite, un des lots composites est tamisé en voie humide à 2 et 20 mm.

Prélèvements du site de Bélizon

La préparation des lots pour caractérisation et essais à partir des prélèvements effectués à Bélizon suit le même protocole que celui de Dieu Merci, à l'exception de l'étape de prétraitement de constituants de trop grande dimension, ceux-ci étant inexistant dans les prélèvements. La Figure 10 représente l'ensemble du schéma d'échantillonnage pour Bélizon.

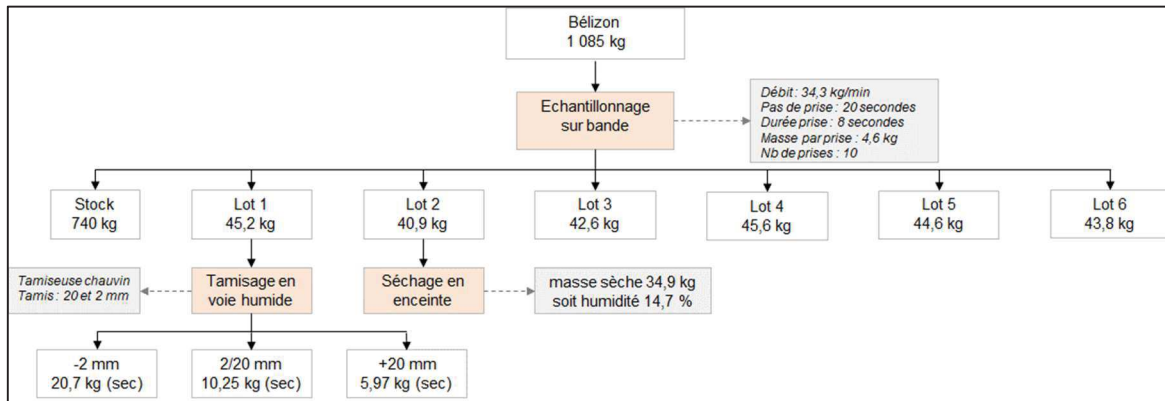


Figure 10. Flowsheet général d'échantillonnage du lot prélevé à Bélizon

Pour le cas de Bélizon, le débit massique de la bande de $34,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ impose une durée de prise de 8 secondes et un pas de prise de 20 s pour former des lots d'environ 45 kg en 10 prélèvements.

Prélèvements du site de Grande Usine

La matière prélevée sur le site de Grande Usine est constituée très majoritairement de blocs de quartz, parfois recouverts d'une fine couche de roche altérée. La procédure d'échantillonnage incrémental présente peu d'intérêt pour ce type de matériau. Le matériau est lavé pour décoller les couches surfaciques d'altérites, puis la pulpe obtenue est tamisée à 2 et 20 mm. La fraction grossière (+ 20 mm) est constituée de blocs de quartz propres, dont la dureté a imposé la mise en place d'un protocole séquentiel de concassage pour diminuer leur taille à -1 mm.

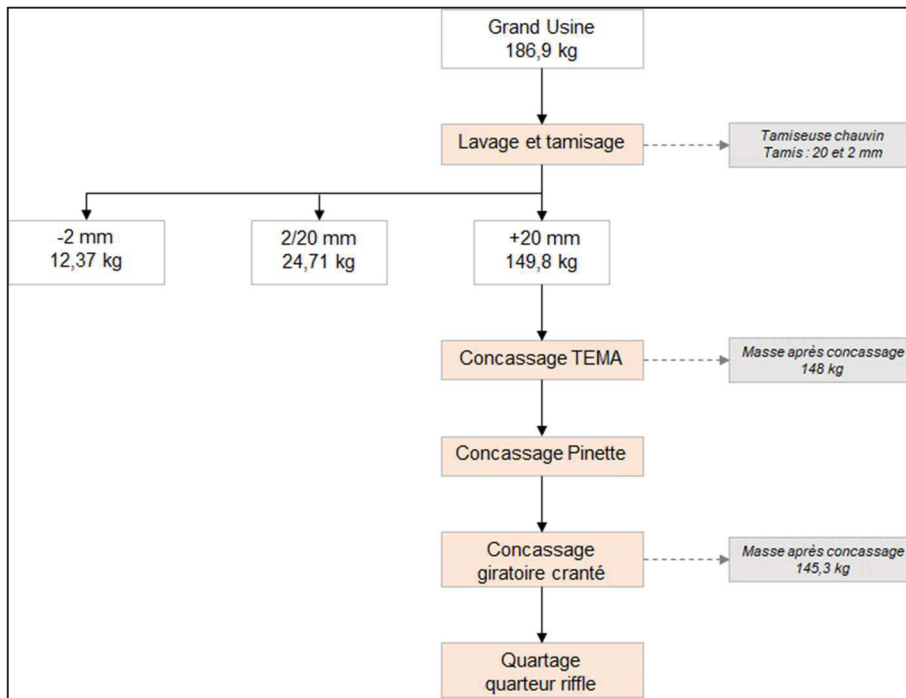


Figure 11. Flowsheet général d'échantillonnage du lot prélevé à Grande Usine

c) Préparation des fractions pour analyses

Prélèvements des sites de Dieu Merci et Bélizon

Pour les sites de Dieu Merci et Bélizon, un lot produit par la procédure d'échantillonnage a été tamisé à 2 et 20 mm, produisant trois fractions : -2 mm, 2/20 mm et +20 mm (voir section précédente). Les fractions à -2 mm sont tamisées en voie humide aux seuils de coupure suivants : 63 µm, 125 µm, 250 µm, 500 µm et 1 mm. Chacune de ces sous-fractions est quartée, de façon à produire un lot pour des analyses chimiques, un lot pour des analyses des teneurs en or libre par amalgamation, et le reste des lots comme stock.

Pour les analyses chimiques, il est nécessaire de réduire la granulométrie à -80 µm de façon à augmenter l'homogénéité des échantillons (et par là limiter les effets pépitiques), et à libérer les éléments inclus dans des phases minéralogiques réfractaires aux traitements chimiques mis en œuvre par l'analyse. Cette granulométrie est atteinte en deux étapes de broyage en voie sèche, d'abord par un broyage à meule puis par un broyage planétaire. Les analyses de composition incluent des analyses chimiques et par amalgamation, détaillées dans la section 2.2.2 du rapport. Les Figure 12 et Figure 13 représentent les schéma de préparation des échantillons à partir de la fraction -2 mm, respectivement pour les sites de Dieu Merci et de Bélizon.

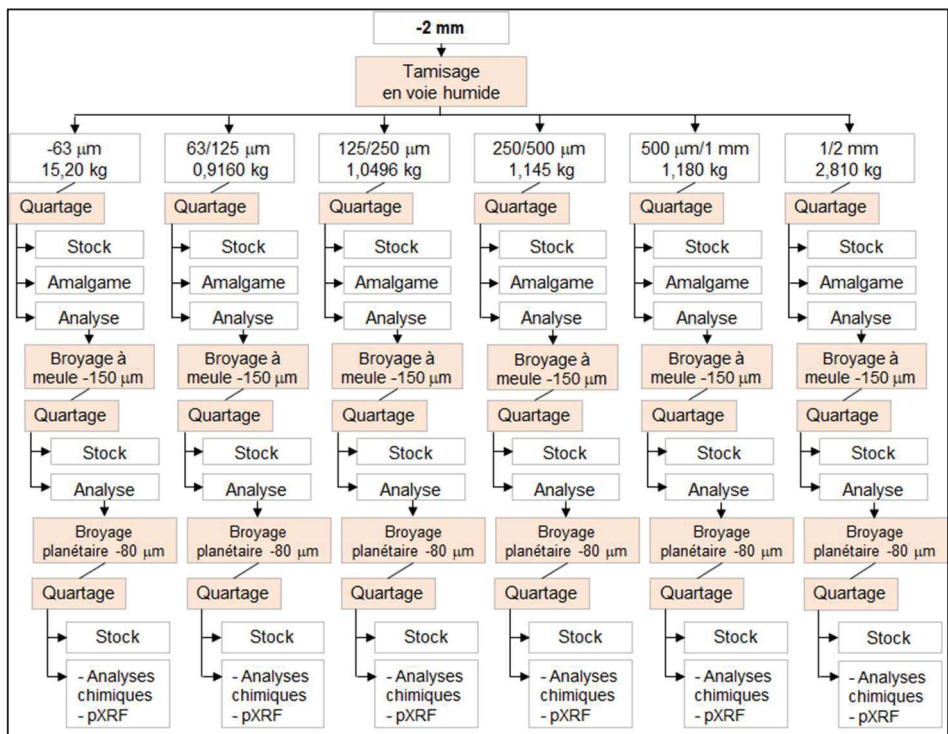


Figure 12. Protocole de préparation des fractions à -2 mm du lot de Dieu Merci

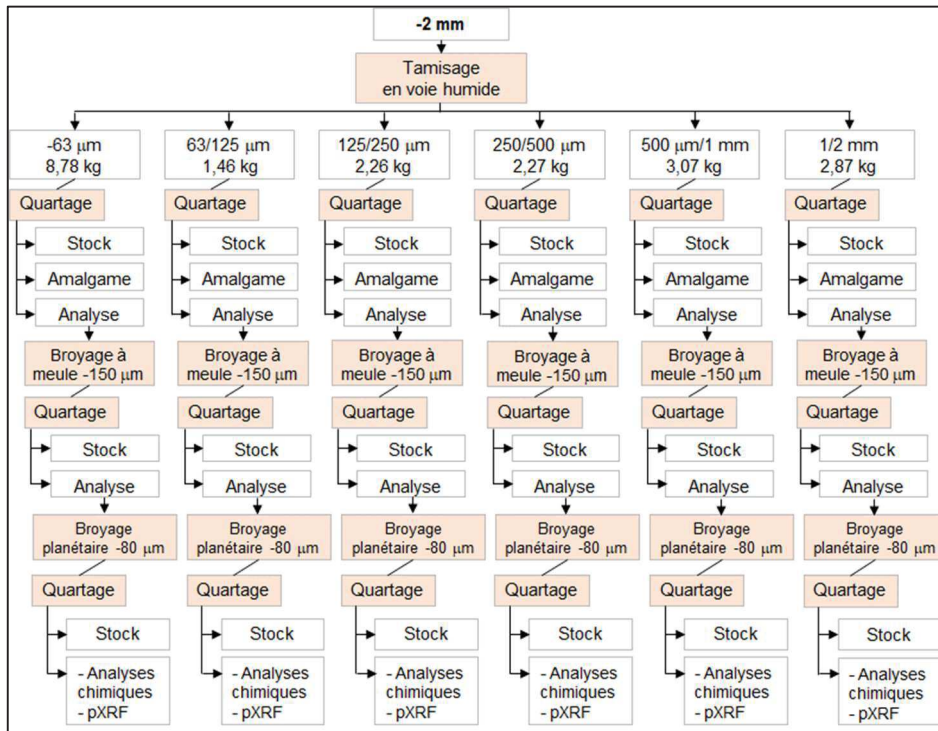


Figure 13. Protocole de préparation des fractions à -2 mm du lot de Bélizon

Pour compléter la caractérisation granulochimique, les fractions 2/20 mm et +20 mm du premier tamisage (Figure 9) sont traitées selon les schémas représentés Figure 14. La première étape de ce traitement est un concassage voie sèche sur un équipement giratoire cranté, puis le reste des opérations suit le même enchaînement que celui des sous-fractions de la fraction -2 mm (Figure 12).

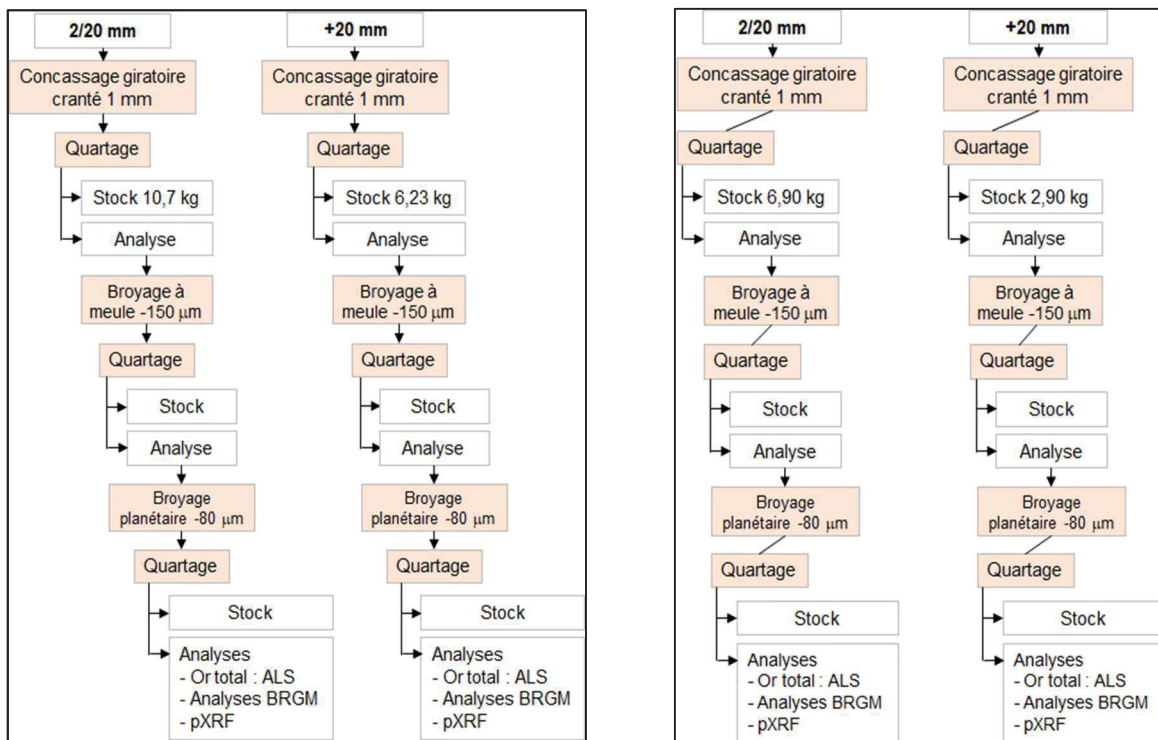


Figure 14. Protocole de préparation des fractions 2/20 et +20 mm des lots de Dieu Merci et Bélizon

Prélèvements du site de Grande Usine

Du quartage final réalisé sur l'étape d'échantillonnage du lot de Grande Usine (voir Figure 11), trois sous-lots sont récupérés : (i) le premier pour réaliser une analyse granulochimique, (ii) le deuxième pour une étude de sensibilité de la variance des teneurs en or aux paramètres granulométrie et masse de prise d'échantillons pour analyse, et (iii) le troisième pour réaliser les essais de séparation préliminaires. L'étude correspondant au point (ii) permet d'évaluer la robustesse du protocole de réduction granulométrique/quartage à un potentiel effet pépitique. Elle est réalisée sur le prélèvement de Grande Usine car celui-ci affiche la teneur moyenne en or la plus élevée des trois prélèvements, au point que des placages microscopiques d'or sont visibles sur certains des blocs de quartz avant concassage.

La préparation du sous-lot pour analyse granulochimique est identique à celle des échantillons -2 mm de Dieu Merci et Bélizon, à la différence qu'une septième fraction est produite (+ 2 mm), voir Figure 15. La Figure 16 reporte la préparation du sous-lot pour l'étude de sensibilité. Ce protocole aboutit à la formation de 27 fractions.

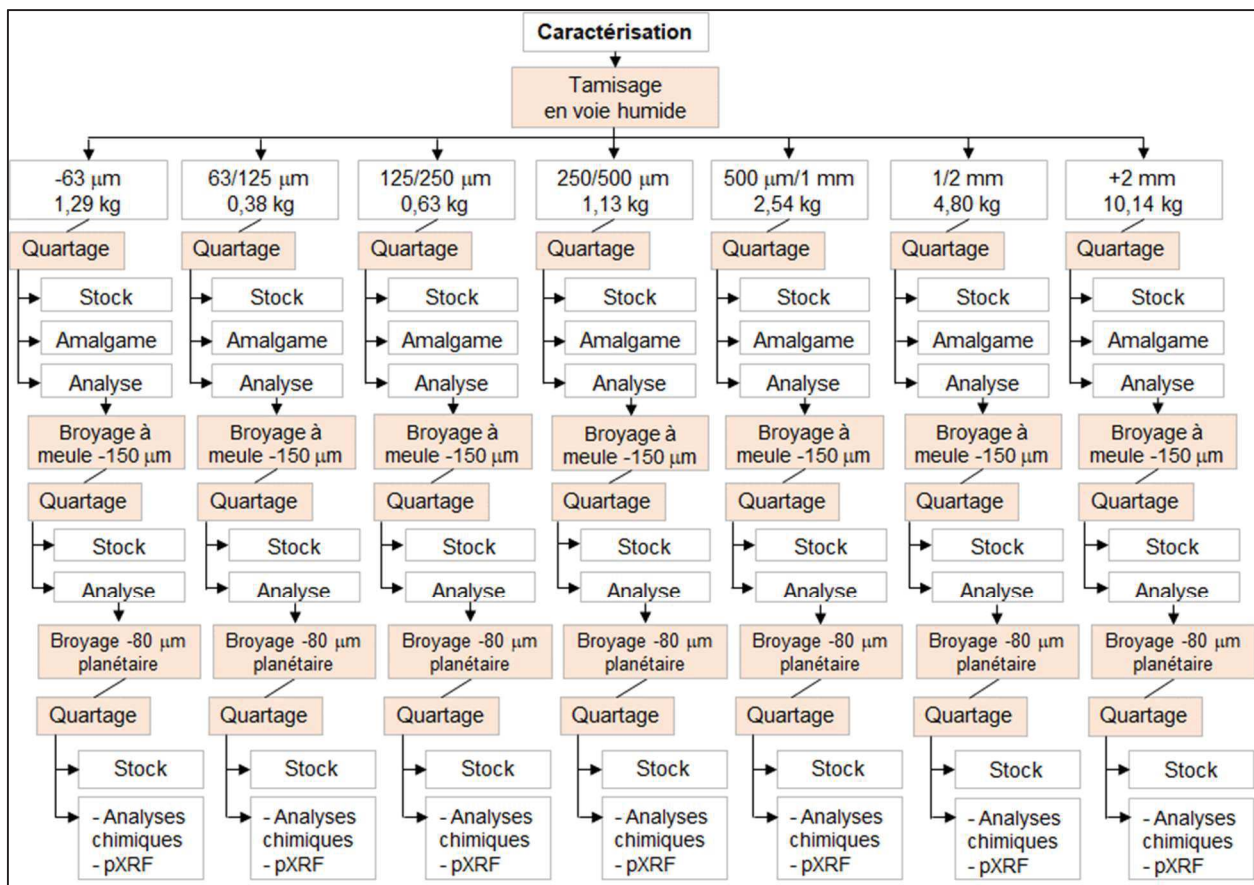


Figure 15. Protocole de préparation du sous-lot de Grande Usine pour analyse granulochimique

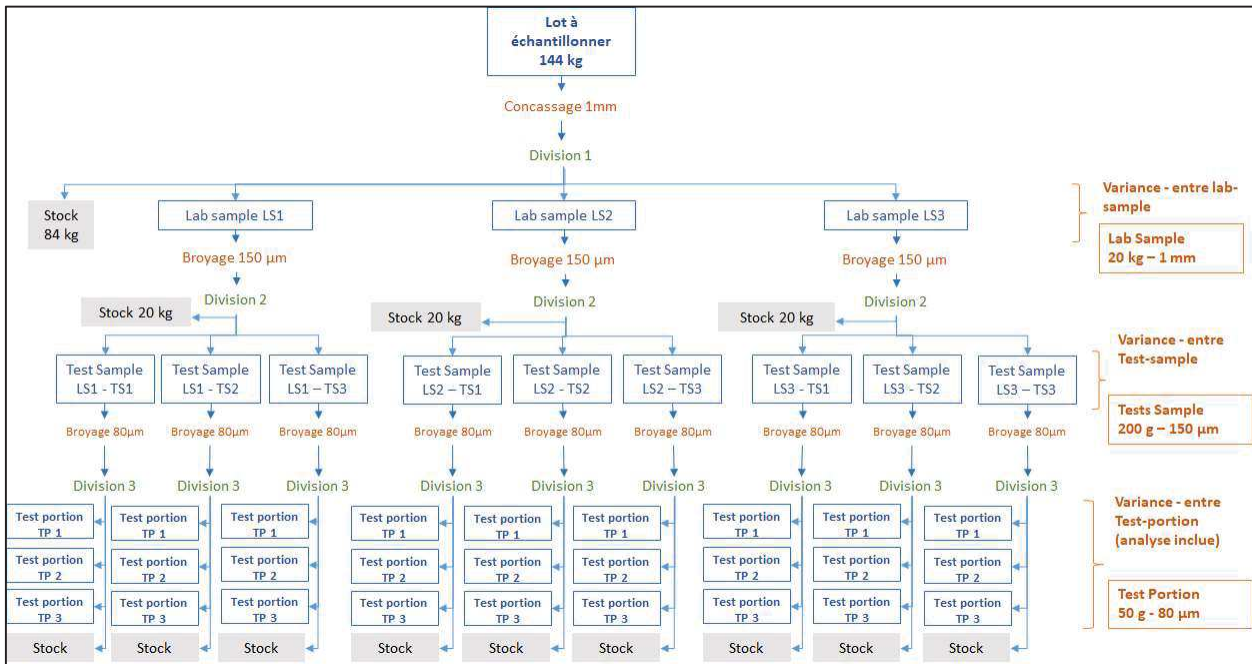


Figure 16. Protocole de préparation du sous-lot de Grande Usine pour l'analyse de sensibilité

d) Préparation des fractions pour les essais pilote

Les essais pilotes sont menés sur les échantillons de Dieu Merci et Bélizon. Dans les deux cas, les lots n°3 et 4 produits lors de l'étape d'échantillonnage (Figure 9 et Figure 10) sont tamisés en voie humide, pour produire les fractions -125 µm, 125/250 µm, 250/500 µm et 500 µm/1 mm. Ces fractions sont séchées à l'étuve. Les fractions -125 µm sont par la suite remises en pulpe en ajustant la fraction massique de solide à 30 %, valeur recommandée pour l'utilisation du séparateur centrifuge.

2.2.2. Caractérisations expérimentales

La caractérisation des échantillons vise à déterminer, pour chaque fraction solide produite :

- les teneurs en or total et libre, pour évaluer des rendements de récupération;
- la maille de libération apparente des grains d'or, pour définir les protocoles de réduction de taille et de tamisage permettant d'optimiser la récupération ;
- les principales phases minéralogiques et la répartition des éléments dans ces phases, pour identifier les phases porteuses non libérées, et affiner l'estimation de la maille de libération;
- les teneurs en éléments autres que l'or, pour évaluer la présence d'impuretés et compléter les analyses minéralogiques.

a) Détermination des teneurs en or

Or total

L'or total est analysé par fusion plombreuse sur des échantillons de 30 à 50 grammes. Ce type d'analyse, aussi appelé pyroanalyse de l'or avec collecte par le plomb, est la technique de référence normalisée ISO des laboratoires d'analyses. L'opération consiste à mélanger l'échantillon pulvérisé avec du peroxyde de sodium comme agent fondant solide et avec du plomb comme agent collecteur. Après chauffage et fusion de l'échantillon à 1000°C, les métaux précieux et le plomb se sont séparés des scories de silicate pour former un amalgame au fond du creuset. L'amalgame est séparé des scories de silicate et repris par coupellation pour extraire les métaux précieux. Le solide obtenu est ensuite dissout dans de l'eau régale, et la concentration en or dans la solution est déterminée par spectrométrie de masse ICP-MS.

Or libre

La détermination spécifique de l'or libre dans une fraction solide de granulométrie donnée n'est pas une opération de routine. Elle fait l'objet de travaux de développements analytiques encore à l'heure actuelle (Zhao et al, 2018⁴). La difficulté est de différencier l'or libéré, exposé et visible au microscope, des autres formes d'or : lié physiquement à d'autres minéraux, ou incorporé dans des inclusions sulfurées ou dans d'autres minéraux.

Dans le cadre de l'étude, un protocole analytique basé sur de l'amalgamation au mercure est développé et testé par les laboratoires du BRGM, afin d'être en mesure de caractériser la part de l'or libre dans les échantillons de différentes granulométrie produits à l'issue de l'étape de préparation.

Le protocole consiste dans un premier temps à mettre en pulpe 10 grammes d'échantillon dans 90 ml d'eau, et à y ajouter 5 g de mercure élémentaire. Après agitation pendant 3 heures (Figure 17), la pulpe est placée dans une ampoule à décanter pour récupérer l'amalgame par gravité (Tableau 18).



Figure 17. Mise en pulpe avec Hg et agitation

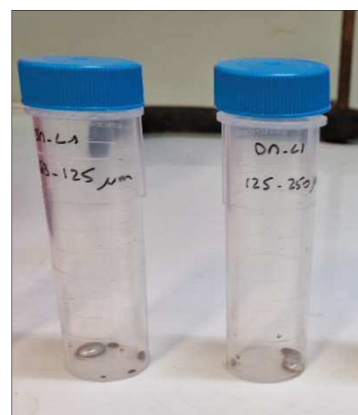


Figure 18. Récupération des billes de mercure par décantation

⁴ Zhao L-C., Wang J-G., Zhang S., Zhang S., Hu M-Y., Lu F., Wang Y-D. (2018). Application of inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry/mass spectrometry to phase analysis of gold in gold ores. Chinese J. Anal. Chem., 46(2), e1801 – e1809.



Figure 19. Solutions obtenues après dissolution de l'amalgame en eau régale

L'amalgame est ensuite dissout dans de l'eau régale (Figure 19), et la concentration en or de la solution obtenue est mesurée par spectrométrie de masse ICP-MS.

b) Détermination des teneurs en éléments autres que l'or

Chaque échantillon est broyé à $-80 \mu\text{m}$, puis dissout dans un minéralisateur Anton Paar, model HPA-S, par une solution triacide (sulfurique, nitrique, chlorhydrique) sous 130 bars à 320°C pendant 120 minutes. La solution obtenues est ensuite analysée par spectrométrie de masse ICP-MS pour une détermination multi-élémentaire. L'Annexe 1 regroupe les résultats obtenus.

c) Caractérisation minéralogique

Ces caractérisations visent à préciser les paragenèses minéralisées et à caractériser la granulométrie de l'or présent en vue d'optimiser sa récupération. Elles associent une analyse pétrographique qualitative, réalisée sur lames minces au microscope électronique, et une caractérisation minéralogique couplant analyse DRX et analyse au MEB-EDS.

- l'analyse DRX, permettant d'obtenir une composition semi-quantitative des phases cristallines dont les teneurs dépassent les 5 % massique dans l'échantillon ;
- l'analyse microscopique au MEB couplée à une micro-analyse EDS, permettant d'obtenir une répartition spatiale des teneurs par élément dans une couche de quelques micromètres d'épaisseur à la surface, et ainsi d'en déduire les principales associations élémentaires sous forme de phases constituées ;

L'analyse DRX est réalisée sur un diffractomètre Siemens D5000, à partir de son diagramme de poudre et en configuration d'échantillon tournant (configuration dite θ - 2θ). Le seuil de détection est de l'ordre de 5%, et varie selon la phase minéralogique. Les conditions opératoires sont :

- Balayage de 4 à $84^\circ 2\theta$
- Vitesse de balayage de $0,02^\circ 2\theta/\text{seconde}$
- Temps de comptage : 5 secondes par pas
- Tube au Cobalt ($\lambda \text{K}\alpha 1 \approx 1,789 \text{ \AA}$)

L'étude par microscopie électronique est réalisée sur un équipement JEOL IT800SHL avec source à effet de champ Schottky, offrant une résolution de 30 nm pour une puissance de faisceau de 30 kV. Il est couplé à une analyse par spectrométrie de dispersion en énergie (MEB-EDS) réalisée sur un équipement OXFORD AZtec, présentant une surface de détecteur de 70 mm^2 et associé à une caméra EBSD CMOS Symetry2.

2.3. ESSAIS PRELIMINAIRES DE TRAITEMENT

Les essais préliminaires ont été menés sur une table à secousses de laboratoire de marque Gravity Mining C800 (Figure 20), afin d'évaluer le potentiel de séparation gravimétrique dans des échantillons de petites masses (de l'ordre de la centaine de grammes) et de différentes granulométries (de 20 μm à 1 mm). Ce type d'équipement reproduit les mouvements réalisés lors d'une batée par les prospecteurs.



Figure 20. Table à secousses de laboratoire Mozley

La table dispose de deux plateaux, incurvé et plat, le choix de l'un ou l'autre dépend de la granulométrie de l'échantillon à traiter : le plateau incurvé est utilisé pour des tailles de particules comprises entre 100 μm et 1 mm, le plat pour des tailles inférieures à -100 μm .

En pratique les échantillons sont introduits à l'une des extrémités de la table sous forme d'une poudre. Un débit d'eau d'écoulement longitudinal est imposé en continu pendant l'essai, afin de créer un film d'eau dans lequel les particules acquièrent une vitesse de déplacement fonction de leur taille : le gradient du champ de vitesse dans la couche d'eau étant dirigés du plateau vers l'extérieur, les particules les plus fines, entièrement submergées, se déplacent moins rapidement que les plus grossières. Des secousses transversales, de fréquence et d'amplitude constantes, sont également imposées pendant la durée de l'essai, afin de créer des accélérations différentielles entre particules de densités différentes. En fin d'essai, les particules les moins denses et/ou les plus grossières, se retrouvent concentrées en sortie de table, et peuvent être transportées par un écoulement d'eau dans un récipient dédié. Les particules plus fines et/ou plus denses sont récupérées similairement dans un second temps. Cette technique permet ainsi de séparer des grains de minerai fins et lourds d'un échantillon. Les paramètres opératoires sont, pour les deux types d'échantillons (fin et grossier), le débit d'eau de lavage et la fréquence des secousses. Dans le cas du traitement d'un échantillon fin, se rajoutent la concentration massique de la pulpe et l'amplitude des secousses transversales.

2.4. ESSAIS DE TRAITEMENT A GRANDE ECHELLE

Les essais préliminaires de traitement sont menés sur une table à secousse Wilfley pour les fractions +125 μm , et sur un séparateur gravimétrique centrifuge Falcon pour les fractions -125 μm .

Table à secousses. La Figure 21 est un schéma de principe d'une table à secousses. Elle consiste en une planche, légèrement inclinée selon ses deux axes longitudinal et transversal, animée d'un mouvement longitudinal périodique et sur laquelle circule un film d'eau. Le mouvement longitudinal est asymétrique, avec,

pour un cycle donné, un mouvement lent du point "Mechanism end" vers le point "Concentrate end", suivi d'une rapide impulsion inverse. L'alimentation en eau est réalisée à débit continu sur toute la longueur de la table au moyen d'une rampe d'aspersion. Le solide est distribué (point "Feed") au moyen d'une trémie vibrante et dispersé dans le film d'eau.

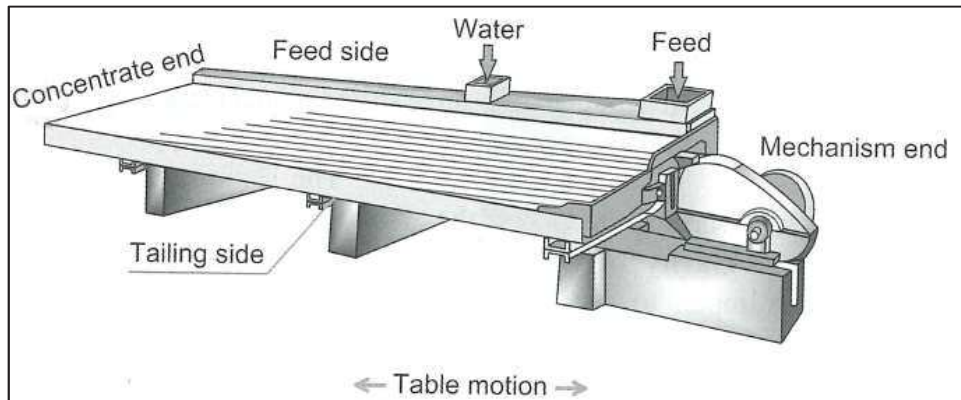


Figure 21. Vue générale d'une table à secousses⁵

Les particules minérales sont soumises à deux forces orthogonales, provenant du mouvement de la table et de l'écoulement de l'eau, et se déplacent selon l'effet diagonal résultant. Les particules les plus grossières et les plus légères subissent davantage l'effet du film d'eau et sortent donc en milieu de table (point "Tailing side"), tandis que les particules fines et denses sont concentrées en bout de table ("Concentrate end"). La Figure 22 représente la répartition théorique des particules en fin d'essai.

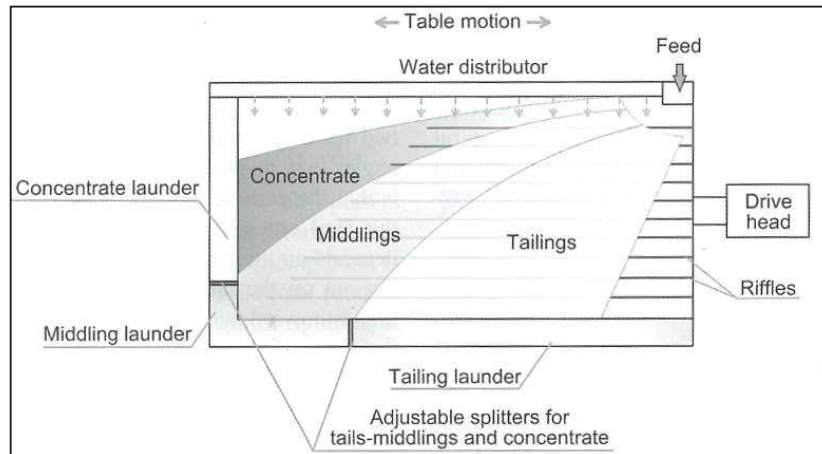


Figure 22. Aspect de la table à secousses en fin d'essai

Séparateur Falcon SB40. La Figure 23 représente la structure interne d'un séparateur centrifuge Falcon. Il s'agit d'un bol cylindro-conique compact, dont la mise en rotation permet de créer des forces spécifiques menant à la séparation, selon un mode de fonctionnement semi-batch, entre les particules lourdes, qui restent dans le bol, et les particules légères, qui en sont en continu. Cet équipement est utilisé préférentiellement pour traiter des alimentations composées d'une fraction dense ultra-minoritaire.

⁵ Wills B.A., Finch J.A. (2016). Will's Mineral Processing Technology – Eighth edition

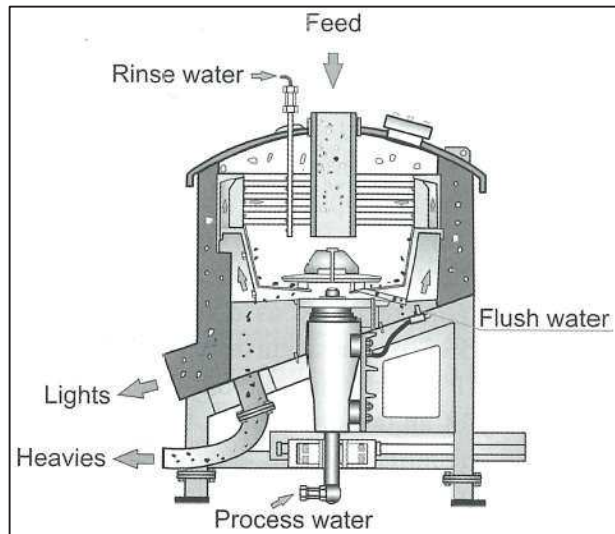


Figure 23. Ecoulement de l'alimentation et des produits dans un séparateur Falcon⁶

La pulpe est alimentée en bas et au centre du bol, puis projetée sur les parois par une hélice pour y former un film. La rotation rapide du bol produit une force d'accélération centrifuge sur les particules dans ce film, qui va mener les lourds à migrer vers la paroi à travers la lame d'eau superficielle, et à cheminer ainsi vers la partie supérieure par effet de pente, tandis que les légers restent dans la couche supérieure du film. La force de friction qui s'applique sur les particules lourdes, plus proches de la paroi, freine leur déplacement vers le haut et les contraint à rester dans les rainures de la paroi, tandis que les particules légères vont être entraînées par la partie supérieure de la lame d'eau et être évacuées par débordement.

2.5. EVALUATION DES ERREURS D'ÉCHANTILLONNAGE

La finalité de l'échantillonnage est de produire, par une succession d'étapes de prélèvements et de réductions de taille, une fraction qui soit aussi représentative que possible d'un lot de matière initial. La représentativité d'un élément d'un certain type (particules d'or ici) est quantifiée à partir de sa proportion dans le lot initial et dans la fraction échantillonnée. Elle dépend de la granulométrie du lot d'origine et de la masse prélevée pour former l'échantillon. L'enjeu est d'évaluer l'écart entre ces deux proportions, ce qui permet de définir une valeur d'incertitude, dite liée à l'échantillonnage, pour la mesure de l'élément dans la fraction produite.

L'erreur d'échantillonnage peut être estimée de façon théorique par la méthode de Gy⁷, ou de façon empirique par des calculs statistiques sur des valeurs de teneurs mesurées aux différentes étapes de l'échantillonnage. Ce paragraphe propose les deux approches, la première est réalisée sur les échantillons des trois sites, et la seconde sur ceux de Grande Usine uniquement.

2.5.1. Calcul théorique de l'erreur fondamentale d'échantillonnage

La théorie de Gy repose sur l'hypothèse que l'échantillon est probabiliste et sans biais: chaque particule à une probabilité non nulle et égale d'être sélectionnée. Elle permet de calculer l'erreur minimale d'échantillonnage lorsque celui-ci est réalisé de manière parfaite. L'erreur est alors intrinsèquement liée aux propriétés du lot initial.

Le calcul dépend des paramètres suivants :

⁶ Wills B.A., Finch J.A. (2016). Will's Mineral Processing Technology – Eighth edition

⁷ Gy P.M. (1992). Sampling of heterogeneous and dynamic material systems, theories of heterogeneity, sampling and homogeneizing. Elsevier, Amsterdam, 653p

- Teneur en or du lot
- Masses du lot et de l'échantillon prélevé, masses spécifiques du minéral d'intérêt et de la gangue
- Étalement de la courbe granulométrique
- Taille des plus gros fragments de l'échantillon et forme des fragments
- Taille des plus petits grains du minéral d'intérêt (taille de libération)

L'erreur est calculée à partir des arbres de préparation des échantillons des trois sites de l'étude, en prenant en compte la masse du lot de départ, la masse des sous-lots, la répartition granulométrique déterminée par tamisage, et une teneur en or donnée par les analyses chimiques pour chacune des classes granulométriques.

Les calculs ont été réalisés au moyen du logiciel ECHANT sur la base de la formule simplifiée de Gy. Les hypothèses pour les calculs sont : la totalité de l'or présent dans les fractions < 1 mm est sous forme libre de toute gangue, les particules d'or sont de forme plate et allongée (introduisant un facteur de correction lié à la forme de 0,2), et les particules d'or sont sphériques (facteur de correction à 0,5). La Figure 24 schématise un exemple de préparation.

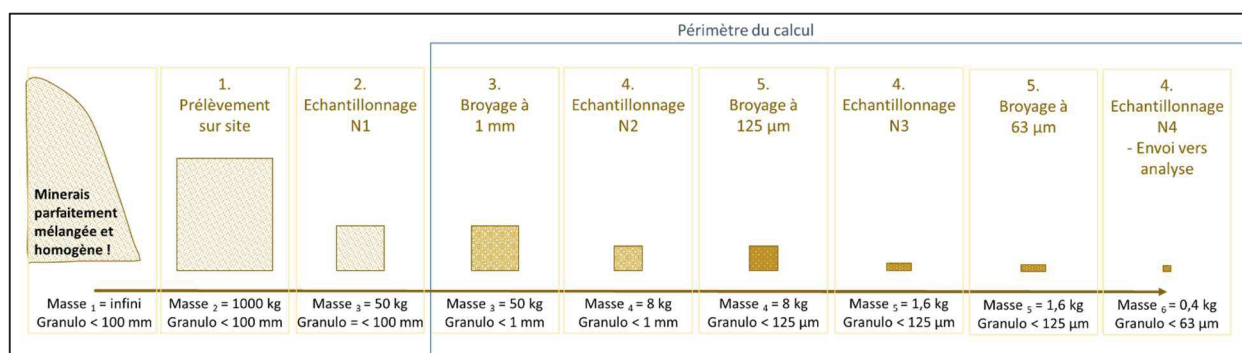


Figure 24. Schéma de préparation de l'échantillon Dieu Merci et Bélizon

2.5.2. Calcul empirique sur l'échantillon de Grande Usine

La méthode empirique a été appliquée pour calculer les incertitudes sur les teneurs en or des échantillons de Grande Usine. Cette méthode suit les recommandations du guide Eurachem⁸ sur les mesures d'incertitudes et repose sur la répétition des mesures à différentes étapes du plan d'échantillonnage. Le calcul de la moyenne et de la variance des teneurs en or à chacune de ces étapes permet d'en évaluer la contribution à l'incertitude finale.

⁸ M.H. Ramsey, S.L.R. Ellison and P. Rostron (eds) "Eurachem/EUROLAB/CITAC / Nordtest / AMC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches". Second edition, Eurachem (2019).

3. Résultats

3.1. ECHANTILLONNAGE

3.1.1. Echantillons de Dieu Merci

L'échantillonnage sur le site de **Dieu Merci** a été effectué du 05 au 07 avril 2022. Il a été réalisé avec l'appui technique et logistique de la société AuPlata Mining Group, qui opère sur ce site d'exploitation historique en Guyane. L'échantillonnage s'est porté sur une zone filonienne définie et caractérisée par AuPlata au cours de ses travaux d'exploration (Figure 25) et où des passes de 3 m @ 15,11 g/t Au et 4,5 m @ 6,37 g/t Au ont été mises en évidence par sondage (*comm. pers. AuPlata*). Cette zone filonienne se situe à l'ouest du site de Dieu Merci.



Figure 25. Zone filonienne échantillonnée sur le site de Dieu Merci, ayant été caractérisée par tranchée et sondage par AuPlata Mining Group

Il s'agit d'un filon de quartz massif, relativement puissant, affleurant sur 10 à 15 m de large. Il est observable via une tranchée de 2 m de profondeur réalisée perpendiculairement au filon (Figure 25). Dans le détail, compte-tenu des seules observations de terrain, son pendage et sa puissance réelle sont difficilement interprétables. Le filon est en partie saprolitité, il est composé :

- de quartz massif blanc, pouvant former des blocs de taille métrique ;
- et de matériel argileux formant des zones d'altération préférentielle le long des diaclases et des fractures entre les différents blocs de quartz.

Localement, on distingue quelques bandes sombres oxydées de puissance décimétrique (Figure 26), traduisant probablement des injections polyphasées au sein de la zone filonienne. Ces niveaux, généralement fertiles, présentent une altération poussée à oxydes de fer, à texture parfois fibreuse et sont composés de nombreux *boxworks*, résultant de l'altération d'anciens sulfures. Localement, des sulfures (principalement pyrite) ont pu être identifiés sur certains de ces blocs observés en volantes (Figure 27). Plusieurs de ces blocs ont été échantillonnés pour en évaluer les teneurs en or.



Figure 26. Localisation des niveaux oxydés à quartz-oxydes de fer au sein de la zone filonienne, montrant des textures cariées à nombreux boxworks, résultant de l'altération de sulfures préexistants. Lors des tests à la batée, ces facies se sont révélés être les plus minéralisés en or



Figure 27. Facies cariés à quartz, oxyde de fer et pyrite résiduel (échantillon DM06 et DM08). On y observe de nombreuses cavités issues de l'altération de sulfures préexistants, probablement particulièrement abondants initialement dans ce type de facies

Le prélèvement de l'échantillon **DM01** de 1 tonne, a été réalisé de manière manuelle, à la pelle et à la pioche, en ayant préalablement fait des tests à la batée pour vérifier la présence d'or. Il a été réalisé par un échantillonnage composite sur la largeur de la tranchée (Figure 28), en prélevant les différents types de matériaux présentés ci-dessus, comprenant à la fois :

- du matériel sain sous forme de **blocs de quartz** de taille pluri centimétrique à décimétrique ;
- du **matériel saprolitique argilisé**, situé dans les zones d'altération préférentielles entre les blocs de quartz ;
- des morceaux, en proportion plus faible, issus du démantèlement des **niveaux à quartz-oxyde de fer**, présentant vraisemblablement les teneurs en or les plus importantes (Figure 26).



Figure 28. Prélèvement de l'échantillon DM01 sur le site de Dieu Merci. L'échantillonnage a consisté à effectuer un prélèvement composite sur la largeur de la zone filonienne

| Numéro échantillon | Site | Poids (kg) | X | Y | Type | Description |
|--------------------|------------|------------|--------|--------|-----------------------|---|
| DM01 | Dieu Merci | 1000 | 247455 | 529079 | Echantillon composite | Echantillon composite composé de matériel saprolitique argilisé et de morceaux de quartz filonien, localement à altération à oxydes de fer. |
| DM01-1 | Dieu Merci | 3.2 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Quartz scoriacé à oxydes de fer abondants et nombreux boxworks. |
| DM01-2 | Dieu Merci | 4.1 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Quartz blanc laiteux avec placages d'oxydes noirs dans les fractures. |
| DM01-3 | Dieu Merci | 3.45 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Quartz blanc laiteux avec placages d'oxydes noirs dans les fractures. |
| DM02 | Dieu Merci | 1.85 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Quartz gris/ocre, relativement altéré, avec nb fractures et altération à oxydes de fer, essentiellement goethite. Quelques boxworks avec recristallisation d'oxydes de fer. |
| DM03 | Dieu Merci | 1.3 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Idem DM02. |
| DM04 | Dieu Merci | 0.9 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Quartz blanc saccharoïde avec légère altération à oxydes de fer. |
| DM05 | Dieu Merci | 1.3 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Idem DM02. |
| DM06 | Dieu Merci | 1.85 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Quartz gris/ocre avec altération poussée à oxydes de fer. Facies scoriacé avec nombreux boxworks. Quelques traces de pyrite résiduel dans certaines cavités. |
| DM07 | Dieu Merci | 1.4 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Idem DM06. |
| DM08 | Dieu Merci | 0.9 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Quartz blanc, avec légère altération à oxydes de fer en placage. Qqs cavités avec pyrite résiduelle +mm à cm. |
| DM09 | Dieu Merci | 1.35 | 247455 | 529079 | Echantillon de quartz | Quartz blanc, avec légère altération à oxydes de fer. Quelques boxworks +mm dans zones oxydées, avec pyrite résiduelle. |

Tableau 1. Liste et caractéristiques des échantillons prélevés sur le site de Dieu Merci

3.1.2. Echantillons de Bélizon

L'échantillonnage sur le site de Bélizon a été réalisé les 09 et 10 avril 2022, avec l'appui technique et logistique de la société Amazone Gold. Il a consisté à cibler une structure minéralisée primaire ayant été détectée et travaillée en souterrain par des orpailleurs illégaux. Celle-ci se situe au sein du PER⁹ n° 2016-0016-MI de la société Amazone Gold¹⁰. Les travaux historiques référencés sur ce site font l'état de 10 puits verticaux et de 2 galeries horizontales (Figure 29). Ils s'organisent selon une direction NNE-SSO, définissant une structure minéralisée de même orientation.

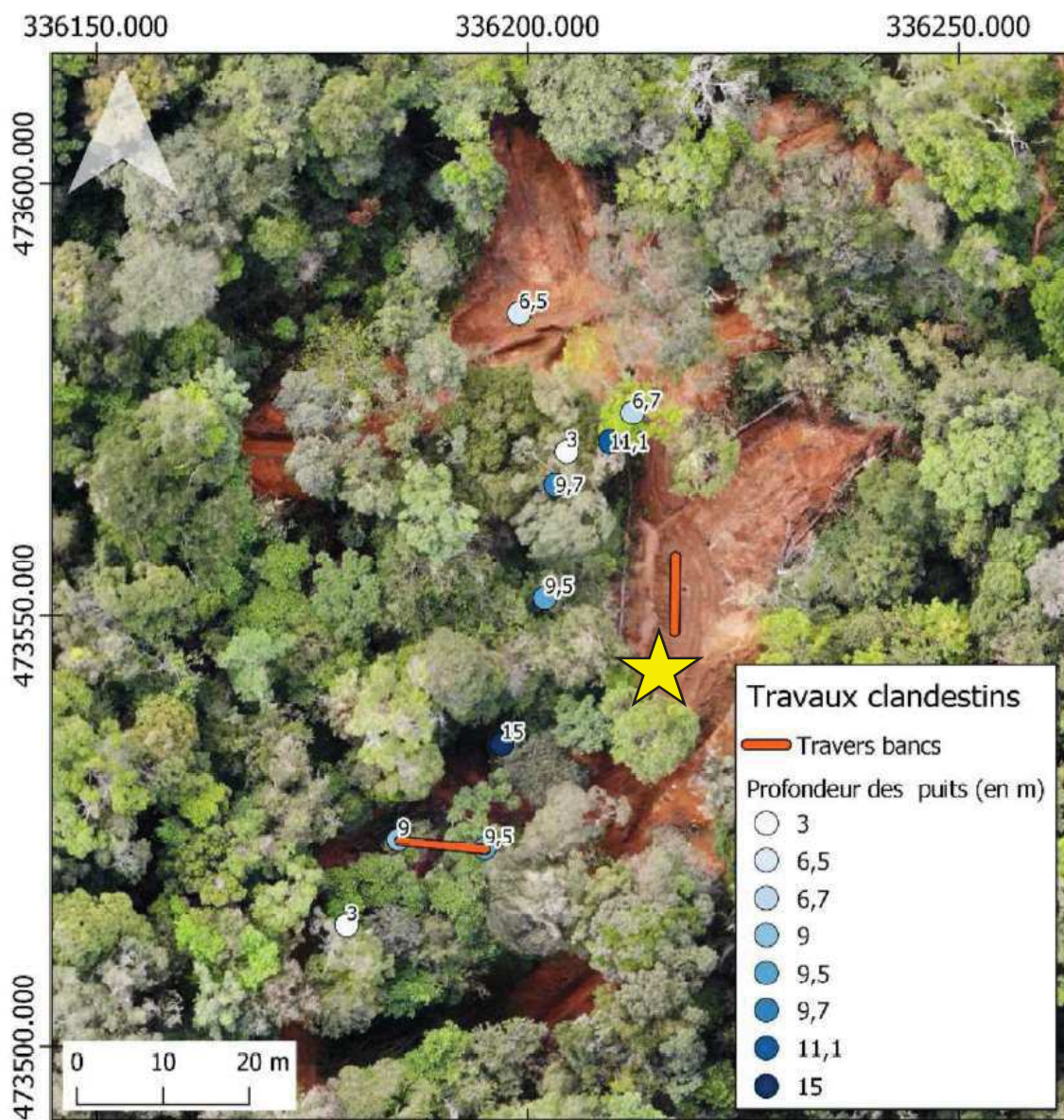


Figure 29. Détail des travaux clandestins référencés sur site. La zone échantillonnée dans le cadre du projet est représentée en jaune

⁹ PER : Permis Exclusif de Recherche

¹⁰ <https://camino.beta.gouv.fr/titres/m-pr-belizon-2019>



Figure 30. Ancien puit opéré par les orpailleurs illégaux dans le cadre de l'exploitation clandestine du site

La structure minéralisée a été échantillonnée à l'est de la ligne de puits (Figure 29), où elle est observable à l'affleurement (Figure 31). Elle se présente comme une structure filonienne de taille réduite, de 20 à 40 cm de puissance, légèrement pentée vers l'ouest. Elle est composée d'un faisceau discontinu de veines et filons de quartz, au sein d'un encaissant granodioritique saprolitisé, totalement argilisé, avec localement la préservation d'une texture grenue.

La zone minéralisée est très localisée. Elle se situe juste à l'aplomb des veines de quartz, où des teneurs de plusieurs g/t ont été reconnues (maximum de 12,3 g/t). En s'éloignant de la structure filonienne, les teneurs semblent diminuer très rapidement, avec probablement des épontes minéralisées sur 20 à 50 cm, mais rarement plus.



Figure 31. Observation à l'affleurement de la structure filonienne échantillonnée



Figure 32. Zone de prélèvement de l'échantillon BZ01

Le prélèvement de l'échantillon **BZ01** de 1 tonne, a été réalisé à la pelle mécanique, en ciblant la partie centrale de la zone filonienne (Figure 32). Préalablement, plusieurs essais à la bâtee ont été réalisés pour s'assurer de la présence d'or dans le matériel ciblé. Les résultats ont tous été positifs, attestant de la présence d'or en quantité significative. Ces premières observations ont montré que l'or y était particulièrement fin, se présentant sous forme de poussière, avec une granulométrie probablement inférieure à 100-250 μm .



Figure 33. Test à la bâtee, confirmant la présence d'or libre en quantité significative dans le matériel échantillonné

Par la suite, le matériel a été conditionné en sacs tissés en polypropylène de 30 kg (Figure 34). 35 sacs ont été échantillonnés pour un poids total d'environ 1 tonne (échantillon **BZ01** ; Tableau 2). Le matériel échantillonné était essentiellement argileux et composé des éléments suivants (Figure 34) :

- un **ensemble à majorité argileuse**, constitué d'argiles blanches kaoliniques à ocre/lie-de-vin ;
- des **concrétions ferrugineuses** plus ou moins abondantes donnant une couleur ocre au matériel ;
- des **blocs de quartz résiduel**, sous forme de blocs centimétriques à pluri décimétriques, composés de quartz particulièrement friable, à texture saccharoïde et à nombreuses traces d'oxydation.



Figure 34. Gauche: échantillonnage du matériel minéralisé en sac de 30 kg. Droite : vue du minerais échantillonné, constitué d'un mélange de matériel argileux et de blocs de quartz résiduel

En parallèle de l'échantillon BZ01, d'autres échantillons ont été prélevés pour permettre de caractériser le minerai plus en détail :

- **5 échantillons composites d'environ 5 kg** (BZ01-1 à BZ01-5), prélevés au cours de l'échantillonnage principal, afin de déterminer les teneurs en or du minerai brut et d'en évaluer la variabilité. Le matériel échantillonné était analogue à BZ01, sous forme d'un mélange de saprolite argilisé et de quartz résiduel ;
- BZ02, BZ03 et BZ04, correspondant à des **morceaux de quartz individuels** (Figure 35), de taille pluri-décimétrique.



Figure 35. Blocs de quartz résiduel échantillonnés pour effectuer des analyses complémentaires

| Numéro échantillon | Site | Poids (kg) | X | Y | Type | Description |
|--------------------|---------|------------|--------|--------|-----------------------|--|
| BZ01 | Bélizon | 1000 | 336204 | 473524 | Echantillon composite | Ensemble saprolitique argilisé blanc à ocre avec blocs de quartz filonien résiduels et argiles kaoliniques. |
| BZ01-1 | Bélizon | 5 | 336204 | 473524 | Echantillon composite | |
| BZ01-2 | Bélizon | 4.95 | 336204 | 473524 | Echantillon composite | |
| BZ01-3 | Bélizon | 4.7 | 336204 | 473524 | Echantillon composite | |
| BZ01-4 | Bélizon | 4.7 | 336204 | 473524 | Echantillon composite | |
| BZ01-5 | Bélizon | 5.2 | 336204 | 473524 | Echantillon composite | |
| BZ02 | Bélizon | 1.6 | 336204 | 473524 | Echantillon de quartz | Quartz saccharoïde relativement friable, avec traces d'oxydation rougeâtres à oxydes de fer. |
| BZ03 | Bélizon | 0.95 | 336204 | 473524 | Echantillon de quartz | Quartz saccharoïde relativement friable, avec traces d'oxydation rougeâtres à oxydes de fer. Amas de muscovite localement. |
| BZ04 | Bélizon | 1.4 | 336204 | 473524 | Echantillon de quartz | Quartz saccharoïde relativement friable, avec traces d'oxydation rougeâtres à oxydes de fer. |

Tableau 2. Liste et caractéristiques des échantillons prélevés sur le site de Bélizon

3.1.3. Echantillons de Grande Usine

Grande Usine est un site d'orpillage illégal de grand ampleur, ayant pu compter jusqu'à plusieurs centaines de *garimpeiros* et ayant fait l'objet de plusieurs missions de destruction Harpie. Il est situé dans le centre de la Guyane et nécessite un appui hélicoptère pour s'y rendre. La mission d'échantillonnage a été réalisée le 11 avril 2022, en coordination avec les Forces Armées de Guyane (FAG) qui occupaient le site au moment de l'intervention. Il s'agit d'un site exploité en souterrain, où plusieurs dizaines de puits (plus de 80) et de nombreux tas de quartz sont référencés (Figure 37).

L'intervention sur site a été réalisée avec l'appui technique de l'EMOPI (Etat-major de lutte contre l'orpaillage et la pêche illicite), qui a, en particulier, transmis à l'équipe BRGM des documents cartographiques sur l'occupation et l'organisation du site, ainsi des résultats d'analyses sur les tas de quartz échantillonnés par l'EMOPI (Figure 37).



Figure 36. Puit d'orpaillage illégal sur le site de Grand Usine, permettant l'exploitation en souterrain des veines et des filons de quartz aurifère

La stratégie d'échantillonnage sur le site de Grand Usine s'est appuyée sur ces résultats d'analyses. Au total, 4 tas ont été échantillonnés (T12, T15, T16, T21) dont les caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 3. L'échantillonnage a consisté, pour chacun des tas, à prélever un ou deux échantillon(s) composite de 30 kg. Le matériel échantillonné était constitué principalement de morceaux centimétriques à décimétriques de quartz, accompagnés parfois d'un peu de matériel fin terreux, résultant de l'extraction et du concassage des morceaux de quartz.

| Numéro échantillon | Site | Poids (kg) | X | Y | Type | Description |
|--------------------|-------------|------------|--------|--------|-----------------------|---|
| GU01-T12 | Grand Usine | 30 | 286307 | 373009 | Echantillon composite | Blocs de quartz cm à +cm. Quartz blanc légèrement friable, peu/pas d'oxydes de fer. Facies d'apparence peu minéralisé, pas d'or visible. |
| GU01-T15 | Grand Usine | 30 | 286183 | 372978 | Echantillon composite | Blocs de quartz cm à dm. Quartz gris à blanc, facies frais non oxydé. Présence de sulfures, essentiellement pyrite. Qqs traces d'or visible. |
| GU01-T16 | Grand Usine | 60 | 286146 | 372964 | Echantillon composite | Blocs de quartz cm à +cm. Quartz gris, facies frais dans son ensemble avec qqs traces d'oxydation. Tourmaline localement en remplissage de fractures <mm à débit régulier. Relativement riche en sulfures, frais ou oxydés. Nb traces d'or visible. |
| GU01-T21 | Grand Usine | 60 | 286322 | 373019 | Echantillon composite | Blocs de quartz légèrement friable. Qqs blocs avec boxworks oxydés. Tourmaline localement en remplissage de fractures. Présence de sulfures, essentiellement pyrite. Qqs traces d'or visible. |

Tableau 3. Liste et caractéristiques des échantillons prélevés sur le site de Grand Usine

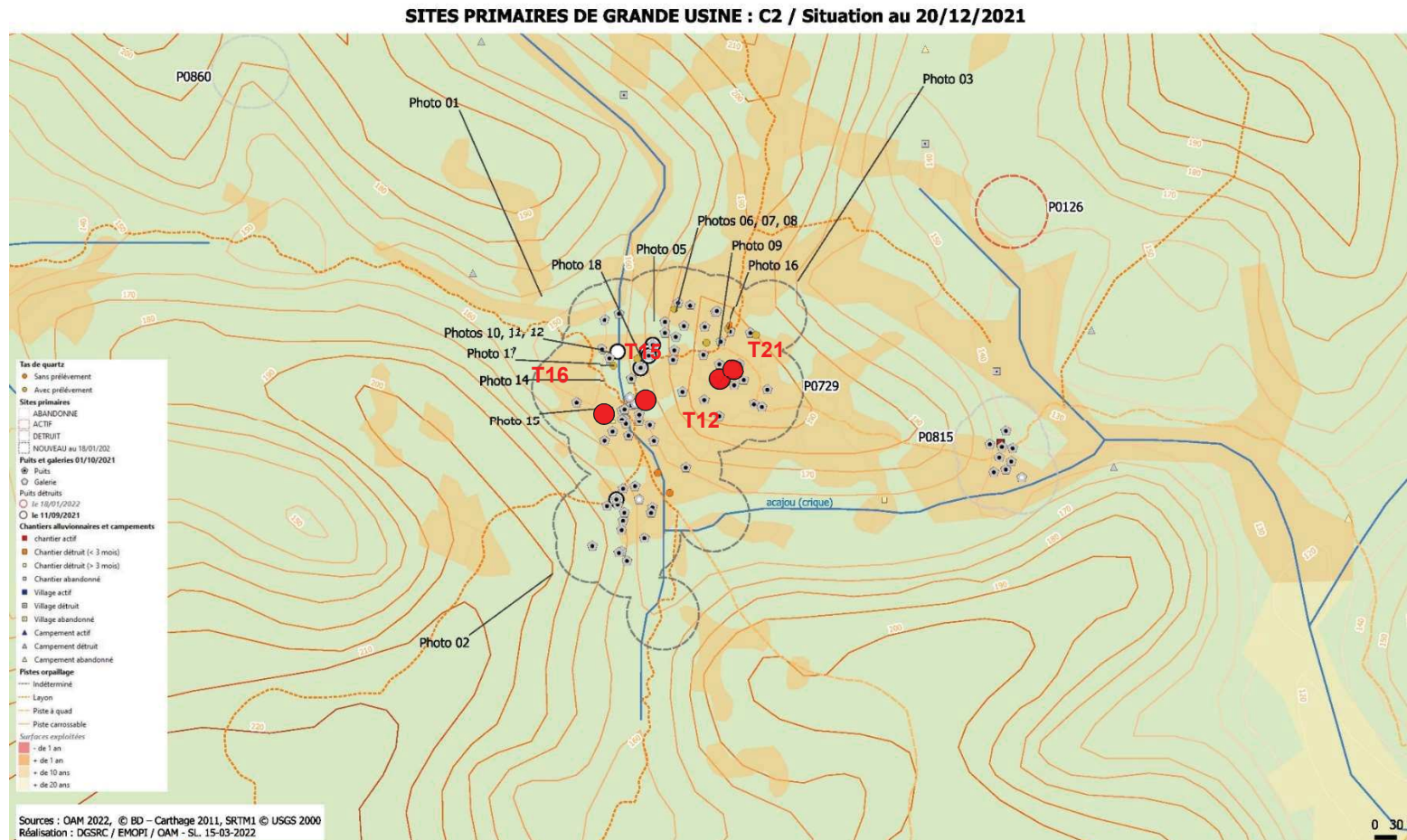


Figure 37. Carte de synthèse du site de Grand Usine fournie par l'EMOPI. Les tas de quartz échantillonnés sont représentés en rouge

Le minerai était constitué principalement de blocs de quartz frais, peu altéré, avec localement de la tourmaline, des sulfures (essentiellement pyrite à l'œil nu), quelques oxydes de fer (hématite, goéthite) et parfois de l'or visible.

Une fois rapatriés au BRGM Orléans, les échantillons ont été regroupés ensemble pour former un échantillon unique **GU01** d'environ 180 kg. En parallèle, des échantillons composites de 3 à 5 kg ont été prélevés pour chacun des tas, afin d'évaluer les teneurs en or du minerai brut.



Figure 38. Photos des 4 tas prélevés, constituant l'échantillon global GU01 sur Grande Usine

3.1.4. Evaluation des erreurs d'échantillonnage

a) Calcul théorique de l'erreur fondamentale d'échantillonnage

Préparations faites au BRGM

Les analyses en or ont été faites sur des sous-fractions granulométriques, elles ont été sommées pour pouvoir calculer les masses totales liées à la préparation (masse₄, masse₅ et masse₆ dans la Figure 24).

Les Tableau 4 et Tableau 5 reportent les erreurs théoriques d'échantillonnage calculées aux différentes étapes de préparation des fractions.

| Granulométrie, mm | Masse du lot, kg | Masse échantillon, kg | Erreur relative, % | |
|-------------------|------------------|-----------------------|--------------------|---------|
| | | | Dieu Merci | Bélizon |
| 1 | 50 | 8 | 6,9 | 3,5 |
| 0,125 | 8 | 1,6 | 2,1 | 0,8 |
| 0,063 | 1,6 | 0,4 | 1,2 | 0,4 |

Tableau 4. Erreurs fondamentales d'échantillonnage de la préparation des échantillons de Dieu Merci et Bélizon

| Granulométrie, mm | Masse du lot, kg | Masse échantillon, kg | Erreur relative, % |
|-------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| | | | Grande Usine |
| 1 | 21 | 8 | 4,35 |
| 0,125 | 8 | 1,6 | 0,8 |
| 0,063 | 1,6 | 0,4 | 1,4 |

Tableau 5. Erreurs fondamentales d'échantillonnage de la préparation des échantillons de Grande Usine

Les incertitudes augmentent lorsque la teneur en or diminue, ce qui concorde avec la théorie de l'échantillonnage sachant que l'or est considéré libre dans les trois échantillons. Ces erreurs sont considérées comme acceptables pour notre étude. Elles sont suffisamment petites pour ne pas remettre en cause la préparation des échantillons.

Préparation générique des laboratoires d'analyse de l'or

Lors des campagnes d'exploration, les sociétés fournissent des sacs de 10 à 20 kg aux laboratoires pour l'analyse de l'or. Dans ces laboratoires, les échantillons sont préparés selon un protocole établi. Nous avons repris un de ces protocoles et avons recalculé l'erreur fondamentale d'échantillonnage qui aurait été associée à nos 3 échantillons.

Les étapes de préparation consistent en un broyage de la totalité de l'échantillon à 2 mm (90% de passants), puis une première division pour conserver 1 kg de matière, un second broyage de ce lot à 75 µm (85 % de passants), et une seconde division menant à un lot de 50 g, dont l'intégralité est fondue avec du plomb pour l'analyse de l'or. Avec les hypothèses de notre étude, ce protocole aboutirait aux erreurs d'échantillonnage reportées dans le Tableau 6.

| Granulométrie | Masse du lot | Masse échantillon | Erreur relative, % | | |
|---------------|--------------|-------------------|--------------------|---------|--------------|
| | | | Dieu Merci | Bélizon | Grande Usine |
| 1 mm | 5 kg | 1 kg | 18,4 | 9,7 | 13,9 |
| 0,075 mm | 1 kg | 0,05 kg | 3,6 | 1,4 | 4,5 |

Tableau 6. Erreurs fondamentales d'échantillonnage d'une préparation générique des laboratoires d'analyse

Les erreurs fondamentales d'échantillonnage sont assez élevées sur la première étape de préparation. Cette étape est une étape de concassage qui est peu consommatrice de temps, elle pourrait être faite sur une masse plus importante sans entrainer des surcoûts importants.

b) Calcul empirique sur l'échantillon de Grande Usine

La Figure 37 représente l'arbre d'échantillonnage de Grande Usine, et le Tableau 7 présente l'ensemble des résultats. Lors du traitement de données (27 valeurs) aucune valeur pépité n'a été repérée ; la préparation permet bien de s'affranchir de cet effet.

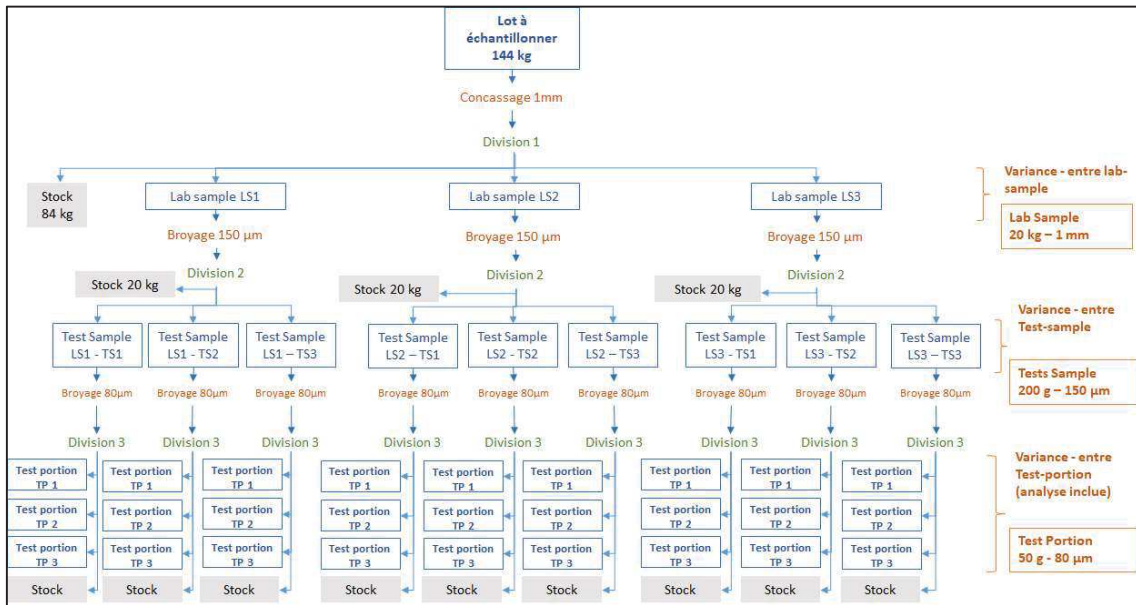


Figure 39. Arbre d'échantillonnage de Grande Usine réalisé pour le calcul d'incertitude

| | | | |
|---|----------------------------|----|------------------|
| Moyenne empirique μ | | 70 | ppm |
| Ecart-type σ | LS sampling (20kg à 1mm) | 4 | ppm |
| | TS sampling (200g à 150µm) | 2 | ppm |
| | TP sampling (50g à 80µm) | 8 | ppm |
| | Total | 9 | ppm |
| Variance σ^2 | LS sampling | 16 | ppm ² |
| | TS sampling | 4 | ppm ² |
| | TP sampling | 63 | ppm ² |
| | Total | 84 | ppm ² |
| Ecart-type relatif σ/μ | LS sampling | 6 | % |
| | TS sampling | 3 | % |
| | TP sampling | 11 | % |

Tableau 7. Valeur moyenne, déviation standard, variance calculées à partir de l'arbre d'échantillonnage

La teneur en or moyenne (27 valeurs) est de 70 mg/kg, l'écart-type de l'ensemble des 3 étapes est de 9 mg/kg. Dans le cadre de ce projet, cette incertitude est jugée acceptable. La Figure 40 représente la contribution de chacune des étapes à la variance totale.

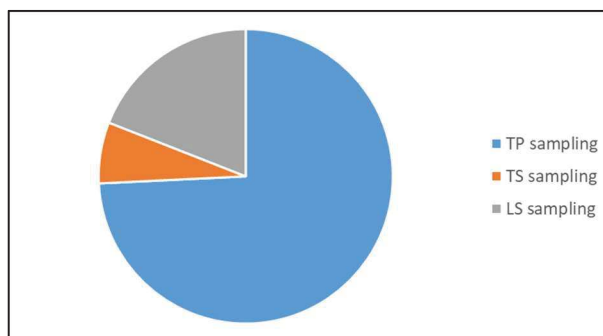


Figure 40. Contribution de chaque étape à la variance totale

La dernière étape de la préparation des échantillons (division de 200 g à 50g à 80µm) est celle qui génère le plus d'incertitude. L'incertitude sur cette étape pourrait être réduite en travaillant avec des masses plus importantes.

Enfin, le Tableau 8 présente la comparaison entre les erreurs d'échantillonnage théoriques et empiriques.

| Etape de préparation | Granulométrie | Masse du lot | Masse de l'échantillon | Erreur relative fondamentale | Erreur empirique |
|----------------------|---------------|--------------|------------------------|------------------------------|------------------|
| | mm | kg | kg | % | % |
| Lab Sample | 1 | 144 | 20 | 3,2 | 6 |
| Test Sample | 0,150 | 20 | 0,2 | 2,6 | 3 |
| Test Portion | 0,080 | 0,2 | 0,05 | 4,1 | 11 |

Tableau 8. Erreurs fondamentale et empirique d'échantillonnage de l'arbre d'échantillonnage sur Grande Usine

L'erreur fondamentale est l'erreur minimale liée à la matière dans le cas d'un échantillonnage parfait. Elle est ici inférieure à l'erreur empirique, ce qui est cohérent avec la théorie de l'échantillonnage et reflète que l'échantillonnage pratiqué n'a pas été parfait. L'écart est considéré comme acceptable pour notre étude.

3.2. CARACTERISATIONS

3.2.1. Echantillons de Dieu Merci

a) Teneurs sur minerai brut

Les échantillons prélevés ont été analysés pour or et multiéléments afin d'avoir une première idée des teneurs sur minerai brut. Les analyses en or ont été réalisées par fusion plombeuse sur 50 g de matériel et les analyses multiéléments par dosage ICP-MS après mise en solution triacide. Le Tableau 9 reporte les résultats.

Les teneurs en or des échantillons sont relativement disparates, et de manière générale moins élevées que pour Bélizon et Grand Usine (cf. *infra*). Plusieurs échantillons présentent des teneurs très faibles, inférieures à 1 g/t alors que d'autres montrent des teneurs plus élevées de 10 à 20 g/t, allant jusqu'à 174,5 g/t pour l'échantillon DM06 (Tableau 9). Ces résultats vont dans le sens des observations réalisées sur le terrain, avec une zone filonienne à faible teneur dans son ensemble, mais comprenant des facies très minéralisés localement. C'est le cas des facies cariés à quartz-oxydes de fer résultant de l'altération de sulfures préexistants (Figure 26 et Figure 27) dont les teneurs en or sont particulièrement élevées (exemple des échantillons DM06 et DM07 à 174,5 et 115 g/t).

Associés à l'or, on note des enrichissements en Ag, Bi et Te, observés très classiquement pour ce type de minéralisations. Ces teneurs sont confirmées par l'observation de micro-inclusions de tellures Au-Ag en lames minces.

Les échantillons DM01-2 et DM01-3 montrent des enrichissements en Mn-Co qui s'explique par la présence probable d'oxydes de manganèse en remplissage de fracture (voir Tableau 1).

| Numéro échantillon | Site | Type | Au | Ag | Al | As | Bi | Co | Cu | Fe | K | Mn | Pb | Ni | Te | W | Zn |
|--------------------|------------|-----------------------|--------------|-------------|------|-----|--------------|-------------|-------------|--------------|-------|--------------|------|-------------|-------------|------|-----------|
| | | | ppm | ppm | % | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | % | % | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| DM01-1 | Dieu Merci | Echantillon de quartz | 23.3 | 7.52 | 0.89 | 2.7 | 8.13 | 10.4 | 25.2 | 13.85 | 0.01 | 149 | 7.2 | 22.5 | 36.1 | 0.9 | 13 |
| DM01-2 | Dieu Merci | Echantillon de quartz | 0.18 | 0.43 | 1.26 | 1.1 | 0.11 | 229 | 16.6 | 2.81 | 0.02 | 10100 | 6.1 | 74.6 | 0.28 | 14.6 | 58 |
| DM01-3 | Dieu Merci | Echantillon de quartz | 0.11 | 0.22 | 0.73 | 0.9 | 0.09 | 39.6 | 7.9 | 2.96 | 0.01 | 3210 | 15.6 | 9.7 | 0.22 | 2.5 | 11 |
| DM02 | Dieu Merci | Echantillon de quartz | 16.1 | 5.41 | 0.14 | 1.4 | 6.2 | 3.9 | 5.4 | 2.83 | <0.01 | 328 | 2.9 | 5.1 | 24.5 | 0.9 | 4 |
| DM06 | Dieu Merci | Echantillon de quartz | 174.5 | 39.9 | 0.09 | 9.3 | 121.5 | 2.3 | 19.8 | 6.44 | <0.01 | 81 | 12.3 | 5 | 181 | 2.4 | 2 |
| DM07 | Dieu Merci | Echantillon de quartz | 115 | 48.2 | 0.02 | 2.4 | 45.1 | 0.9 | 8.8 | 2.32 | <0.01 | 74 | 5.7 | 2.8 | 57.7 | 0.5 | 2 |
| DM08 | Dieu Merci | Echantillon de quartz | 0.94 | 0.67 | 0.03 | 0.7 | 0.66 | 3 | 3.7 | 1.5 | <0.01 | 402 | 8.2 | 5.1 | 1.3 | 2.1 | 2 |
| DM09 | Dieu Merci | Echantillon de quartz | 3.42 | 3.27 | 0.05 | 0.7 | 0.93 | 5.5 | 2.5 | 1.52 | <0.01 | 115 | 2.2 | 9 | 3.88 | 0.1 | 5 |

Tableau 9. Synthèse des teneurs en or et quelques éléments majeurs et traces après analyse sur minerai brut des échantillons prélevés sur le site de Dieu Merci

b) Teneurs sur fractions préparées

Granulométrie

La Figure 41 reporte les répartitions massiques par tranche granulométriques obtenues à l'issue de l'étape de préparation.

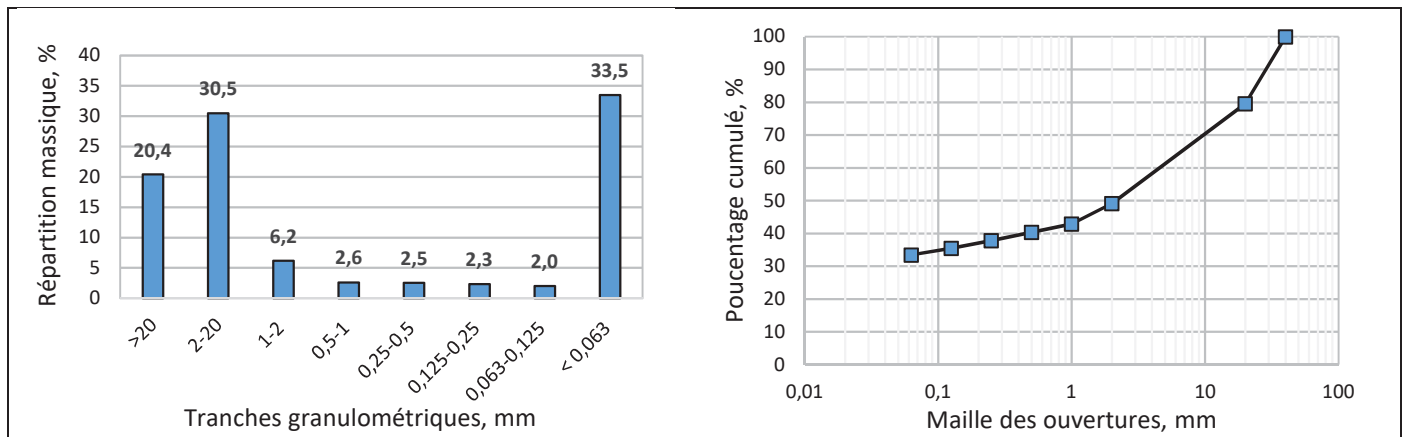


Figure 41. Répartition granulométrique après broyage – échantillon de Dieu Merci

Ces répartitions sont cohérentes avec un matériau de départ composite, constitué de blocs de quartz grossiers (+ 2 mm) en mélange avec des phases argileuses fines.

Granulochimie

Analyse de l'or total

Les Figure 42 et Figure 43 présentent les masses, teneurs et répartition de l'or par tranche granulométrique.

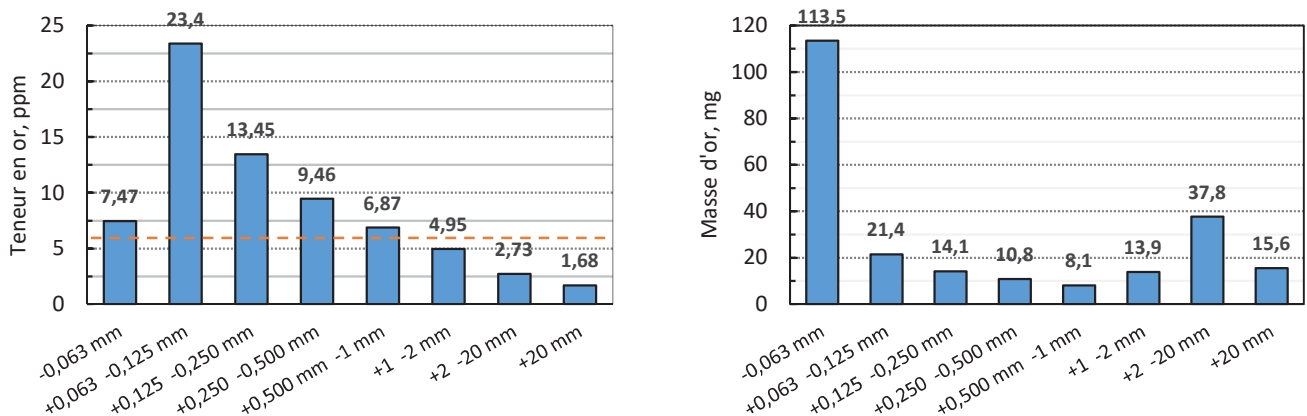


Figure 42. Teneurs en or dans les fractions, échantillon de Dieu Merci (tirets oranges : teneur moyenne 5,2 ppm)

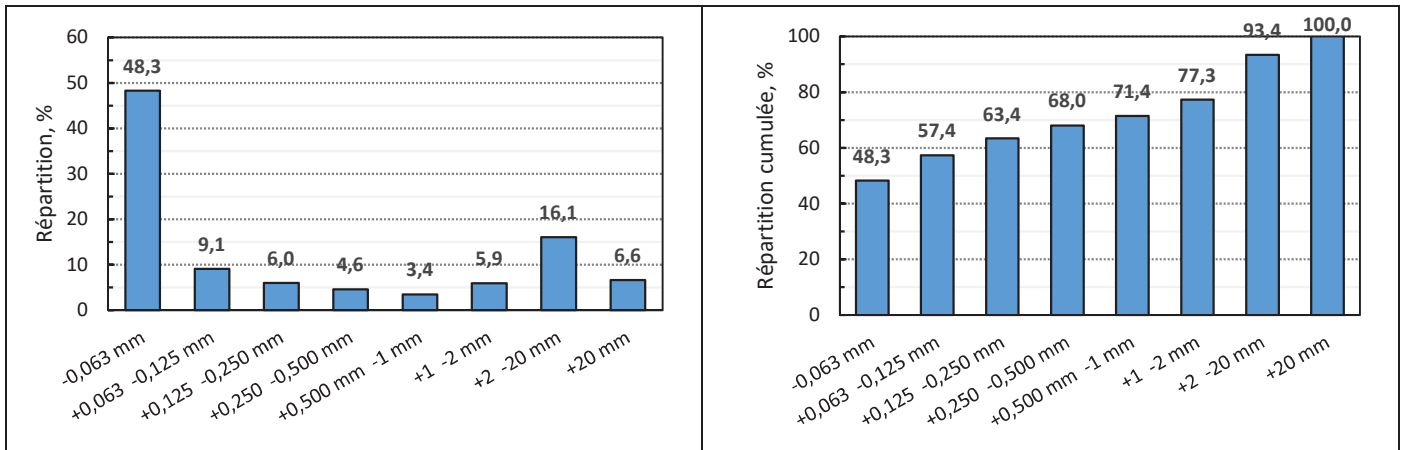


Figure 43. Répartition de l'or dans les fractions, échantillon de Dieu Merci

Les teneurs deviennent supérieures à la teneur moyenne de l'échantillon pour les fractions inférieures à 500 μm , puis augmente pour les granulométries de plus en plus fines, jusqu'à atteindre un maximum dans la fraction 63/125 μm : ceci suggère qu'il existe des paillettes d'or de taille comprises entre 250 et 500 μm et que la maille de libération des particules d'or est supérieure à 63 μm . La Figure 43 indique que près de la moitié de l'or est présent dans la fraction -63 μm , du fait que cette dernière est majoritaire dans l'échantillon - presque 34 % de l'échantillon en masse.

Analyse de l'or libre

La Figure 44 reporte le pourcentage d'or libre obtenu par amalgamation selon le protocole décrit en section 2.2.2 pour les différentes fractions granulométriques.

Le pourcentage quasiment nul pour la fraction 1/2 mm est cohérente avec l'absence de paillettes à cette granulométrie grossière. La valeur n'est toutefois pas tout à fait nulle, ceci pourrait traduire un début d'amalgamation de surfaces d'or non libre exposées au mercure de la solution aqueuse. Le pourcentage obtenu pour la fraction -63 μm est relativement bas, comparativement aux autres fractions, et plutôt inattendu dans la mesure où cette fraction devrait contenir le plus d'or libre.

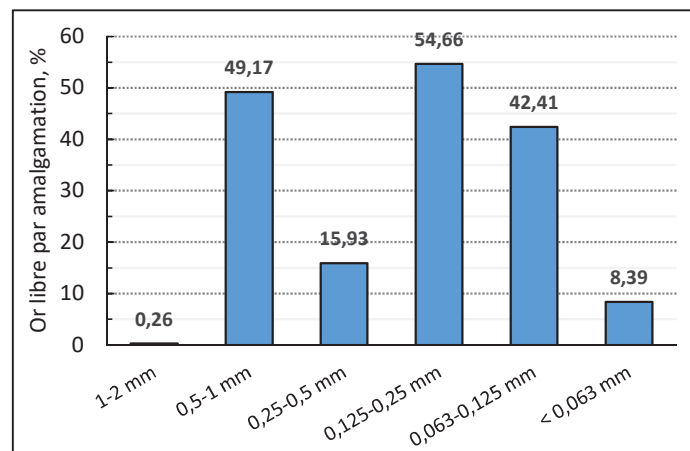


Figure 44. Pourcentage d'or libre obtenu par amalgamation, échantillon de Dieu Merci

Ce résultat peut s'expliquer par deux facteurs à minima:

- un échantillonnage imparfait du solide utilisé pour l'essai d'amalgamation, qui mènerait à une sous-représentation de l'or libre dans cette fraction;
- une quantité d'interface mercure-or trop faible dans le milieu, qui mènerait à une quantité d'or dissoute également limitée.

Ce deuxième point trouve son origine dans les conditions d'agitation et les propriétés physico-chimiques des différents constituants du système. La tension de surface mercure-eau élevée (374 mN/m à 25 °C) mène à un arrangement du mercure liquide sous la forme d'un amas unique décanté au fond de la solution aqueuse. Le rôle de l'agitation est de désagréger cet amas, sous la forme de gouttelettes qui vont ainsi présenter une surface d'échange, et donc une capacité de captation des paillettes d'or, plus importante. La taille de ces gouttelettes est d'autant plus fine que les contraintes de cisaillement hydrodynamiques créées par l'agitation sont élevées, et ces dernières dépendent à la fois de la géométrie du mobile d'agitation et de sa vitesse de rotation. Une agitation insuffisante ne permet ainsi pas de maintenir un nombre suffisant de fines gouttelettes dans le milieu, ces dernières préférant coalescer par l'effet de la tension de surface sous la forme de grosses gouttes, ce qui se traduit par une diminution de la surface de mercure disponible pour réagir avec les paillettes d'or. La présence du matériau de gangue accentue les difficultés car le solide entrave la propagation des forces de cisaillement, empêche une répartition homogène des gouttelettes dans le milieu, et limite les contacts entre gouttelettes et paillettes. Ces différents effets sont d'autant plus marqués que la pulpe est concentrée et/ou que les particules solides sont fines.

Dès lors, les résultats obtenus par cette méthode de dosage dépendent très probablement de, et sont limités par, la surface d'échange totale déployée par les gouttelettes et sa répartition dans la pulpe, paramètres dont le contrôle direct par l'agitation est impossible dans un système aussi complexe.

Répartition des oxydes

La Figure 45 reporte les teneurs de différents oxydes : majoritaires, minoritaires mais identifiés ("Autres identifiés") et minoritaires mais non identifiés ("Autres non identifiés"). Chaque valeur correspond à une moyenne réalisée sur un triplicat. Les oxydes dits minoritaires présentent une teneur inférieure à 2 (%)_{pds} dans toutes les classes granulométriques. Les teneurs des oxydes décrits comme non identifiés sont calculées par différence, ce qui explique les valeurs négatives pour les fractions 2/20 et +20 mm.

| Tranche | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SiO ₂ | Autres identifiés | Autres non identifiés |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| mm | % | % | % | % | % |
| + 20 | 0,30 | 4,51 | 94,83 | 0,65 | (-) |
| 2 / 20 | 0,51 | 5,20 | 93,83 | 0,92 | (-) |
| 1 / 2 | 1,16 | 9,31 | 86,23 | 2,01 | 1,28 |
| 0,5 / 1 | 1,75 | 10,50 | 84,47 | 1,84 | 1,45 |
| 0,25 / 0,5 | 1,85 | 11,47 | 83,40 | 1,66 | 1,62 |
| 0,125 / 0,25 | 3,18 | 12,30 | 80,83 | 1,39 | 2,30 |
| 0,063 / 0,125 | 7,47 | 11,90 | 74,33 | 1,49 | 4,81 |
| - 0,063 | 26,97 | 17,03 | 38,13 | 2,09 | 15,77 |

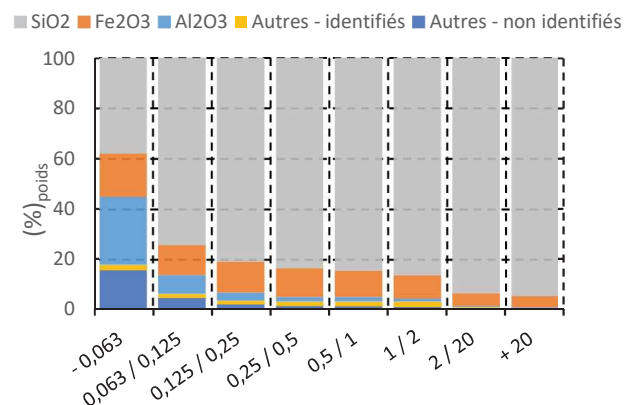


Figure 45. Répartition des principaux oxydes, échantillon de Dieu Merci. Oxydes identifiés : CaO, K₂O, MgO, Na₂O, MnO, P₂O₅, TiO₂. (-) : valeur négative

Les résultats font apparaître une forte composante siliceuse pour les fractions les plus grossières et une évolution graduelle vers des fractions fines aux caractéristiques plus argileuses.

c) Analyse pétrographique

L'analyse au microscope électronique de paillasse a porté sur cinq lames minces. L'analyse fait ressortir la présence de veines de quartz peu déformées, quelquefois riches en oxydes de fer secondaires (principalement goethite) à texture collomorphe en remplacement probable de cristaux de pyrite préexistants. Les grains d'or sont peu fréquents, leur taille est majoritairement inférieure à 50 μm , et plus souvent à 15 μm (Figure 46). Des micro inclusions de tellurures Au-Ag ou à or seul sont également observées.



Figure 46. Grains d'or associés à des oxydes de fer de remplacement de la pyrite et en inclusion dans la pyrite, échantillon de Dieu Merci. Echelle du microscope : 50 μm .

L'or est peu présent dans les échantillons prélevés sur le site de Dieu Merci. Le matériel exploité correspond principalement à des latérites à rares fragments de quartz. L'or est principalement présent dans la latérite (or éluvionnaire), et la minéralisation primaire est peu représentée dans les échantillons prélevés. Ceci est étayé par les résultats des analyses géochimiques, en particulier au niveau de la teneur moyenne sur l'ensemble des classes granulométriques en Al_2O_3 à 9,6 %, avec une valeur maximale à 17 % dans la fraction granulométrique à -125 μm , correspondant à l'abondance de la fraction argileuse.

d) Analyse minéralogique qualitative

L'Annexe 2 regroupe l'ensemble des spectres DRX pour les différentes fractions granulométriques du prélèvement de Dieu Merci. Les résultats indiquent que les fractions +500 μm sont composées de quartz en très forte proportion, en accord avec les résultats présentés Figure 45. Les fractions plus fines, jusqu'à +150 μm , contiennent également des oxydes de fer, très majoritairement des goethites présentant des substitutions à l'aluminium de composition moyenne typique $(\text{Fe}_{0.83}\text{Al}_{0.17})\text{O}(\text{OH})$, et des traces d'hématite. Enfin, les fractions -125 μm présentent les compositions les plus riches, avec la présence marquée de gibbsite et de phases argileuses de type kaolinite.

L'examen de lames minces au microscope électronique (Figure 47) fait apparaître des particules d'or libérées et des inclusions de grains d'or, dont la taille reste très petite – autour de 10 à 15 μm . La composition chimique est confirmée par l'analyse EDS (Figure 48).

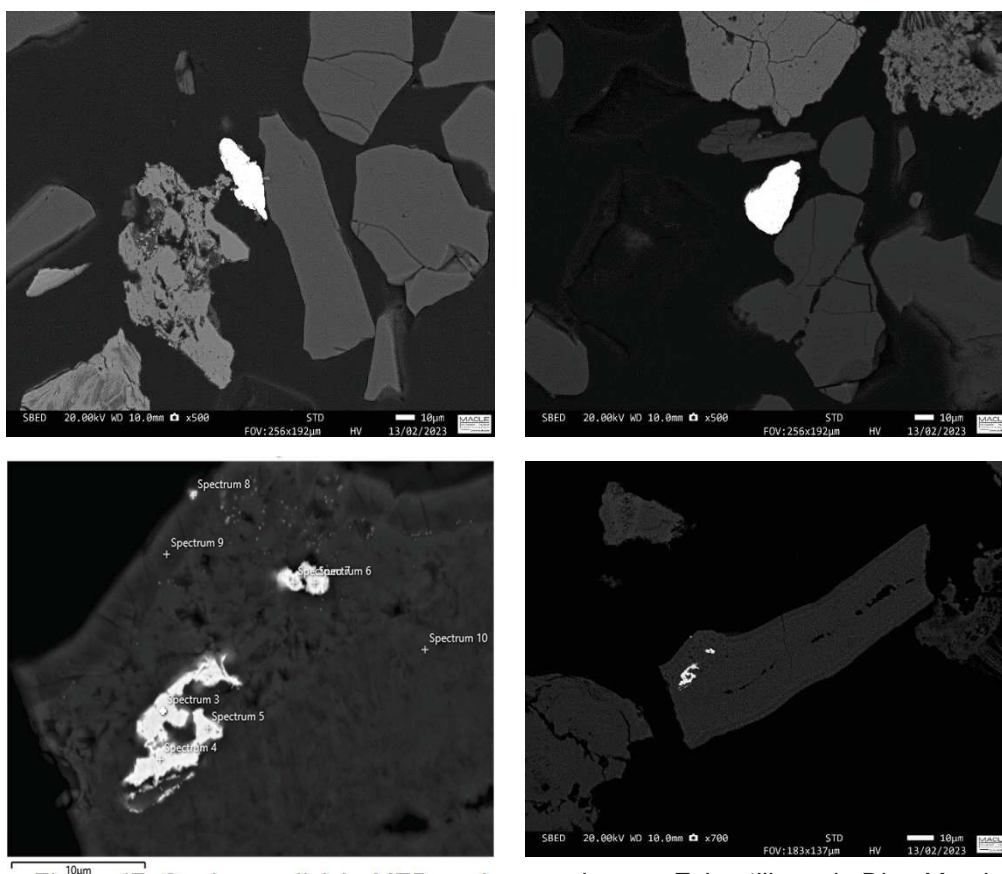


Figure 47. Quelques clichés MEB sur lames minces – Echantillons de Dieu Merci

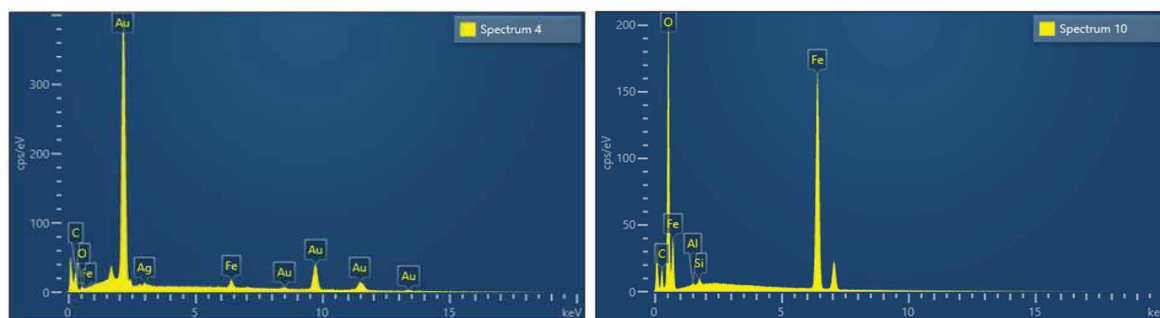


Figure 48. Composition chimique aux spots 4 et 10 (localisation sur les clichés de la Figure 47)

e) Résumé

Les résultats des analyses chimiques et minéralogiques confirment la constitution composite de l'échantillon, avec des fractions grossières très majoritairement siliceuses, et des fractions -125 µm au caractère latéritique plus prononcé. La plus forte teneur en or est observée dans la fraction 63/125 µm, mais la quantité la plus importante est dans la fraction -63 µm, dont la teneur proche de la moyenne de l'échantillon à 5,2 ppm.

Une coupure à 125 µm produirait une fraction représentant 35 % de l'échantillon total, à 8,4 ppm d'or, pour une récupération de 57 % de l'or. Toutefois, tout l'or dans cette fraction -125 µm n'est pas nécessairement libéré et donc accessible à une récupération par voie purement physique. Le mode de la maille de libération, estimée qualitativement à partir des clichés aux microscopes optiques et électroniques, se situe autour de 15-20 microns. La chaîne de traitement pour l'échantillon de Dieu Merci doit donc permettre une récupération de particules d'or très fines et relativement peu concentrées par rapport à la moyenne de l'échantillon.

3.2.2. Echantillons de Bélizon

a) Teneurs sur minerai brut

Les teneurs en or sur Bélizon sont particulièrement élevées et relativement homogènes (Tableau 10). Concernant les échantillons composites, représentatifs de l'échantillon de 1 tonne, exceptés BZ01-4 et BZ01-5 à 4,65 et 3,87 g/t correspondant à une passée moins minéralisée, les teneurs en or sont comprises entre 39,5 et 77,6 g/t. En prenant en compte l'ensemble des échantillons composites, on obtient une moyenne de 36,6 g/t. Concernant les échantillons de quartz individuel, malgré un aspect relativement commun du quartz, ils présentent des teneurs entre 15,65 et 38,5 g/t attestant de facies particulièrement minéralisés en or.

Les teneurs des autres éléments ne présentent pas de valeurs remarquables. L'or ne semble pas être accompagné sur ce site par d'autres éléments traceurs, confirmant les observations de terrain et l'absence de minéraux remarquables en dehors du quartz. Seules les teneurs en Al et K sont importantes, liées à la forte proportion d'argiles.

| Numéro échantillon | Site | Type | Au | Ag | Al | As | Bi | Co | Cu | Fe | K | Mn | Pb | Ni | Te | W | Zn |
|--------------------|---------|-----------------------|-------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|
| | | | ppm | ppm | % | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | % | % | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| BZ01-1 | Bélizon | Echantillon composite | 77.6 | 0.08 | 1.84 | 0.9 | 0.15 | 0.4 | 3.4 | 1.58 | 0.14 | 56 | 1.4 | 2.5 | 2.33 | 7.9 | 4 |
| BZ01-2 | Bélizon | Echantillon composite | 57.4 | 0.1 | 3.98 | 0.8 | 0.18 | 0.5 | 5.7 | 1.49 | 0.4 | 72 | 2.2 | 1.6 | 2.15 | 8.3 | 8 |
| BZ01-3 | Bélizon | Echantillon composite | 39.5 | 0.16 | 4.34 | 0.9 | 0.13 | 0.6 | 6.5 | 1.74 | 0.39 | 69 | 3.4 | 1.9 | 2.54 | 13.3 | 8 |
| BZ01-4 | Bélizon | Echantillon composite | 4.65 | 0.03 | 6.33 | 1 | 0.03 | 1.1 | 9.7 | 2.45 | 0.31 | 102 | 8 | 3.7 | 0.49 | 2.3 | 11 |
| BZ01-5 | Bélizon | Echantillon composite | 3.87 | 0.02 | 7.64 | 1.2 | 0.03 | 1.3 | 11.6 | 3.02 | 0.36 | 104 | 9.9 | 5 | 0.56 | 2.4 | 13 |
| BZ02 | Bélizon | Echantillon de quartz | 38.5 | 0.08 | 1.94 | 2.5 | 0.07 | 0.2 | 6.4 | 4.71 | 0.19 | 40 | 2.6 | 1 | 1.05 | 3 | 3 |
| BZ03 | Bélizon | Echantillon de quartz | 15.7 | 0.11 | 0.57 | 1.3 | 0.13 | 0.2 | 5.5 | 2.22 | 0.11 | 55 | 2.3 | 1.2 | 2.72 | 2 | 6 |
| BZ04 | Bélizon | Echantillon de quartz | 15.65 | 0.04 | 1.11 | 2.4 | 0.05 | 0.2 | 2.7 | 5.45 | 0.09 | 41 | 2.5 | 1.1 | 0.43 | 5.5 | 2 |

Tableau 10. Synthèse des teneurs en or et en quelques éléments majeurs et traces après analyse sur minerai brut des échantillons prélevés sur le site de Bélizon

b) Teneurs sur fractions préparées

Granulométrie

La Figure 49 reporte les répartitions par tranches granulométriques obtenues après préparation des échantillons.

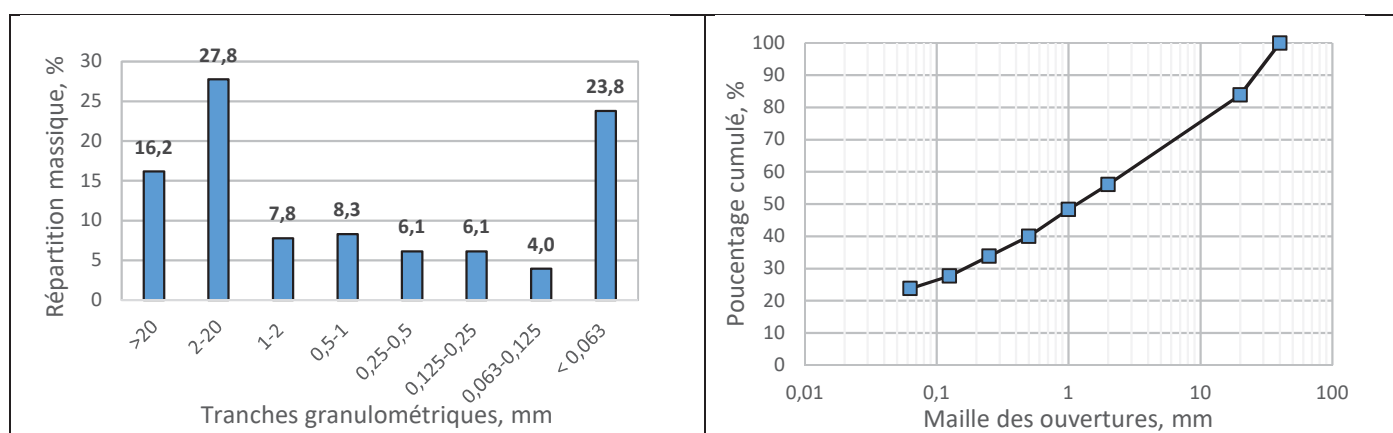


Figure 49. Répartition granulométrique après broyage – échantillon de Bélizon

A l'instar des échantillons de Dieu Merci, la répartition granulométrique est cohérente avec un matériau composite, formé à partir de blocs de roches et de couches latéritiques.

Granulochimie

Analyse de l'or total

Les Figure 50 et Figure 51 présentent les masses, teneurs et répartition de l'or par tranche granulométrique

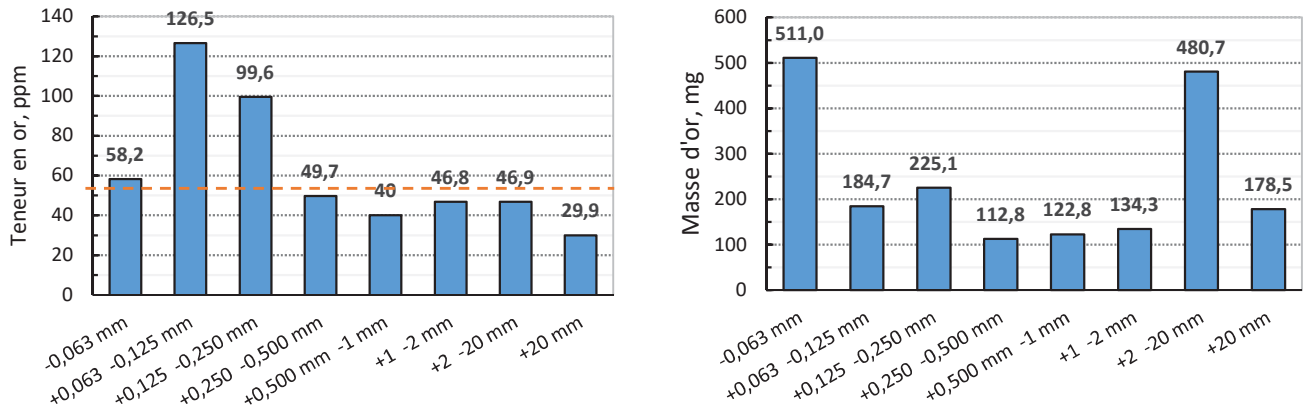


Figure 50. Teneurs en or dans les fractions, échantillon de Bélizon (tirets oranges : teneur moyenne 53 ppm)

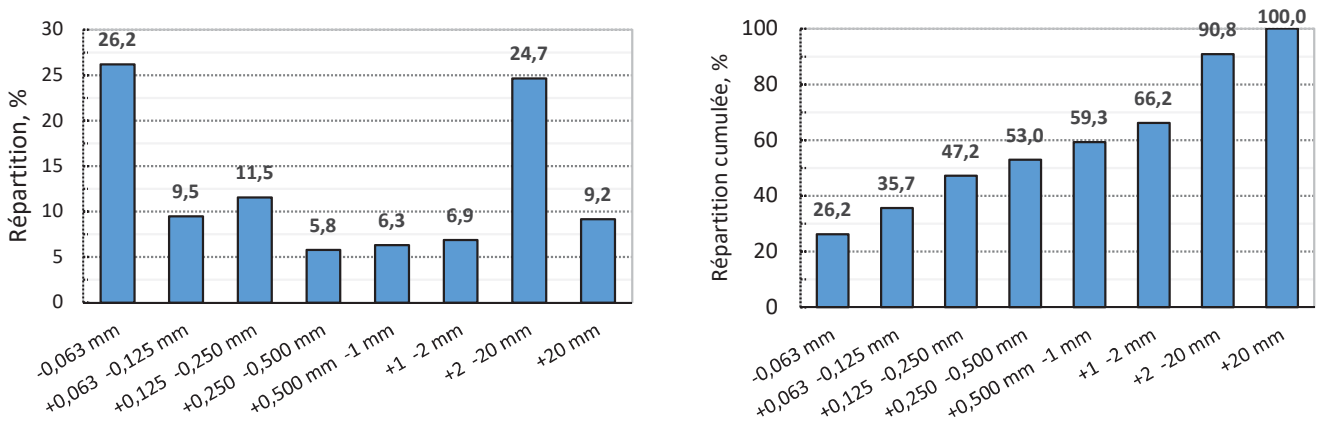


Figure 51. Masse et répartition de l'or dans les fractions, échantillon de Bélizon

La Figure 50 montre une teneur importante de l'or dans les fractions entre 63 et 250 μm , avec un maximum atteint pour la fraction 63/125 μm : ceci suggère que la maille de libération des particules d'or est supérieure à 63 μm . La Figure 51 indique que les fraction -63 μm et +2 mm concentrent respectivement 26 et 34 % de l'or de l'échantillon. L'or semble donc être présent non seulement dans les parties argileuses, mais aussi dans les roches, à la différence des échantillons prélevés sur le site de Dieu Merci.

Répartition des oxydes

La Figure 50 reporte les teneurs de différents oxydes : majoritaires, minoritaires mais identifiés ("Autres identifiés") et minoritaires mais non identifiés ("Autres non identifiés"). La définition et le mode de calcul de ces différentes catégories sont données pour le cas de Dieu Merci (section 3.2.1).

| Tranche | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SiO ₂ | Autres identifiés | Autres non identifiés |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| mm | % | % | % | % | % |
| + 20 | 0,96 | 1,28 | 98,63 | 0,05 | (-) |
| 2 / 20 | 1,82 | 1,56 | 97,13 | 0,08 | (-) |
| 1 / 2 | 1,54 | 0,92 | 97,80 | 0,12 | (-) |
| 0,5 / 1 | 1,54 | 0,95 | 97,47 | 0,17 | (-) |
| 0,25 / 0,5 | 1,73 | 0,98 | 97,67 | 0,31 | 0,05 |
| 0,125 / 0,25 | 3,94 | 1,43 | 93,33 | 0,72 | (-) |
| 0,063 / 0,125 | 9,51 | 2,40 | 83,27 | 1,61 | 1,30 |
| - 0,063 | 30,63 | 5,30 | 48,80 | 2,03 | 4,82 |

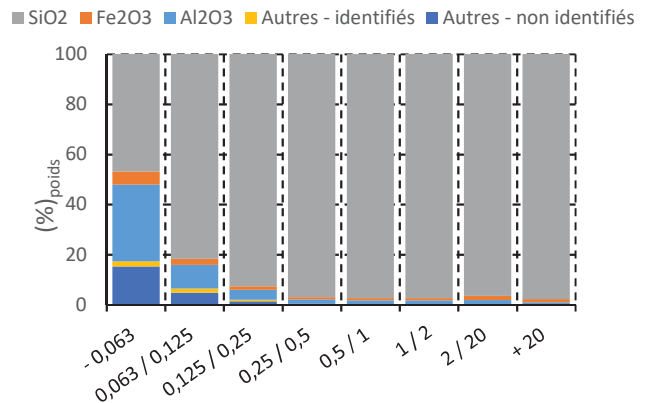


Figure 52. Répartition des principaux oxydes, échantillon de Bélizon. Oxydes identifiés : CaO, K₂O, MgO, Na₂O, MnO, P₂O₅, TiO₂. (-) : valeur négative

Les résultats font apparaître une forte composante siliceuse, tant pour les fractions les plus grossières (2/20 et +20 mm) que pour des fractions relativement fines jusqu'à +125 µm. Seules la fraction à -63 µm présentent un caractère argileux marqué. En comparaison des échantillons de Dieu Merci, la transition matériau siliceux vers matériau argileux se fait à des granulométries caractéristiques beaucoup plus fines, ce qui est cohérent avec le fait que le matériau prélevé sur site a été extrait d'une couche de plus grande profondeur, moins marquée par les phénomènes d'altération météoritiques.

c) Analyse pétrographique

L'analyse au microscope électronique de pailasse a porté sur trois lames minces. L'analyse fait ressortir la présence de veines de quartz très déformées, avec présence de bouffées de micas blancs (muscovite) et de rares oxydes de fer secondaires à texture collomorphe. Aucun grain d'or n'est observé dans les échantillons.

d) Analyse minéralogique qualitative

L'Annexe 2 regroupe l'ensemble des spectres DRX pour les différentes fractions granulométriques du prélèvement de Bélizon. Les résultats indiquent que les fractions +125 µm sont composées de quartz en très forte proportion, avec des traces de muscovite. Les fractions plus fines voient l'apparition d'argiles sous de type interstratifié illite-smectite et kaolinite. Cette dernière phase est quasiment majoritaire dans la fraction à -63 µm. L'ensemble de ces observations est cohérent avec un matériau altéré.

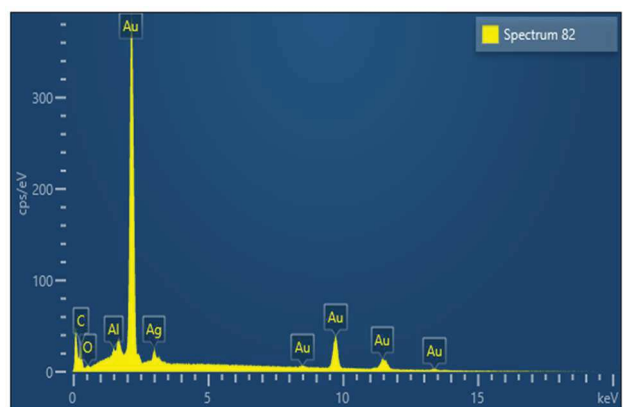
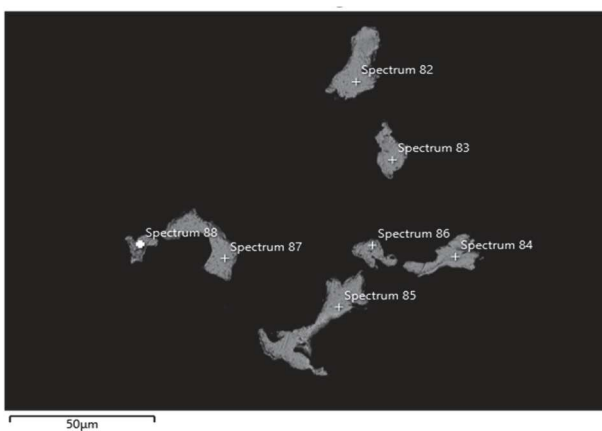


Figure 53. Cliché MEB sur lames minces et spectre EDS correspondant au spot 82 – Echantillon de Bélizon

L'examen de lames minces au microscope électronique (Figure 53) fait apparaître des particules d'or libérées et des inclusions de grains d'or, dont la plus grande dimension varie entre 20 et 50 µm. La composition chimique de ces particules est confirmée par l'analyse EDS.

e) Résumé

A l'instar des échantillons de Dieu Merci, la répartition granulométrique est cohérente avec un matériau composite, formé à partir de blocs de roches et de couches latéritiques. Le caractère siliceux des fractions supérieures à 125 µm est toutefois davantage marqué, avec des teneurs théoriques en SiO₂ variant entre 93 et 98 %, contre 80 à 93 % pour les fractions de Dieu Merci. La plus forte teneur en or est observée dans la fraction 63/125 µm, mais la quantité la plus importante est dans la fraction <63 µm, et celle-ci présente une teneur proche de la teneur moyenne de l'échantillon à 53 ppm.

Une coupure à 125 µm produirait une fraction représentant 38 % de l'échantillon total et titrant à 68 ppm d'or, pour une récupération de 36 % de l'or initial. Ici aussi, tout cet or n'est pas nécessairement sous forme libérée et donc récupérable par voie purement physique. Le mode de la maille de libération, estimée qualitativement à partir des clichés aux microscopes optiques et électroniques, se situe autour de 20-50 µm.

La chaîne de traitement pour l'échantillon de Bélizon doit donc, comme pour Dieu Merci, permettre une récupération de particules d'or très fines. Compte-tenu des quantités importantes d'or dans les fractions plus grossières, et qui correspondent probablement à de l'or inclus dans les matrices siliceuses, un procédé visant une récupération plus importante devra inclure des étapes de réduction de taille du minerai.

3.2.3. Echantillons de Grande Usine

a) Teneurs sur minerai brut

A l'exception de T12, les autres tas présentent des teneurs particulièrement fortes, entre 53 et 96,6 g/t (Tableau 11), confirmant les résultats d'analyse fournis par l'EMOPI entre 30 et 60 g/t.

Comme pour Dieu Merci, on observe des teneurs élevées en Ag, Bi, Te, confirmant les observations en lames minces avec l'identification de nombreux tellures à Au, Au-Ag et Bi. Ce type d'association à Au-Ag-Te-Bi, identifié géochimiquement et observé minéralogiquement, est relativement fréquent des systèmes aurifères de type "or orogénique". De manière plus inédite, on note une teneur de 232 ppm W pour l'échantillon T15. Cette forte valeur a également été confirmée minéralogiquement avec l'observation macroscopique de scheelite dans l'échantillon T15 associé à certains blocs de quartz. Les teneurs ne permettent pas d'envisager dans l'état une valorisation du tungstène, mais c'est un élément remarquable d'intérêt métallogénique dans une approche plus globale de caractérisation des métaux connexes associés aux minéralisations aurifères.

| Numéro échantillon | Site | Type | Au | Ag | Al | As | Bi | Co | Cu | Fe | K | Mn | Pb | Ni | Te | W | Zn |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|------|-----|--------------|-----|-------------|------|------|-----|-------------|-----|-------------|------------|-----------|
| | | | ppm | ppm | % | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | % | % | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| GU01-T12 | Grand Usine | Echantillon composite | 0.21 | 0.02 | 0.14 | 3.2 | 0.1 | 0.5 | 1.4 | 1.03 | 0.03 | 111 | 3.7 | 1.6 | 0.16 | 8.6 | 5 |
| GU01-T15 | Grand Usine | Echantillon composite | 53 | 8.48 | 0.27 | 4.2 | 19.35 | 5.2 | 7.2 | 1.02 | 0.07 | 160 | 38.3 | 2.2 | 54.2 | 232 | 31 |
| GU01-T16 | Grand Usine | Echantillon composite | 96.6 | 6.99 | 0.12 | 2.9 | 60.3 | 2.8 | 10.9 | 1 | 0.02 | 106 | 29.5 | 2.2 | 77.5 | 4.7 | 65 |
| GU01-T21 | Grand Usine | Echantillon composite | 69.1 | 6.67 | 0.31 | 8.1 | 35.3 | 4.7 | 14.8 | 1.52 | 0.11 | 175 | 66.2 | 2 | 41.7 | 7 | 18 |

Tableau 11. Synthèse des teneurs en or et en quelques éléments majeurs et traces après analyse sur minerai brut des échantillons prélevés sur le site de Grand Usine

On observe également quelques valeurs légèrement plus élevées en Pb, Cu, Zn, en lien potentiellement avec la présence de sulfures (observation en lames minces de galène et de covellite en remplacement de la chalcopyrite, cf. *infra*).

b) Teneurs sur fractions préparées

Granulométrie

La Figure 54 reporte les répartitions par tranches granulométriques.

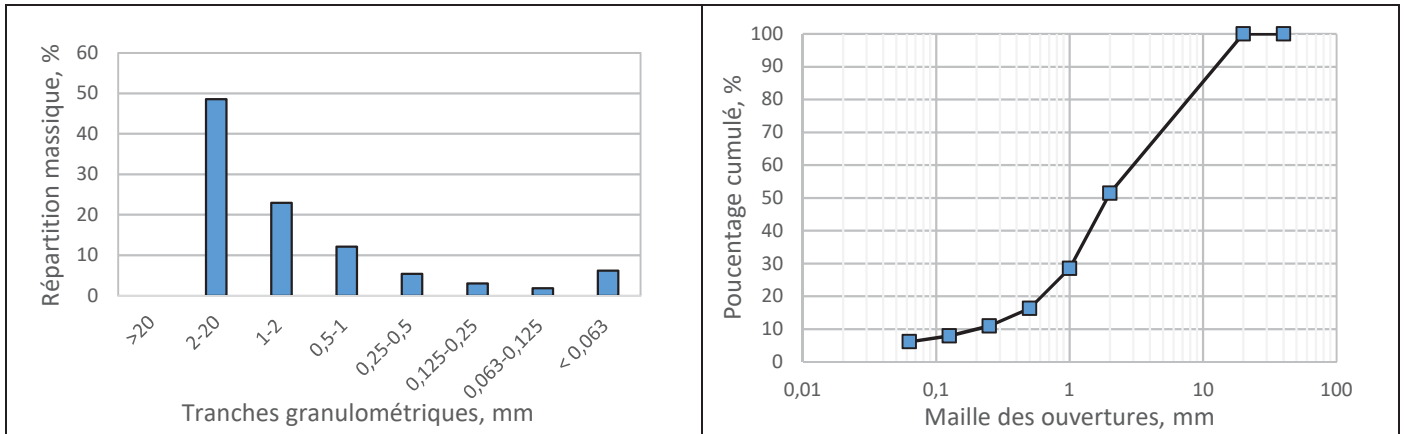


Figure 54. Répartition granulométrique après broyage – échantillon de Grande Usine

Granulochimie

Analyse de l'or total

Les Figure 55 et 56 présentent les masses, teneurs et répartition de l'or par tranche granulométrique.

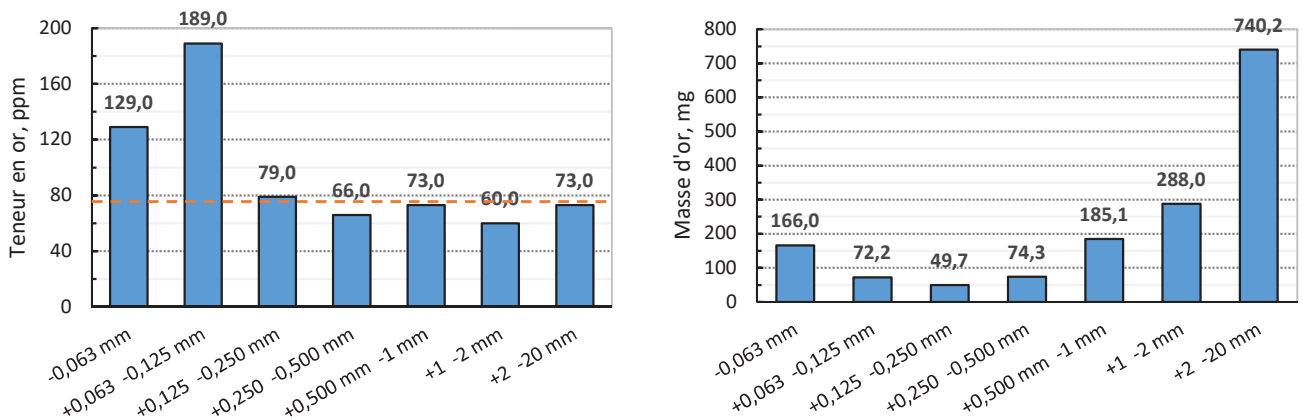


Figure 55. Teneurs en or dans les fractions, échantillon de Grande Usine (tirets : teneur moyenne à 75 ppm)

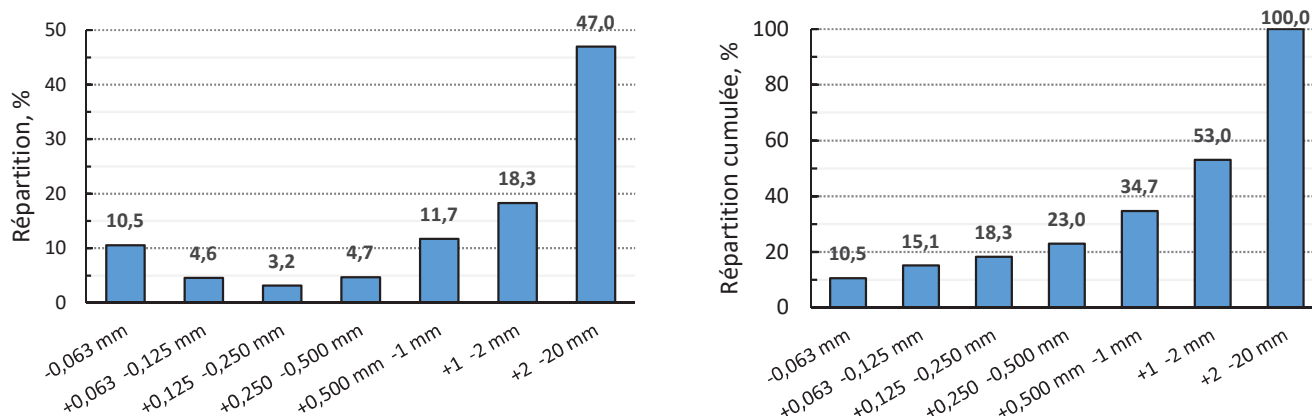


Figure 56. Masse et répartition de l'or dans les fractions, échantillon de Grande Usine

Les teneurs sont particulièrement importantes dans les fractions -125 µm, mais l'or est majoritairement (environ 47 %) présent dans les fractions +2 mm, ce qui est cohérent avec le fait qu'il est inclus dans les blocs de quartz grossiers.

Répartition des oxydes

La Figure 55 reporte les teneurs de différents oxydes : majoritaires, minoritaires mais identifiés ("Autres identifiés") et minoritaires mais non identifiés ("Autres non identifiés"). La définition et le mode de calcul de ces différentes catégories sont données pour le cas de Dieu Merci (section 3.2.1).

| Tranche | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SiO ₂ | Autres identifiés | Autres non identifiés |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| mm | % | % | % | % | % |
| + 2 | bdl | 0,12 | 101,33 | bdl | (-) |
| 1 / 2 | bdl | 0,18 | 99,83 | bdl | (-) |
| 0,5 / 1 | bdl | 0,24 | 100,67 | bdl | (-) |
| 0,25 / 0,5 | bdl | 0,37 | 101,00 | bdl | (-) |
| 0,125 / 0,25 | bdl | 0,54 | 101,00 | bdl | (-) |
| 0,063 / 0,125 | 0,21 | 0,76 | 100,33 | bdl | (-) |
| - 0,063 | 0,92 | 2,56 | 96,47 | 1,61 | (-) |

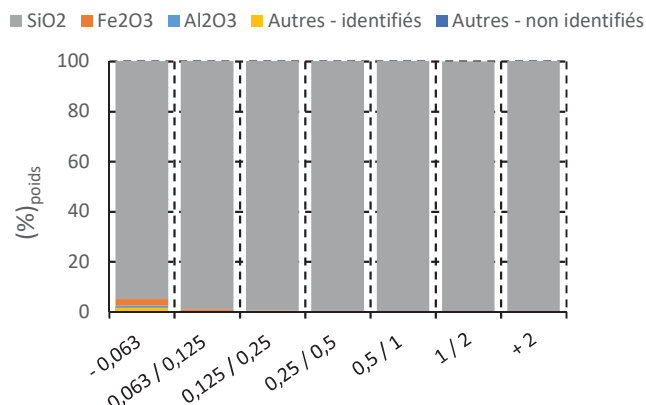


Figure 57. Répartition des principaux oxydes, échantillon de Grande Usine. Oxydes identifiés : CaO, K₂O, MgO, Na₂O, MnO, P₂O₅, TiO₂. (-) : valeur négative. bdl : sous le seuil de détection.

c) Analyse pétrographique

L'analyse au microscope électronique de pailleuse a considéré onze lames minces. Les échantillons du site de Grande Usine correspondent à des fragments de veines de quartz minéralisées représentatives de la minéralisation primaire, avec une signature typique des gisements d'or orogénique. Les veines de quartz sont intensément déformées avec des évidences de recristallisations aux joints de grains. La tourmaline est présente sous forme de veinules également déformées qui recoupent les veines de quartz.

Les paragenèses minéralisées sont sous forme de réseaux frustes de micro veinules à pyrite, marcassite, quelquefois pyrrhotite, avec des traces de covellite en remplacement de chalcopyrite, témoignant d'une altération tardive d'origine supergène. Comme pour les échantillons de Dieu Merci et Bélizon, les cristaux de pyrite sont en cours de remplacement par des oxydes de fer secondaires.

L'or est présent sous forme d'un événement plus tardif, matérialisé par un réseau frustre de fines veinules discontinues, où il est observé sous forme de grains libres dans le quartz (taille souvent inférieure à 50 μm , quelques rares occurrences entre 100 et 150 μm), en micro inclusions dans des cristaux de pyrite, ou en association dans des micro veinules avec de nombreux tellurures à Au, Au-Ag, et Bi (Figure 58). La composition chimique précise de ces différents tellurures sera déterminée au moyen d'analyses chimiques in-situ à la microsonde électronique.

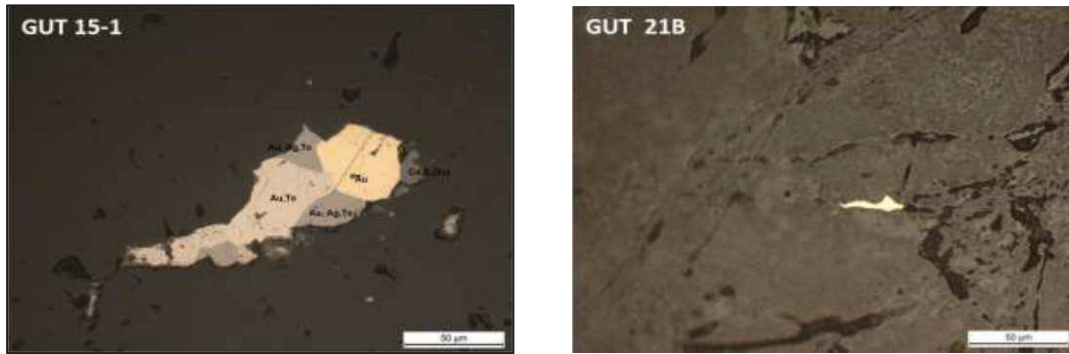


Figure 58. Gauche : grains d'or en association avec différentes espèces de tellurures, échantillon Grande Usine. Droite : grains d'or en association avec les oxydes de fer. Echelle 50 μm .

Même lorsqu'ils sont observés dans les cristaux de pyrite, les grains d'or se disposent le long des micro fractures qui affectent ces cristaux ou aux joints de grains, suggérant le caractère plus tardif de l'épisode de dépôt de l'or. Celui-ci est présent davantage sous forme de placages fins dans un réseau de microfissures que sous forme de grains, ce qui témoigne d'une altération supergène peu marquée. La dimension de ces placages est majoritairement inférieure à 50 μm .

d) Analyse minéralogique qualitative

L'Annexe 2 regroupe l'ensemble des spectres DRX pour les différentes fractions granulométriques du prélèvement de Grande Usine. L'examen de lames minces au microscope électronique (Figure 59) présente quelques particules d'or libérées.

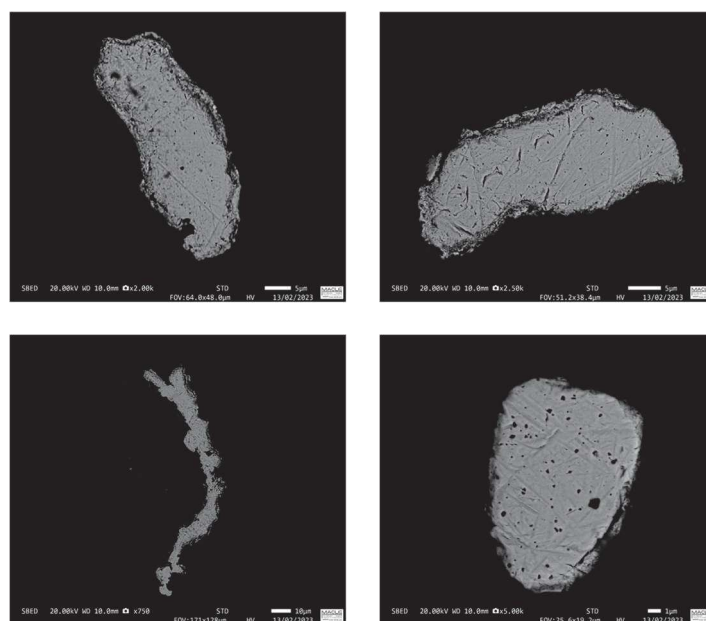


Figure 59. Cliché MEB sur lames minces – Echantillon de Grande Usine

Les observations au microscope électronique confirment la constitution en placage de l'or dans les échantillons, qui ressort sous la forme de particules dont la forme s'éloigne de la sphéricité. Les plus grandes dimensions sont de l'ordre de 30 à 50 µm.

e) Résumé

A la différence des échantillons de Dieu Merci et Bélizon, le minerai récupéré sur le site de Grande Usine est constitué très majoritairement de blocs de quartz. Une coupure à 125 µm, comme celle calculée pour les échantillons de Dieu Merci et Bélizon, produirait un échantillon représentant 15 % de l'échantillon global, titrant à 147 ppm, mais pour une récupération que de 15 % de l'or présent. Les analyses minéralogiques qualitatives identifient l'or sous forme de placages de faibles dimension.

Le traitement de ces échantillons nécessitera donc un broyage fin pour atteindre de granulométries de l'ordre de 50 µm, et la mise en œuvre d'une technique de récupération efficace adaptée à des paillettes (faible épaisseur, grande longueur possible correspondant aux plages supérieures à 50 µm) et non à des grains.

3.3. ESSAIS DE SEPARATION ET DE RECUPERATION DE L'OR A PETITE ECHELLE

3.3.1. Principe des opérations

L'objectif des opérations de minéralurgie est de concentrer l'or dans une fraction solide. L'opération est réalisée sur une table de laboratoire dite Mozley, équipée d'un plateau plat ou incurvé. La séparabilité théorique de l'or du reste des matériaux, ou gangue, par un procédé gravimétrique, peut être estimée au moyen d'un critère de concentration CC :

$$CC = \frac{d_{or} - d_{eau}}{d_{gangue} - d_{eau}}$$

avec d_{or} , d_{eau} , et d_{gangue} les densités en kg.m^{-3} de l'or, de l'eau (phase porteuse) et de la gangue respectivement.

Compte-tenu des compositions minéralogiques, les densités de la gangue sont estimées par calcul entre 2,76 et 2,97 kg.m^{-3} pour les échantillons de Dieu Merci, 2,69 et 2,79 kg.m^{-3} pour les échantillons de Bélizon, et 2,66 et 2,73 kg.m^{-3} pour les échantillons de Grande Usine. Les valeurs correspondantes du critère CC varient entre 9,3 et 10 sur l'ensemble des échantillons. La séparation est jugée possible dès lors que la valeur du critère de séparation dépasse un certain seuil, d'autant plus grand que les particules à séparer sont fines. Pour des particules à -75 µm, la valeur du seuil est de 2,5 : dans le cas des échantillons de l'étude, l'or peut donc en théorie être très bien séparé par tablage.

3.3.2. Détails des conditions opératoires

Les principaux paramètres de l'opération sont la durée de l'opération, le débit d'eau de lavage et l'amplitude et la fréquence des secousses imposées. Les paramètres fréquence et amplitude des secousses de la table sont fixés à 40 Hz et 2,5 cm respectivement pour l'ensemble des essais. Ces valeurs ont été déterminées lors d'une campagne d'essais préliminaires. Le débit d'eau d'alimentation, servant à créer le film d'eau dans lequel les particules se déplacent, est de 2 l/min pour la plupart des essais, à l'exception de ceux pour les fractions -63 µm de Bélizon et Dieu Merci à 0,15 l/min.

Chaque échantillon est passé une première fois, pour générer une fraction "Légers" et une fraction lourde, et cette dernière est repassée sur la table, pour former une fraction "Lourds" et une fraction dite "Mixtes". Chaque essai génère ainsi trois fractions, dénommées Lourds, Mixtes et Légers.

3.3.3. Résultats et interprétations

a) Teneurs et répartitions de l'or dans les fractions

Le Tableau 12 récapitule les masses des différentes fractions produites.

| Echantillon | | | Masses récupérées, g | | | Masses récupérées, % | | |
|-------------|-------------------|----------|----------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| Origine | Granulométrie, mm | Masse, g | Légers | Mixtes | Lourds | Légers | Mixtes | Lourds |
| GU | 0,5/1 | 314,1 | 293,7 | 19,3 | 1 | 93,5 | 6,1 | 0,3 |
| GU | 0,25/0,5 | 352,4 | 333,8 | 5,4 | 0,2 | 98,4 | 1,5 | 0,1 |
| GU | 0,125/0,25 | 344,5 | 329,0 | 11,2 | 1 | 96,4 | 3,3 | 0,3 |
| GU | - 0,063 | 216 | 108,5 | 83,6 | 23,9 | 50,2 | 38,7 | 11,1 |
| BZ | 0,5/1 | 250,6 | 227,8 | 14,5 | 4,1 | 92,5 | 5,9 | 1,7 |
| BZ | 0,25/0,5 | 250 | 220,7 | 16,7 | 2,3 | 92,1 | 7,0 | 1,0 |
| BZ | 0,125/0,25 | 288 | 255,1 | 20,7 | 1,8 | 91,9 | 7,5 | 0,6 |
| BZ | 0,063/0,0125 | 380 | 260,0 | 114,8 | 26,2 | 64,8 | 28,1 | 6,5 |
| BZ | - 0,063 | 538 | 470,4 | 25,0 | 8,7 | 93,3 | 5,0 | 1,7 |
| DM | 0,5/1 | 353 | 296,8 | 50,9 | 4,5 | 84,3 | 14,5 | 1,2 |
| DM | 0,25/0,5 | 335 | 297,4 | 30,3 | 3,8 | 89,7 | 9,1 | 1,1 |
| DM | 0,125/0,25 | 221,2 | 192,9 | 20,5 | 2,1 | 89,5 | 9,5 | 1,0 |
| DM | 0,063/0,0125 | 249,7 | 107,3 | 86,0 | 56,4 | 48,0 | 34,4 | 22,6 |
| DM | - 0,063 | 254,3 | 236,6 | 8,3 | 9,4 | 93,0 | 3,3 | 3,7 |

Tableau 12. Masses traitées et formées lors des essais de séparation gravimétrique sur table Mozley

Le Tableau 13 reporte les teneurs en or pour l'ensemble des fractions "Légers", "Mixtes" et "Lourds", ainsi que la teneur initiale de chaque lot avant son passage sur la table.

| | | Teneurs en or, ppm | | | |
|---------|-------------------|--------------------|--------|--------|---------|
| Origine | Granulométrie, mm | Initiale | Légers | Mixtes | Lourds |
| GU | 0,5/1 | 72,6 | 62,3 | 20,3 | 4911,2 |
| GU | 0,25/0,5 | 65,9 | 50,1 | 22,5 | 24859,3 |
| GU | 0,125/0,25 | 79,2 | 43,5 | 41,3 | 5896,1 |
| GU | - 0,063 | 129 | 36,9 | 5,67 | 246,0 |
| BZ | 0,5/1 | 40,0 | 36,10 | 51,48 | 208,33 |
| BZ | 0,25/0,5 | 49,7 | 26,75 | 123,00 | 1712,4 |
| BZ | 0,125/0,25 | 99,6 | 30,50 | 61,90 | 3736,2 |
| BZ | 0,063/0,125 | 126,5 | 45,10 | 50,60 | 561,00 |
| BZ | - 0,063 | 58,2 | 16,75 | 4,19 | 222,00 |
| DM | 0,5/1 | 6,87 | 6,65 | 6,86 | 16,00 |
| DM | 0,25/0,5 | 9,46 | 2,66 | 5,60 | 15,55 |
| DM | 0,125/0,25 | 13,45 | 8,09 | 9,59 | 160,66 |
| DM | 0,063/0,125 | 23,40 | 9,48 | 6,40 | 25,40 |
| DM | - 0,063 | 7,47 | 6,55 | 3,09 | 57,60 |

Tableau 13. Teneurs en or initiale et par fraction produite par tablage Mozley

Les résultats mettent en évidence une forte concentration de l'or dans les fractions "Lourds" produites. Les teneurs dans les fractions "Légers" et "Mixtes" sont souvent inférieures aux teneurs initiales.

Les Figure 60 à Figure 62 présentent les répartitions de l'or obtenues à l'issue du premier et du second tablage. Les teneurs et les répartitions en or sont calculées par reconstitution des fractions initiales à partir des données de masses et de teneurs des Tableau 12 et Tableau 13. Pour rappel, les fractions lourdes du premier passage sont repassées sur la table, pour former les "Mixtes" et les "Lourds".

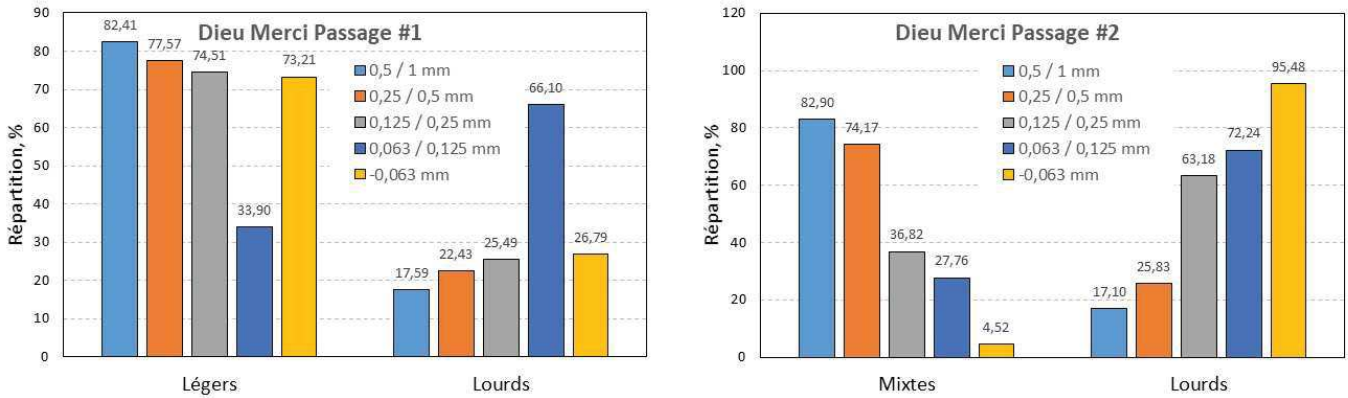


Figure 60. Répartition de l'or à l'issue du premier (gauche) et du second (droite) passage, Dieu Merci

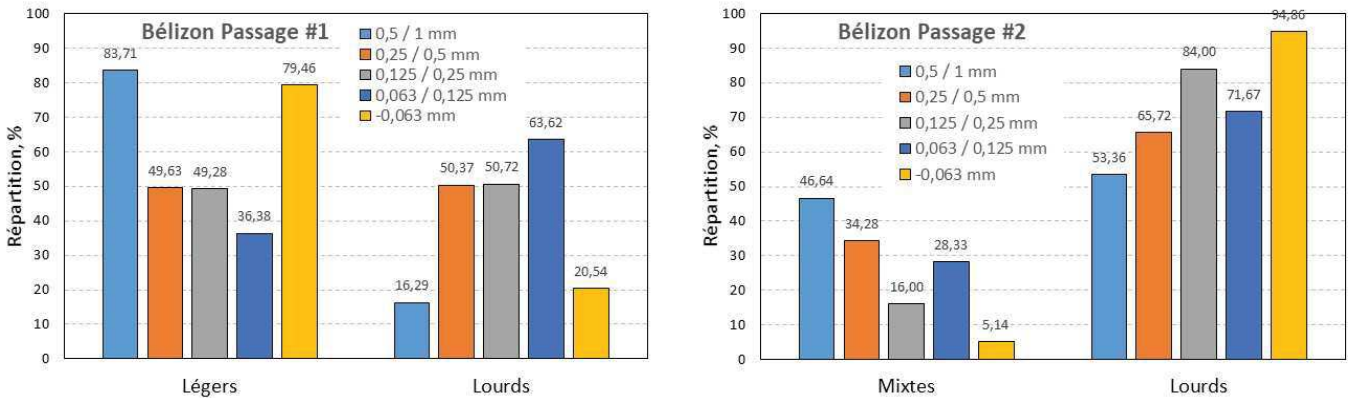


Figure 61. Répartition de l'or à l'issue du premier (gauche) et du second (droite) passage, Bélizon

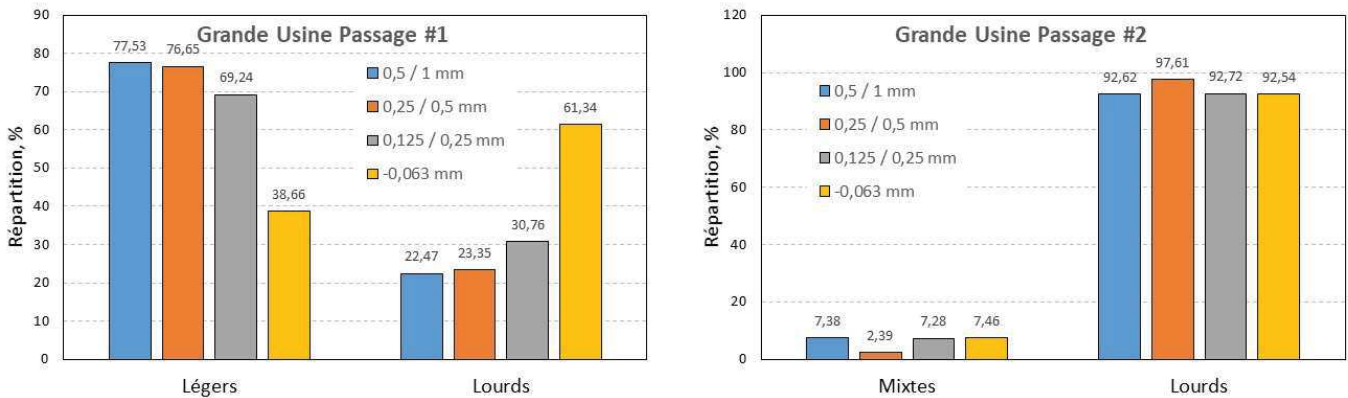


Figure 62. Répartition de l'or à l'issue du premier (gauche) et du second (droite) passage, Grande Usine

La Figure 63 présente les récupérations globales pour les trois échantillons à l'issue des deux étapes de tablage.

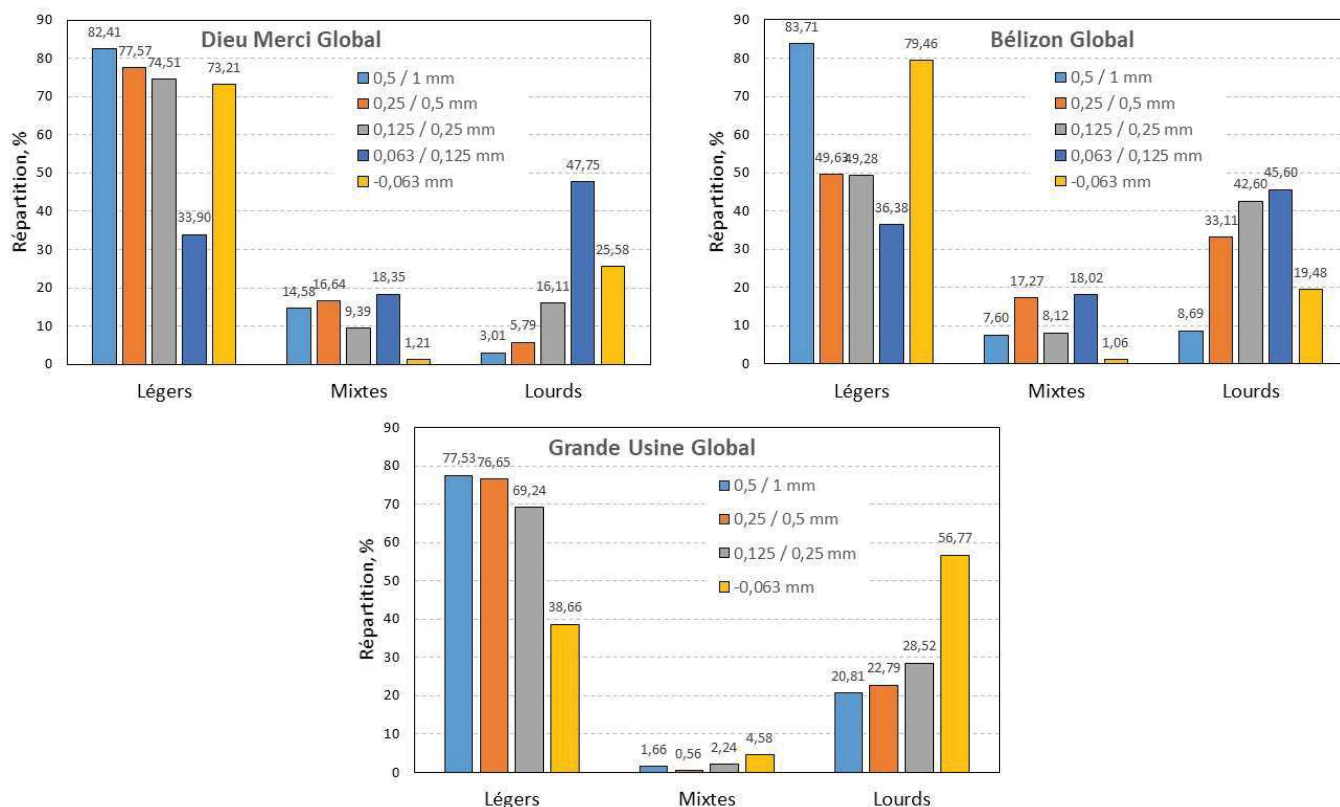


Figure 63. Répartition de l'or à l'issue des deux passages

b) Interprétations

Les résultats pour le premier passage font apparaitre:

- une tendance, pour les trois échantillons, à une plus grande localisation de l'or dans les fractions "Légères" de la table, à l'exception des fractions 63/125 µm de Bélizon et Dieu Merci;
- une diminution relative de la répartition de l'or, des fractions les plus grossières aux plus fines;
- diminution qui s'inverse pour les fractions -63 µm de Bélizon et Dieu Merci.

L'enrichissement préférentiel dans les "Légers" est contraire à ce qui est attendu d'une séparation gravimétrique par tablage. Théoriquement l'or devrait, du fait de sa densité très significativement supérieure aux autres constituants, être concentré dans les parties "Lourds" de la table.

Au début d'un essai l'échantillon est déposé à l'extrémité de la table, puis est mis en mouvement par les actions conjointes de l'écoulement de l'eau et des secousses longitudinales. Ces dernières mènent à une ségrégation des particules selon leur taille et leur densité (Figure 64), et l'écoulement de l'eau (de la gauche vers la droite sur la figure) génère des vitesses de déplacement des particules différentes selon leur densité, leur taille, et leur degré d'immersion dans le film d'eau. Ici l'épaisseur du film d'eau est de l'ordre du millimètre compte-tenu du débit d'eau de lavage (environ 2 L/h) et des dimensions du plateau. Ceci permet de supposer que les particules sont entièrement immergées dans le film. Les vitesses d'écoulement, et donc les forces exercées par le fluide en mouvement, étant croissantes de la surface du plateau à la surface du film d'eau, les particules les plus grossières sont soumises à une plus grande force d'entraînement en moyenne. A l'inverse, les particules plus fines ne subissent d'une faible valeur du gradient de vitesse. Ainsi, les particules les plus grossières et/ou les moins denses sont les premières à arriver à l'autre extrémité.

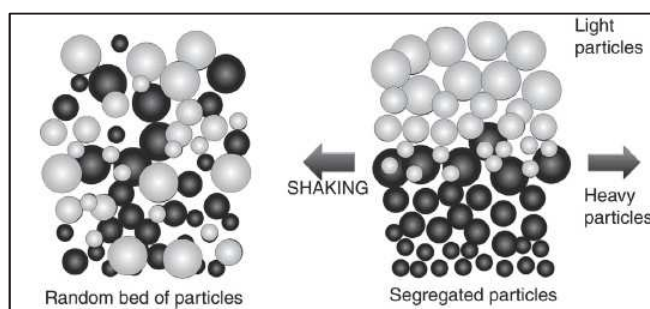


Figure 64. Ségrégation des particules sous l'effet de secousses horizontales¹¹

Or il appartient à l'opérateur de décider, sur la base d'un examen visuel, quand arrêter l'apport d'eau et les actions mécaniques, pour isoler une fraction résiduelle jugée comme "Lourde" sur le plateau. Ainsi, si les constituants de valeur tels que les paillettes d'or sont peu discernables, la durée laissée à l'écoulement de la partie jugée "Légère" peut être trop importante, et cette dernière contiendra alors davantage de paillettes d'or ou de particules contenant de l'or non libéré, car elles auront eu le temps de migrer sur la longueur de la table. La tendance à l'enrichissement préférentiel dans les "Légers" pourrait donc trouver son origine dans une durée de traitement trop longue au regard de la géométrie du système et du débit d'eau imposé.

Cette analyse pourrait également expliquer le fait que la répartition préférentielle de l'or dans les "Légers" soit plus prononcée pour les fractions plus grossières. Celles-ci contenant une proportion d'or non libéré plus importante, l'effet de l'entraînement d'or non libéré dans les "Légers" y est davantage marqué.

Enfin, les essais correspondants aux fractions $-63 \mu\text{m}$ de Bélizon et Dieu Merci présentent la particularité d'avoir été réalisés avec un débit d'eau réduit à $0,15 \text{ L/h}$. Dans ces conditions, les effets d'entraînement des particules sont moins prononcés, ce qui incite l'opérateur à allonger la durée de traitement pour qu'un profil de séparation apparaisse visuellement sur la table. Or ces granulométries très fines mettent en défaut une détection par l'œil humain. Il est donc probable que la durée du traitement ait été trop longue pour ces deux essais. L'échantillon à $-63 \mu\text{m}$ de Grande Usine présente une récupération cohérente dans les "Lourds", ce qui peut s'expliquer par le fait que l'or s'y présente sous forme de plaquettes allongées (correspondant aux placages identifiés lors de la caractérisation pétrographique) et libérées (maille de libération à $50 \mu\text{m}$ et supérieure à celles de Dieu Merci et Bélizon): les particules entraînées contenant de l'or non libéré sont plus rares, et l'or libre de par sa forme est moins soumis aux effets hydrodynamiques d'entraînement.

Les résultats du **deuxième passage**, qui correspondent au passage des fractions "Mixtes" et "Lourdes" récupérées à l'issue du premier passage, font apparaître une récupération majoritairement plus élevée dans les fractions "Lourdes". Toutefois, deux tendances opposées apparaissent entre les échantillons de Dieu-Merci et de Bélizon d'un côté, et ceux de Grande-Usine de l'autre : là où les premiers affichent une récupération d'autant plus élevée dans les "Légers" que la fraction est grossière, les seconds présentent au contraire une récupération affranchie de tout effet de taille. Comme vu dans les parties consacrées à la caractérisation détaillée de ces trois lots, une différence caractéristique entre les échantillons de Grande Usine et ceux des autres fractions tient à sa composition minéralogique, composée quasiment exclusivement de silice et d'or. Partant, l'aspect de ces échantillons, caractérisé ici par leur teinte et leur texture, sont également différents. Les parties siliceuses pauvres en or sont plus aisément distinguées par l'opérateur dans ce lot d'échantillon, et ceci, associé aux faibles quantités de matière passées sur la table, permet à ce dernier d'arrêter l'opération à un moment plus optimal en termes de séparation.

Les résultats **globaux**, sur les deux tablages, illustrent l'influence des résultats du premier passage, avec une forte proportion d'or déclassé, mais également une tendance à une meilleure récupération à partir de fractions plus fines.

¹¹ Gupta A., Yan D. (2016). Mineral Processing Design and Operations. An Introduction, 563 - 628

3.3.4. Conclusions intermédiaires

L'ensemble des résultats met en évidence une récupération plutôt faible de l'or dans les fractions "Lourdes", au regard de la valeur du critère de concentration pourtant particulièrement favorable.

Ceci semble être expliqué par l'effet de plusieurs mécanismes couplés associant les paramètres débit d'eau de lavage, durée des opérations, et forme et degré de libération des particules d'or. Des particules allongées, voire idéalement sous forme de feuillets, et libérées, seront d'autant moins sensibles aux forces hydrodynamiques, et les essais mènent à des proportions de déclassés plus faibles. Le débit d'eau contrôle ces forces hydrodynamiques, mais aussi le degré d'immersion des particules dans le film d'eau, et influence la décision, subjective car prise par l'opérateur, de poursuivre ou d'arrêter l'essai. Cette décision se base sur l'aspect du solide circulant sur la table, et le profil de séparation est d'autant moins net que la masse de solide est grande. Lorsque la quantité de matière sur le plateau est suffisamment faible, ce qui est le cas pour les seconds passages correspondants au retraitement des "Lourds", la durée optimale de traitement est plus facilement déterminée dans le cas d'échantillons concentrés, et la séparation est alors quasiment complète. Toutefois, cette configuration correspond à un fonctionnement de la table en sous-capacité et n'est donc pas réaliste pour un traitement à grande échelle.

3.4. ESSAIS DE SEPARATION PILOTE

3.4.1. Objectifs et définition des traitements

Les essais de séparation à plus grande échelle évaluent l'efficacité de deux techniques minéralurgiques de l'état de l'art à récupérer l'or contenu dans les échantillons des sites de Dieu Merci et de Bélizon. Les résultats de caractérisation granulochimique ont montré que l'or est retrouvé dans les fractions $-125 \mu\text{m}$, à hauteur de 57 % pour les échantillons de Dieu Merci, et de 36 % pour les échantillons de Bélizon. Un procédé de récupération de l'or doit donc être en mesure de traiter deux types de fractions, fines et grossières.

Le tablage est la technique usuellement mise en œuvre pour le traitement de fractions grossières de minerai. Les essais de séparation gravimétrique sur table Mozley ont souligné l'importance des propriétés du film d'eau sur les résultats de séparation. La table Wilfley permet d'imposer des directions différentes au flux d'eau et au mouvement des particules, et les stries de son plateau permettent de capter et de retenir les particules en différents endroits de la table selon leur taille et leur densité, ce qui fait apparaître plus nettement des profils de densités différentes sur la table, limite les effets d'entraînement, et ainsi réduit les pertes en particules de valeur au cours du temps. Ce système est donc mis en œuvre sur les échantillons de l'étude.

Le traitement de fractions plus fines ($-125 \mu\text{m}$) nécessite d'apporter des forces supplémentaires au système gravimétrique. Ces forces sont de type centrifuges et sont typiquement générées par la mise en mouvement de l'échantillon dans l'équipement de séparation, dont le plus courant est le bol conique rotatif de type Falcon, tel que décrit en section 2.4.

3.4.2. Détails des conditions opératoires

a) *Tablage*

Les essais de tablage sont réalisés en deux temps. Un premier passage produit trois fractions définies par leur densité: fractions dites "Légers", "Mixtes" et "Lourds", puis les deux premières fractions sont rassemblées et repassées sur la table, dans une démarche d'épuisage de ces fractions en or. Les pulpes introduites sur la table présentent des concentrations inférieures à 30 (%)_p, conformément aux recommandations de Wills et Finch (2016)¹².

¹² Wills B.A., Finch J.A. (2016). Will's Mineral Processing Technology Handbook. 8th edition, Butterworth-Heinemann, Oxford (UK)

Les essais du premier tablage portent sur les fractions 125/250 µm, 250/500 µm, et 500 µm/1 mm. Le Tableau 14 reporte les valeurs des paramètres opératoires associés. Les indications L3 et L4 désignent les lots desquels sont échantillonnés les fractions, selon les diagrammes des Figure 9 et Figure 10.

| Echantillon | | Paramètres de l'équipement | | | |
|-------------|---------------|----------------------------|-------------|-----------|------------------------|
| Lot | Fraction | Alimentation, L/h | Lavage, L/h | Fréquence | Pente longitudinale, % |
| Bélizon | 125/250 L3 | 130 | 260 | 28 | 0,50 |
| | 125/250 L4 | 130 | 260 | 26 | 0,40 |
| | 250/500 L3+L4 | 150 | 250 | 45 | 0,50 |
| | 500/1 L3 | 150 | 300 | 18 | 0,40 |
| | 500/1 L4 | 100 | 200 | 45 | 0,40 |
| Dieu Merci | 125/250 L3 | 100 | 250 | 20 | 0,40 |
| | 125/250 L4 | 100 | 250 | 20 | 0,40 |
| | 250/500 L3 | 100 | 280 | 14 | 0,40 |
| | 250/500 L4 | 100 | 280 | 14 | 0,40 |
| | 500/1 L3 | 100 | 280 | 14 | 0,40 |
| | 500/1 L4 | 100 | 280 | 14 | 0,40 |

Tableau 14. Valeurs des paramètres pour la table Wilfley, 1^{er} passage

A l'issue du premier tablage:

- les fractions légères et mixtes de chacune des deux fractions de 125/250 et de 500/1 de Bélizon sont regroupées et repassées sur la table;
- les fractions légères et mixtes des sous-lots L3 et L4 de chacune des deux fractions 125/250 et 250/500 de Dieu Merci sont regroupées (afin de disposer d'une masse suffisante) puis repassées sur la table.

Le Tableau 15 décrit les paramètres opératoires du second tablage.

| Echantillon | | Paramètres opératoires | | | |
|-------------|----------------|------------------------|-------------|-----------|------------------------|
| Lot | Fraction | Alimentation, L/h | Lavage, L/h | Fréquence | Pente longitudinale, % |
| Bélizon | 125/250 L3 5a2 | 130 | 260 | 26 | 0,40 |
| | 125/250 L4 5b2 | 125 | 325 | 28 | 0,50 |
| | 500/1 L3 4a2 | 150 | 350 | 10 | 0,40 |
| | 500/1 L4 4b2 | 125 | 350 | 10 | 0,40 |
| Dieu Merci | 125/250 L3+L4 | 150 | 350 | 20 | 0,40 |
| | 250/500 L3+L4 | 150 | 350 | 14 | 0,40 |
| | 500/1 L3 | 150 | 350 | 14 | 0,40 |
| | 500/1 L4 | 150 | 350 | 10 | 0,40 |

Tableau 15. Valeurs des paramètres pour la table Wilfley, 2nd passage

b) Séparation centrifuge

Le Tableau 16 récapitule les différents essais réalisés. Les paramètres variables sont la nature du bol et la fréquence de rotation appliquée. Le débit d'eau assurant la contre-pression au niveau des stries est maintenu à 250 l.h⁻¹ pour tous les essais. La pulpe est déversée par gravité en continu dans le bol en rotation. Les particules légères sont évacuées en continu de l'appareil durant l'opération, tandis que les particules plus lourdes restent piégées dans les rainures ou dans les stries du bol. Après un certain temps, l'équipement est arrêté et les particules lourdes sont récupérées manuellement. Les fractions "Légères" et "Lourdes" sont placées dans une étuve.

| Echantillon | Essai | Paramètres opératoires | |
|---------------|-------|------------------------|--------------|
| | | Fréquence, Hz | Type de bol |
| Bélizon L4 | 1 | 20 | Rainures |
| | 2 | 30 | Rainures |
| | 3 | 50 | Fines stries |
| Dieu Merci L3 | 4 | 20 | Rainures |
| | 5 | 40 | Rainures |
| | 6 | 50 | Rainures |
| | 7 | 50 | Fines stries |

Tableau 16. Détail des conditions opératoires des essais de séparation centrifuge

3.4.3. Résultats et interprétations

a) Tablage

Premier passage

Le Tableau 17 reporte les masses récupérées pour le premier passage sur la table.

| Echantillon | | Masse, kg | | | Masse, % | | |
|-------------|---------------|-----------|--------|--------|----------|--------|--------|
| Lot | Fraction | Légers | Mixtes | Lourds | Légers | Mixtes | Lourds |
| Bélizon | 125/250 L4 | 1,217 | 0,959 | 0,297 | 49 | 39 | 12 |
| | 125/250 L3 | 0,969 | 0,875 | 0,251 | 46 | 42 | 12 |
| | 250/500 L3+L4 | 1,516 | 1,493 | 0,086 | 49 | 48 | 3 |
| | 500/1 L3 | 0,710 | 1,547 | 0,227 | 29 | 62 | 9 |
| | 500/1 L4 | 1,252 | 1,428 | 0,217 | 43 | 49 | 7 |
| Dieu Merci | 125/250 L3 | 0,312 | 0,398 | 0,134 | 37 | 47 | 16 |
| | 125/250 L4 | 0,148 | 0,481 | 0,092 | 21 | 67 | 13 |
| | 250/500 L3 | 0,350 | 0,544 | 0,129 | 34 | 53 | 13 |
| | 250/500 L4 | 0,204 | 0,511 | 0,078 | 26 | 64 | 10 |
| | 500/1 L3 | 0,267 | 0,800 | 0,090 | 23 | 69 | 8 |
| | 500/1 L4 | 0,508 | 0,475 | 0,032 | 50 | 47 | 3 |

Tableau 17. Masses récupérées à l'issue des essais de tablage Wilfley, 1^{er} passage

Le Tableau 18 reporte les résultats d'analyse de l'or total obtenu par fusion plombeuse, pour le premier passage sur la table.

| Echantillon | | Teneurs, ppm | | | | Récupération, % | | |
|-------------|---------------|-------------------------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| Lot | Fraction | Initiale ⁽¹⁾ | Légers | Mixtes | Lourds | Légers | Mixtes | Lourds |
| Bélizon | 125/250 L4 | 68,7 | 18,7 | 19,6 | 432 | 13,4 | 11,1 | 75,5 |
| | 125/250 L3 | 65,4 | 17,1 | 20,5 | 408 | 12,1 | 13,1 | 74,8 |
| | 250/500 L3+L4 | 61,9 | 30,5 | 51,8 | 789 | 24,2 | 40,4 | 35,4 |
| | 500/1 L3 | 50,3 | 29,5 | 39,5 | 189 | 16,8 | 48,9 | 34,3 |
| | 500/1 L4 | 42,3 | 43,2 | 18,0 | 217 | 44,2 | 17,4 | 38,4 |
| Dieu Merci | 125/250 L3 | 20,5 | 7,5 | 6,4 | 92 | 11,5 | 17,3 | 71,2 |
| | 125/250 L4 | 22,0 | 6,7 | 8,4 | 118 | 6,3 | 25,3 | 68,4 |
| | 250/500 L3 | 35,5 | 14,4 | 10,0 | 179 | 13,8 | 22,4 | 63,7 |
| | 250/500 L4 | 22,5 | 11,0 | 11,8 | 122 | 12,5 | 33,8 | 53,7 |
| | 500/1 L3 | 38,6 | 7,9 | 40,3 | 115,5 | 4,7 | 72,2 | 23,1 |
| | 500/1 L4 | 26,1 | 7,2 | 40,8 | 110 | 13,7 | 73,2 | 13,1 |

Tableau 18. Teneurs et récupération à l'issue des essais de tablage Wilfley, 1^{er} passage. ⁽¹⁾ teneur recalculée

Les Figure 65 et Figure 66 représentent les répartitions de l'or dans les trois fractions, pour les trois granulométries et les deux échantillons Bélizon et Dieu Merci.

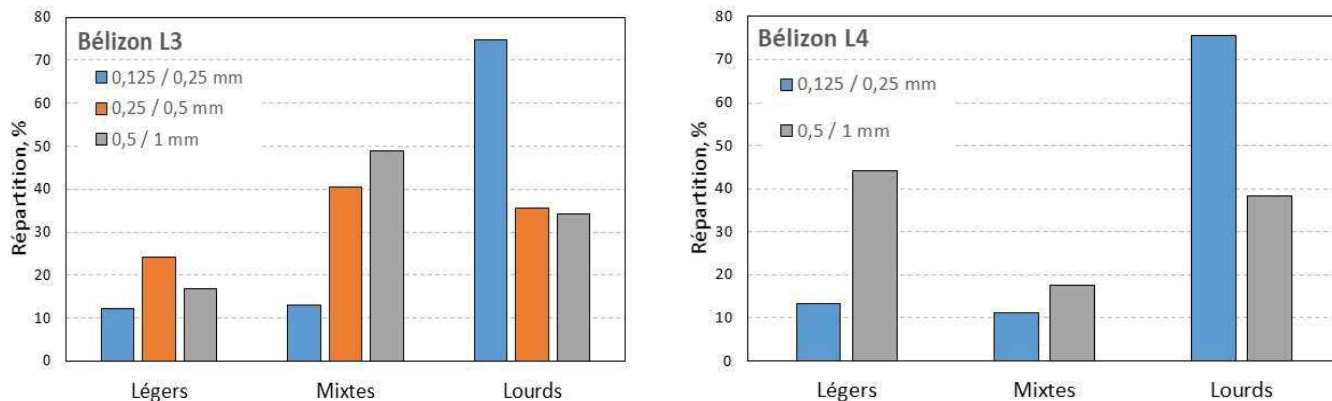


Figure 65. Répartition de l'or à l'issue du premier tablage des échantillons Bélizon

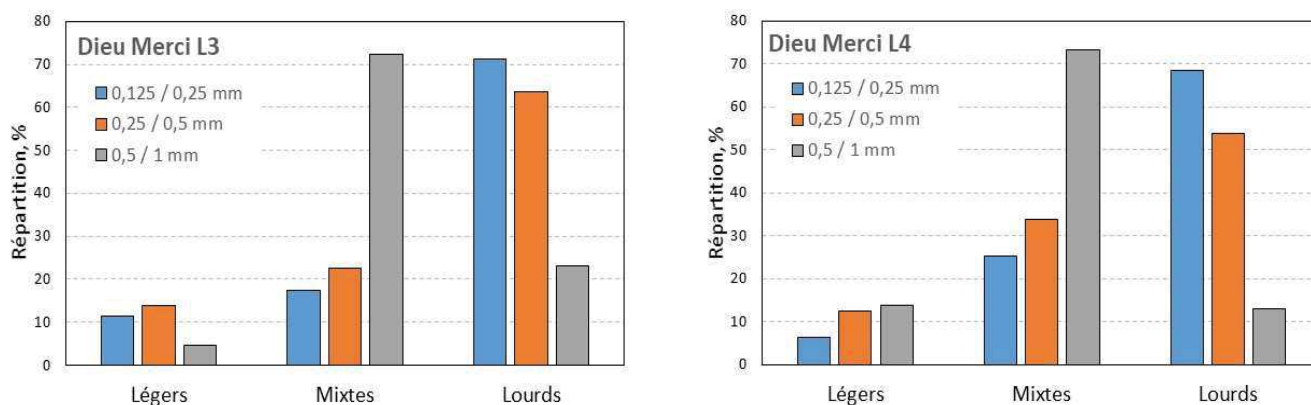


Figure 66. Répartition de l'or à l'issue du premier tablage des échantillons Dieu Merci

Ces résultats montrent une récupération de l'or majoritairement dans la fraction des "Lourds" pour la granulométrie la plus fine à 125/250 μm , pour les 4 échantillons testés. A l'inverse, l'or tend à se concentrer préférentiellement dans les fractions "Mixtes" pour la granulométrie la plus grossière à 0,5/1 mm. La fraction 250/500 μm adopte un comportement intermédiaire, mais proche de la fraction 125/250 μm .

Ces résultats peuvent être expliqués par la différence de largeur de l'intervalle de granulométrie pour ces trois fractions (les largeurs étant ici respectivement de 125 μm , 250 μm et 500 μm). L'efficacité de la séparation par tablage est en effet reliée aux différences de taille et de densité entre particules. Dans le cas limite d'une distribution de taille monomodale, le seul effet est celui de la densité : les fractions des "Lourds" (respectivement des "Légers") sont alors constituées de particules plus denses d'or (respectivement les moins denses de gangue, argileuse ou siliceuse), tandis que les "Mixtes" concentrent les particules composites d'or non libéré du minerai. Plus la distribution de taille est étendue, plus l'effet de la taille des particules intervient dans le mécanisme global de séparation, avec notamment une partie des particules d'or les plus grossières qui se retrouvent dans la fraction des "Mixtes". Il est ainsi possible de constater que la récupération de l'or dans les "Mixtes" est plus importante pour la fraction la plus étendue 0,5/1 mm.

Second passage

Le Tableau 19 reporte les masses récupérées pour le second passage sur la table. La matière en entrée correspond à l'ensemble des fractions légères et mixtes du premier passage.

| Echantillon | | Masse, kg | | | Masse, % | | |
|-------------|---------------|-----------|--------|--------|----------|--------|--------|
| Lot | Fraction | Légers | Mixtes | Lourds | Légers | Mixtes | Lourds |
| Bélizon | 125/250 L3 | 0,714 | 0,911 | 0,150 | 40 | 51 | 8 |
| | 125/250 L4 | 1,054 | 0,765 | 0,154 | 53 | 39 | 8 |
| | 500/1 L3 | 1,010 | 1,120 | 0,052 | 46 | 51 | 2 |
| | 500/1 L4 | 1,076 | 1,253 | 0,162 | 43 | 50 | 7 |
| Dieu Merci | 125/250 L3+L4 | 0,507 | 0,420 | 0,146 | 47 | 39 | 14 |
| | 250/500 L3+L4 | 0,332 | 0,749 | 0,133 | 27 | 62 | 11 |
| | 500/1 L3 | 0,395 | 0,321 | 0,078 | 50 | 40 | 10 |
| | 500/1 L4 | 0,562 | 0,359 | 0,080 | 56 | 36 | 8 |

Tableau 19. Masses récupérées à l'issue des essais de tablage Wilfley, 2nd passage

Le Tableau 20 reporte les résultats d'analyse de l'or total obtenu par fusion plombeuse, pour le second passage sur la table.

| Echantillon | | Teneurs, ppm | | | | Récupération, % | | |
|-------------|---------------|-------------------------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| Lot | Fraction | Initiale ⁽¹⁾ | Légers | Mixtes | Lourds | Légers | Mixtes | Lourds |
| Bélizon | 125/250 L3 | 21,1 | 10,4 | 15,4 | 107 | 19,8 | 37,4 | 42,8 |
| | 125/250 L4 | 14,6 | 7,6 | 10,8 | 77 | 26,4 | 30,3 | 43,4 |
| | 500/1 L3 | 27,4 | 32 | 19,9 | 99,2 | 54,1 | 37,2 | 8,7 |
| | 500/1 L4 | 27,7 | 24,8 | 26,3 | 58,1 | 38,7 | 47,7 | 13,6 |
| Dieu Merci | 125/250 L3+L4 | 9,6 | 3,7 | 6,4 | 39,3 | 18,2 | 26,0 | 55,8 |
| | 250/500 L3+L4 | 12,4 | 10,8 | 8,4 | 39 | 23,7 | 41,9 | 34,4 |
| | 500/1 L3 | 19,0 | 14,5 | 10,6 | 88,8 | 29,1 | 33,4 | 37,5 |
| | 500/1 L4 | 19,5 | 11,5 | 16,2 | 74,5 | 42,8 | 19,8 | 37,3 |

Tableau 20. Teneurs et récupérations à l'issue des essais de tablage Wilfley, 2nd passage. ⁽¹⁾ teneur recalculée

La Figure 67 représente les répartitions de l'or dans les trois fractions, pour les trois granulométries et les deux échantillons Bélizon et Dieu Merci, récupérées à l'issue du second tablage réalisé sur les fractions des "Légers" et des "Mixtes" du premier tablage.

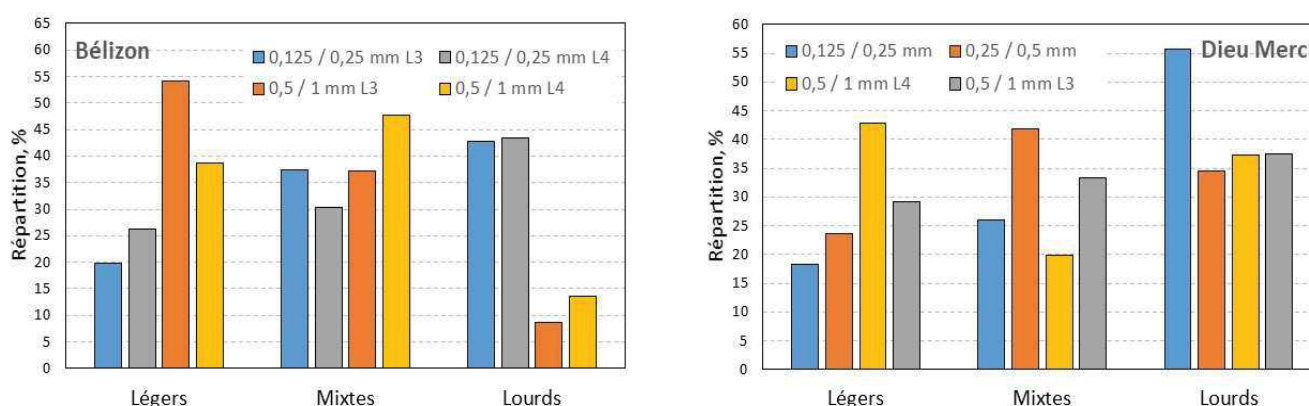


Figure 67. Récupération de l'or à l'issue du second tablage

La comparaison des résultats, entre les fractions 0,5/1 mm des lots L3 et L4 respectifs de Bélizon et Dieu Merci d'une part, et ceux des fractions 125/250 µm des lots Bélizon (L3 et L4), et Dieu Merci (L3+L4) d'autre part, confirment la tendance observée lors du premier tablage, d'une concentration de l'or dans les "Lourds" pour les fractions 125/250 µm.

Par ailleurs, les résultats pour la **fraction 0,5/1 mm** entre les lots de Dieu Merci et de Bélizon font ressortir une concentration plus importante de l'or dans les "Légers" et les "Mixtes" des lots Bélizon.

Dans le détail, les deux échantillons **0,5/1 mm de Bélizon** présentent une récupération significativement plus importante dans les "Légers" pour le lot L3. Outre la nature du lot traité, le seul paramètre variable entre ces deux essais est le débit d'alimentation d'eau d'aspersion, assimilable à un débit de pulpe d'alimentation. Un débit de pulpe moins élevé, qui correspond au traitement du lot L4, se traduit en principe par un déplacement favorisé des différentes fractions vers le bac de récupération des "Mixtes" (Manser et al, 1991¹³). Ceci pourrait expliquer la plus grande proportion d'or récupéré dans les "Mixtes" pour L4, et dans les "Légers" pour L3.

Les récupérations relativement élevées dans les "Lourds" pour les échantillons 0,5/1 mm des deux lots de **Dieu Merci** dénotent avec les résultats du premier tablage et ceux du second tablage des lots de Bélizon.

Les paramètres opératoires pour les deux lots de **Dieu Merci du second tablage** sont identiques, à l'exception de la fréquence des secousses, moins importante pour le lot L4. Une fréquence plus faible résulte en une progression globale des particules moins importante longitudinalement, ce qui se traduit par une plus grande quantité de matière récupérée dans les "Légers". Ceci correspond aux résultats expérimentaux.

La comparaison des résultats du **premier** et du **second tablage** des fractions **Dieu Merci** (Figure 66 et Figure 67), bien que de pertinence limitée compte-tenu du fait que les échantillons dénotés L3 ou L4 sont structurellement différents, renseigne toutefois sur l'influence des paramètres débit d'alimentation et débit d'eau de lavage. Les valeurs de ces deux paramètres sont inférieures dans le premier tablage, avec une alimentation à 100 l.h⁻¹ contre 150 l.h⁻¹, et une eau de lavage à 280 l.h⁻¹ contre 350 l.h⁻¹. A conditions opératoires constantes, augmenter le débit d'alimentation, ou diminuer celui de l'eau de lavage (qui suit un déplacement majoritairement transversal sur la table) produit des profils de distribution de particules déplacés vers le sens des récupérations dans les bacs de "Lourds" et de "Mixtes" (Manser et al, 1991). Les résultats de récupération dans les "Lourds" des fractions Dieu Merci, avec des taux de 23 (L3) et 13 (L4) % à l'issue du premier tablage, et de 37,5 (L4) et 37,3 (L3) % à l'issue du second, semblent donc indiquer une prédominance du paramètre débit d'alimentation sur celui du débit d'eau de lavage. Toutefois, l'influence de ce dernier paramètre pourrait se retrouver dans les variations des taux de récupération dans les fractions "Mixtes" et "Légers" des 4 essais, la première fraction diminuant fortement, principalement au profit des "Légers" lorsque le débit d'eau de lavage est augmenté. Plus globalement, les valeurs des paramètres imposées au second tablage mènent ainsi à une répartition plus homogène de l'or entre les trois fractions.

Estimation de la récupération globale par tablage

Les résultats des deux tablages peuvent être combinés pour évaluer l'efficacité de récupération globale pour chacune des fractions. Dans le cas de Dieu Merci, les deux "Légers" obtenus pour les deux fractions de 125/250 µm (correspondant aux lots L3 et L4) sont regroupés pour le second tablage, afin de disposer de quantités suffisantes de matière. Le même protocole est suivi pour les deux fractions de 250/500 µm.

Le Tableau 21 liste l'ensemble des teneurs et des taux de récupération des fractions générées à l'issue des deux étapes de tablage. Ces valeurs sont théoriques dans la mesure où elles reposent sur l'hypothèse d'une absence de pertes en particules d'or au cours des traitements.

Les résultats indiquent une tendance à une meilleure récupération globale pour les fractions les plus fines, correspondant aussi à un intervalle de variation de taille des particules plus étroit. Les taux de récupération peuvent ainsi atteindre 86 à 87 % dans le cas des échantillons fins de Bélizon, et 74 à 87 % dans le cas de ceux de Dieu Merci. Les taux sont en revanche nettement moins élevés pour les fractions grossières, entre 40 et 50 % sur l'ensemble des échantillons.

¹³ Manser R.J., Barley R.W., Wills B.A. (1991). The shaking table concentrator – the influence of operating conditions and table parameters on mineral separation. Miner. Eng., 4(3), 369 – 381.

| Echantillon | | Teneurs, ppm | | | | Récupération, % | | |
|-------------|---------------|--------------|--------|--------|--------------------------|-----------------|--------|--------|
| Lot | Fraction | Légers | Mixtes | Lourds | Facteur de concentration | Légers | Mixtes | Lourds |
| Bélizon | 125/250 L3 | 10,4 | 15,5 | 295,4 | 4,52 | 4,98 | 9,45 | 85,57 |
| | 125/250 L4 | 7,6 | 10,8 | 310,8 | 4,53 | 6,45 | 7,40 | 86,15 |
| | 500/1 L3 | 32,0 | 19,9 | 172,3 | 3,42 | 35,54 | 24,45 | 40,01 |
| | 500/1 L4 | 24,8 | 26,3 | 149,0 | 3,52 | 23,81 | 29,40 | 46,80 |
| Dieu Merci | 125/250 L3+L4 | 3,7 | 6,4 | 100,7 | 4,76 | 5,49 | 7,85 | 86,67 |
| | 250/500 L3+L4 | 10,8 | 8,4 | 111,3 | 3,73 | 9,38 | 16,60 | 74,04 |
| | 500/1 L3 | 11,5 | 16,2 | 96,4 | 3,63 | 22,41 | 25,69 | 51,90 |
| | 500/1 L4 | 14,5 | 10,6 | 94,8 | 2,49 | 37,20 | 17,29 | 45,51 |

Tableau 21. Teneurs et récupérations théoriques après les deux étapes de tablage

En termes de teneurs, les facteurs de concentrations dans les "Lourds" varient entre 4,52 et 4,76 pour les fractions 125/250 µm, et entre 2,49 et 3,63 pour les fractions 0,5/1 mm. Les teneurs en or associées à ces deux types de fractions sont nettement distinctes pour les échantillons de Bélizon, supérieures à 295 ppm pour les 125/250 µm et inférieures à 172 ppm pour les 0,5/1 mm. Ceci est moins marqué pour les échantillons Dieu Merci, avec des teneurs supérieures à 101 ppm pour les 125/250 µm et inférieures à 96 ppm pour les 0,5/1 mm.

Enfin, pour évaluer l'intérêt d'un second tablage des fractions "Légers" et "Mixtes", le Tableau 22 regroupe les récupérations dans les "Lourds" du premier et du second tablage, ainsi que globales.

| Echantillon | | Récupération Lourds, % | | |
|-------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|
| Lot | Fraction | 1 ^{er} passage | 2 nd passage | Globale |
| Bélizon | 125/250 L3 | 74,80 | 42,7 | 87,06 |
| | 125/250 L4 | 75,54 | 43,4 | 86,15 |
| | 500/1 L3 | 34,33 | 8,64 | 40,01 |
| | 500/1 L4 | 38,40 | 13,63 | 46,80 |
| Dieu Merci | 125/250 L3+L4 ⁽¹⁾ | 69,84 | 55,79 | 86,67 |
| | 250/500 L3+L4 ⁽¹⁾ | 60,41 | 34,42 | 74,04 |
| | 500/1 L3 | 23,10 | 37,45 | 51,90 |
| | 500/1 L4 | 13,08 | 37,31 | 45,51 |

Tableau 22. Récupérations dans les Lourds aux différentes étapes de tablage. ⁽¹⁾Calculée à partir des résultats des essais présentés en Tableau 18

Il apparaît qu'un retraitement des "Légers" et "Mixtes" issues du premier tablage est particulièrement pertinent dans les cas des échantillons 125/250 µm, puisque ceci permet de récupérer entre 43 et 56 % de l'or résiduel, ce dernier représentant entre 25 et 30 % de l'or initial. L'intérêt semble également marqué pour les fractions 0,5/1 mm de Dieu Merci, mais pas nécessairement dans celles de Bélizon. Ceci pourrait toutefois mettre en évidence la nécessité d'optimiser les paramètres opératoires pour cet échantillon.

b) Séparation centrifuge

Le Tableau 23 reporte les résultats des essais de séparation centrifuge.

Les teneurs reconstituées des essais 1 et 2 relatif à l'échantillon de Bélizon sont nettement inférieures aux valeurs attendues. Sur la base des teneurs en or et des proportions massiques respectives des fractions 63/125 µm et -63 µm dans le lot 1 (Figure 49 et Figure 50), la teneur initiale devrait être de 67 ppm. Le lot de travail pour les essais centrifuge n'est pas le L1 mais le L4, toutefois, il est peu probable que l'échantillonnage réalisé sur le prélèvement de Bélizon (Figure 13) produise des lots ayant des teneurs variant d'un facteur 50 environ. L'explication de ces teneurs très faibles semble davantage provenir du système d'échantillonnage par pulpe (Figure 4). Celui-ci est réalisé en mélangeant le lot L4 avec une masse définie d'eau dans une

cuve, de façon à former une pulpe à environ 30 (%)_p de solide, qui est ensuite mise sous agitation et pompée vers l'entrée du diviseur à pulpe de façon à préparer des échantillons les plus identiques possible d'un point de vue de leur composition. Or, à l'issue de la mise en œuvre de ce protocole, il a été observé qu'une partie de l'or initialement présent dans l'échantillon était resté en fond de cuve, et ne faisait donc pas partie des échantillons utilisés dans les essais. Le fait que l'échantillon soit resté plus concentré en bas qu'en haut de la cuve signale une agitation insuffisante de la pulpe. L'essai 3 a été réalisé avec une solution pompée plus bas dans la cuve que les essais 1 et 2, ce qui tend à corroborer cette interprétation.

Par la suite, cette observation a mené à modifier le dispositif d'agitation de la cuve pour préparer les échantillons de Dieu Merci. Le Tableau 23 reporte des teneurs initiales reconstituées correspondantes présentant moins de variabilité (entre 7,43 ppm et 10,73 ppm).

| Echantillon | | Teneurs, ppm | | | | Récupération, % | |
|------------------|-----------------|--------------|--------|-------------------------|--------------------------|-----------------|--------|
| Lot | Fraction | Légers | Lourds | Initiale ⁽¹⁾ | Facteur de concentration | Légers | Lourds |
| Bélizon L4 | Essai 1 - 20 Hz | 1,28 | 8,7 | 2,25 | 3,87 | 49,6 | 50,4 |
| | Essai 2 - 30 Hz | 0,72 | 9,25 | 1,35 | 6,83 | 49,2 | 50,8 |
| | Essai 3 - 50 Hz | 20,4 | 216 | 44,88 | 4,81 | 39,8 | 60,2 |
| Dieu Merci L3 | Essai 4 - 20 Hz | 4,79 | 139,5 | 9,96 | 14,01 | 46,3 | 53,7 |
| | Essai 5 - 40 Hz | 5,27 | 35,6 | 9,53 | 3,73 | 47,5 | 52,5 |
| | Essai 6 - 50 Hz | 3,13 | 33,6 | 7,43 | 4,52 | 36,2 | 63,8 |
| | Essai 7 - 50 Hz | 4,19 | 26,6 | 9,89 | 2,69 | 31,6 | 68,4 |

Tableau 23. Teneurs et récupérations à l'issue des essais de séparation centrifuge. ⁽¹⁾ Teneur recalculée

La Figure 68 présente les résultats des récupérations pour les différents essais. Pour rappel, ceux-ci ont été réalisés avec le bol à "grosse" rainure (essais 1,2, 4, 5, 6) ou le bol à stries fines (essais 3 et 7).

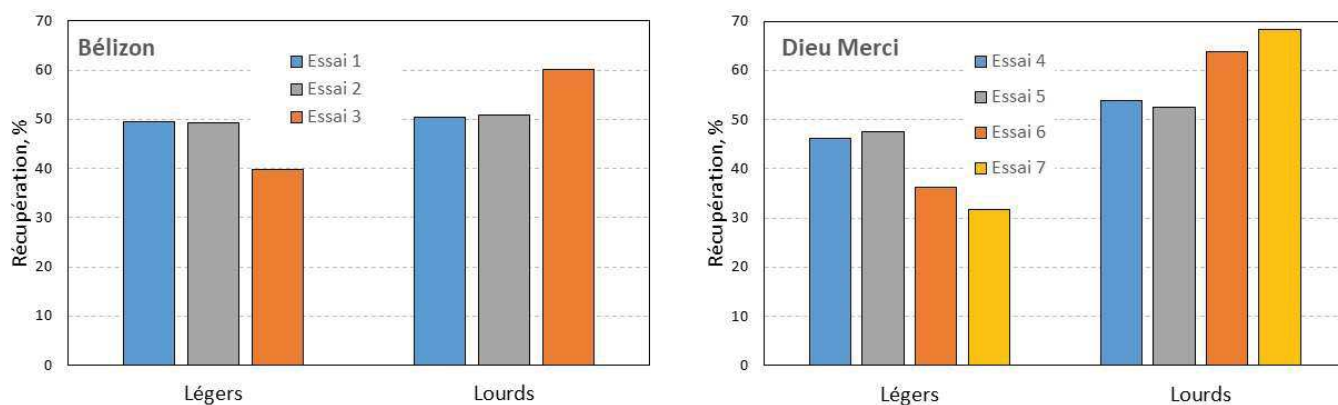


Figure 68. Récupérations de l'or dans les fractions "Légers" et "Lourds" obtenues par séparation centrifuge

Dans le cas de **Dieu Merci**, il apparaît que l'or est majoritairement récupéré dans les fractions "Lourds" pour tous les essais. Les essais 6 et 7 indiquent que l'utilisation d'un bol fines stries augmente le taux de récupération (68,4 % contre 63,4 % pour le bol à grosse rainure), mais produit des fractions moins concentrées. Il semblerait donc que ce bol, utilisé dans ces conditions expérimentales, présente une sélectivité plus faible.

L'effet de la fréquence est moins immédiat: la récupération dans les "Lourds" est quasiment constante autour de 53 % dans la plage 20 à 40 Hz, et augmente à 64 % à 50 Hz. Dans le même temps, la teneur en or dans les "Lourds" est maximale à 20 Hz, et constante pour les fréquences de 40 et 50 Hz. Les essais à la fréquence la plus basse présentent une sélectivité bien supérieure, au détriment toutefois du taux de récupération. La diminution de la teneur, et l'augmentation de la récupération à 50 Hz, suggèrent un transfert accru de l'or, mais aussi de la gangue, cette dernière dans des proportions plus importantes, dans la fraction des "Lourds".

L'essai à 40 Hz présente un comportement intermédiaire, avec une teneur proche de l'essai à 50 Hz, mais un taux de récupération proche de celui de l'essai à 20 Hz. Ces caractéristiques pourraient s'expliquer par la composition de la fraction -125 µm de Dieu Merci, composée de particules d'or très fin et d'environ 17 %¹⁴ d'oxydes de fer (Figure 45). Ces oxydes seraient récupérés à partir d'une certaine valeur de la force centrifuge produite par la rotation du bol, ici probablement à partir de 40 Hz, ce qui diluerait la fraction "Lourds", et baisserait ainsi la teneur en or. L'or très fin (Figure 47) nécessiterait pour sa part des forces plus importantes, qui seraient atteintes à partir de 50 Hz, ce qui expliquerait sa récupération plus importante.

Le cas de **Bélizon** présente les mêmes tendances, avec la réserve toutefois liée aux faibles teneurs en or pour deux des trois fractions testées. On pourra néanmoins remarquer que les résultats de séparation sont du même ordre de grandeur que ceux relatifs à Dieu Merci, ce qui montre une certaine robustesse du séparateur vis-à-vis de différences importantes dans les teneurs en or des matériaux traités.

A l'issue de ces essais, on pourra retenir que l'or peut être récupéré à hauteur de 60 % (cas de Bélizon) et de 68 % (cas de Dieu Merci) dans une fraction "Lourds" par séparation centrifuge.

3.4.4. Calculs de rendements théoriques

L'ensemble des résultats des parties précédentes définissent un procédé qui associe (Figure 69):

- un tamisage du lot initial à 2 et 20 mm;
- un tamisage de la fraction -2 mm qui produirait les fractions -125 µm, 125/250 µm, 250/500 µm, 0,5/1 mm et 1/2 mm;
- un tablage des fractions intermédiaires -125 µm, 125/250 µm, 250/500 µm et 0,5/1 mm;
- une étape de séparation centrifuge de la fraction -125 µm.

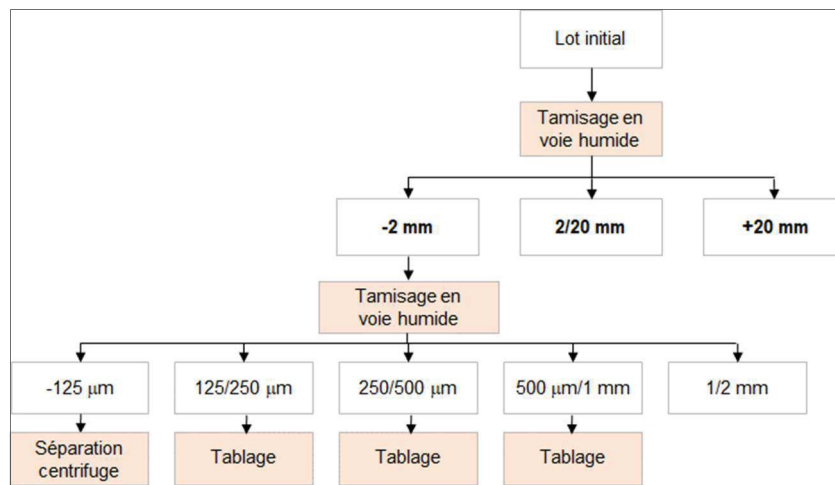


Figure 69. Schéma global de traitement des fractions Bélizon et Dieu Merci

Sur la base des données de distribution granulométriques (Figure 41 et Figure 49) et de répartition de l'or (Figure 42 et Figure 50) du lot 1 de Dieu Merci et de Bélizon, l'ensemble des résultats des parties précédentes permet d'estimer les masses, les teneurs et les récupérations théoriques des différents concentrés produits par ce procédé. Ces données constituent des estimations, dans la mesure où (i) les lots traités par tablage et séparation centrifuge sont les lots L3 et L4, et non L1, pour chacun des deux sites, et, (ii) où les pertes en or aux différentes étapes de ces traitements sont considérées comme nulles.

¹⁴ Teneur moyenne calculée sur les résultats du Lot 1 avec les données de la Figure 45

Le Tableau 24 présente les résultats obtenus pour le cas de Dieu Merci.

| Opération | Fraction | Masse, g | Teneur, ppm | Récupération de l'opération, % | Récupération ramenée au lot initial, % |
|------------|------------|----------|-------------|--------------------------------|--|
| Centrifuge | -125 µm | 4 120 | 22,5 | 68,4 | 39,3 |
| Tablage | 125/250 µm | 545 | 44,9 | 86,6 | 10,4 |
| | 250/500 µm | 481 | 32,9 | 72,9 | 6,7 |
| | 0,5/1 mm | 198 | 21,2 | 51,9 | 1,8 |
| Tamisage | 1/2 mm | 2 810 | 4,9 | n.a | 5,9 |
| | 2/20 mm | 13 840 | 2,7 | n.a | 16,0 |
| | +20 mm | 9 260 | 1,7 | n.a | 6,6 |

Tableau 24. Masses, teneurs et récupérations associées aux fractions produites par les différentes étapes de séparation, cas de Dieu Merci. n.a. : non applicable

Les résultats indiquent que les opérations de tablage et de séparation centrifuge permettraient de récupérer 58,2 % de l'or présent dans l'échantillon de Dieu Merci. Le reste de l'or est présent pour 13,3 % dans les fractions légères appauvries de ces traitements, et pour 28,5 % dans les fractions juste tamisées et non traitées à +1 mm. Sur cette base, et si l'intégralité de l'échantillon était broyée à -1 mm, le taux de récupération de l'or pourrait donc théoriquement atteindre 86,7 %.

Le Tableau 25 présente les résultats obtenus pour le cas de Bélizon.

| Opération | Fraction | Masse, g | Teneur, ppm | Récupération de l'opération, % | Récupération ramenée au lot initial, % |
|------------|------------|----------|-------------|--------------------------------|--|
| Centrifuge | -125 µm | 1 348 | 311 | 60,2 | 21,5 |
| Tablage | 125/250 µm | 435 | 439 | 85,6 | 9,8 |
| | 250/500 µm | 416 (1) | 214 | 57,7 | 4,6 |
| | 0,5/1 mm | 414 | 138,7 | 46,8 | 2,9 |
| Tamisage | 1/2 mm | 2 870 | 46,8 | n.a | 6,9 |
| | 2/20 mm | 10 250 | 46,9 | n.a | 24,7 |
| | +20 mm | 5 970 | 29,9 | n.a | 9,2 |

Tableau 25. Masses, teneurs et récupérations associées aux fractions produites par les différentes étapes de séparation, cas de Bélizon. n.a. : non applicable. (1): voir texte ci-dessous

En prenant l'hypothèse, pour le second tablage manquant pour la fraction 250/500 µm, d'une fraction massique de "Lourds" égale à celle de la fraction 250/500 µm de Dieu Merci (soit 10,96 %, qui se traduit ici par une masse de 330 g), et un taux de récupération également identique (soit 34,42 %), les deux étapes de tablage de la fraction 250/500 µm de Bélizon devrait aboutir à 416 g d'un échantillon à 214 ppm, pour une récupération de 57,5 % de l'or. Sur cette base, les opérations de tablage et séparation centrifuge permettraient de récupérer 38,8 % de l'or présent dans l'échantillon de Bélizon. Les fractions appauvries représenteraient 20,4 %, et les fractions non traitées 40,8 %. Broyer l'intégralité du lot à 1 mm permettrait donc théoriquement de récupérer 79,6 % de l'or.

4. Conclusions générales

L'étude visait à évaluer le potentiel de récupération de l'or de minerais primaires altérés guyanais, au moyen de techniques minéralurgiques utilisées pour l'exploitation de l'or alluvionnaire. Elle incluait trois cas d'application, correspondant à trois minerais distincts prélevés lors d'une mission dédiée, sur les sites de Dieu Merci, de Bélizon et de Grande Usine.

Une première étape de préparation de ces lots, consistant en un enchaînement d'opérations de concassage, de broyage et de tamisage, a été réalisée afin de fournir des échantillons pour les caractérisations chimiques et minéralogiques, les tests de concentration préliminaire à petite échelle sur table Mozley, et les tests d'enrichissement à plus grande échelle par tablage et séparation centrifuge.

L'étape de caractérisation inclut des analyses chimiques multiéléments, en or total et en or libre, ainsi que la caractérisation des teneurs en oxydes et la détermination des compositions minéralogiques. Un protocole de dosage de l'or libre par amalgamation, inspiré de la littérature scientifique, a aussi été mis en œuvre, mais les résultats obtenus sont jugés peu fiables. Les différentes caractérisations font ressortir les spécificités de chacun des lots: l'échantillon de Grande Usine est constitué de blocs de quartz riches en or, et affiche une teneur moyenne en or total élevée, autour de 75 ppm, tandis que les lots de Dieu Merci et de Bélizon sont caractéristiques d'un minerai saprolitique argilisé, avec des teneurs de 5 et 53 ppm respectivement.

Les essais de séparation sur table Mozley ont mené à des récupérations plutôt faibles de l'or dans les fractions "Lourdes", au regard de la valeur du critère de concentration pourtant particulièrement favorable. Les essais ont mis en évidence l'influence croisée de plusieurs paramètres, relatifs au matériau (forme et degré de libération des particules d'or), à l'équipement (débit d'eau de lavage), et à l'opérateur (durée de traitement et masse de solide placée sur la table). L'interprétation des résultats est relativement subtile, d'autant plus compte-tenu du nombre d'essais réalisés, mais fait apparaître que le traitement d'une masse relativement faible d'un échantillon dont les particules d'or sont libérées et sous forme de plaques mène à des taux de récupération élevés.

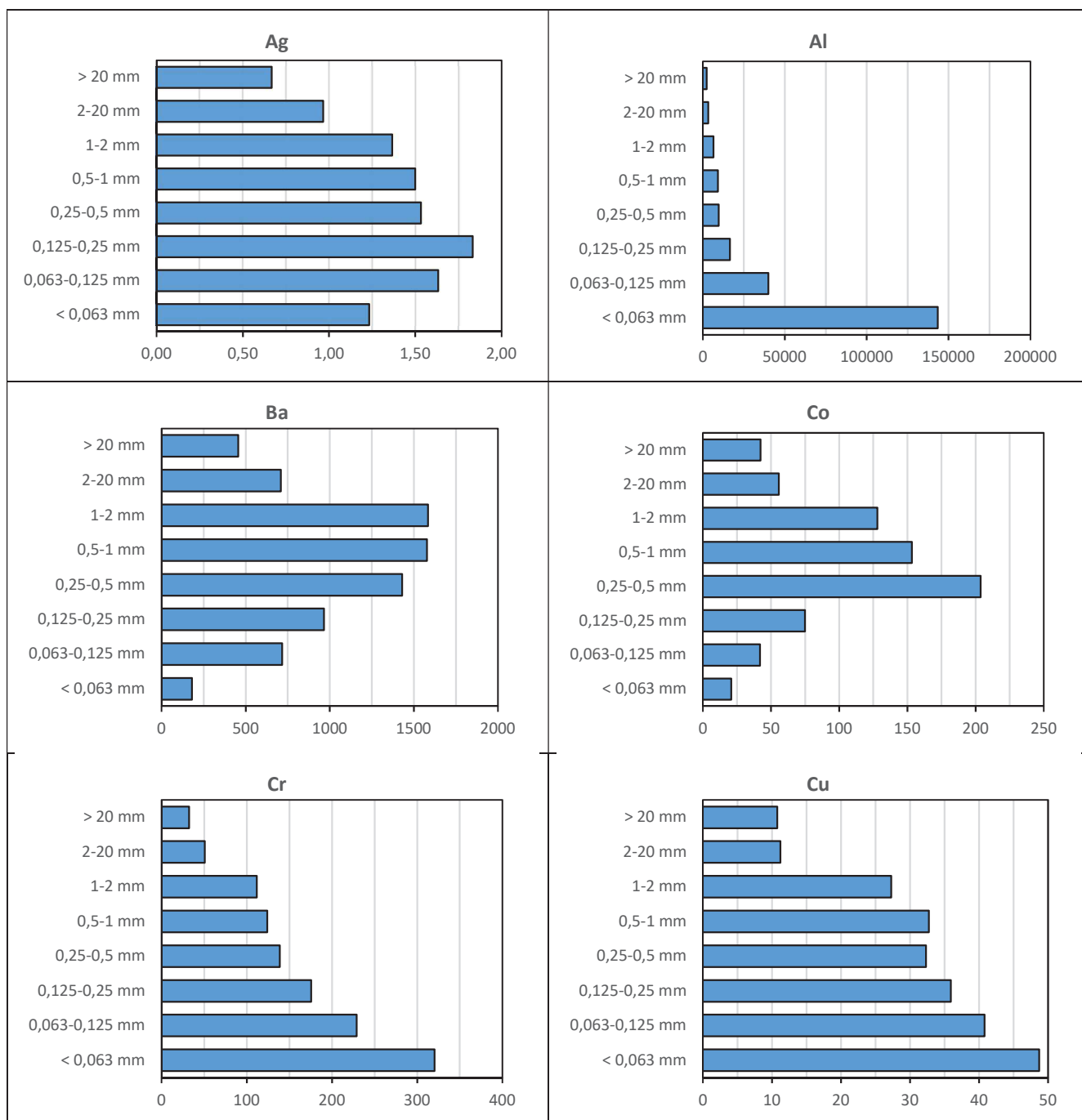
Les résultats des essais de tablage, réalisés en deux passes pour les fractions entre 125 μm et 1 mm, montrent une récupération d'autant meilleure que la granulométrie de l'échantillon est fine et que l'intervalle granulométrique est resserré. Dans ces conditions, les taux de récupération sont de l'ordre de 70 % dans les fractions Lourdes en une passe, pour les deux minerais testés. Le réglage des paramètres opératoires débit d'eau d'aspersion, débit d'eau de lavage et fréquence des secousses est particulièrement fin, et doit faire l'objet d'une campagne préliminaire d'essais pour déterminer les valeurs optimales propres aux caractéristiques du minerai traité. Les résultats des essais de séparation centrifuge, réalisés en une passe pour des fractions $-125 \mu\text{m}$, mènent à des rendements de récupération de l'ordre de 60 à 68%. A l'instar du tablage, l'optimisation des paramètres par une campagne préliminaire dédiée pourraient permettre d'augmenter ces valeurs.

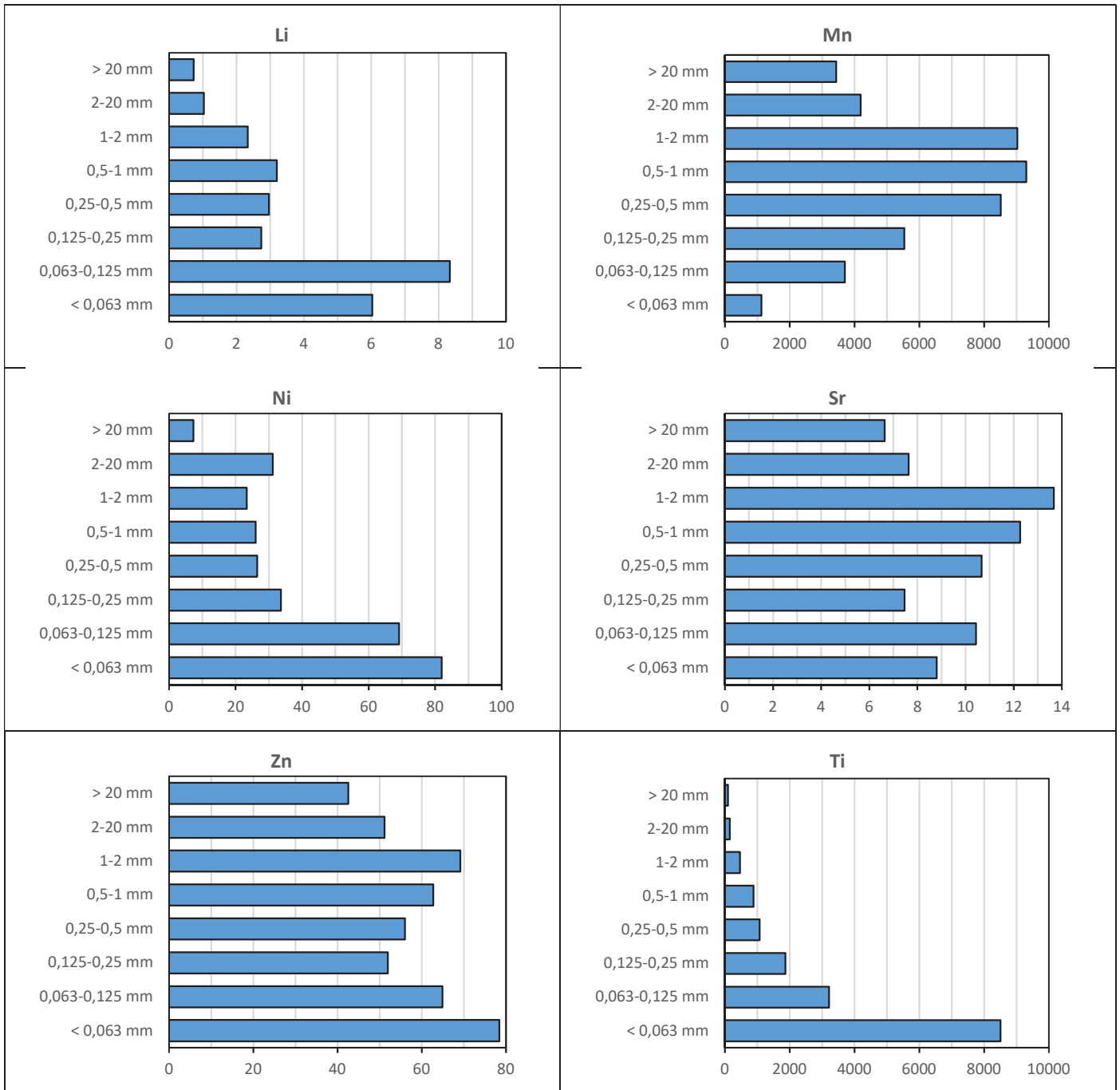
L'ensemble des essais pilote a permis de définir une chaîne de traitement et d'en estimer des rendements théoriques, de l'ordre de 80 à 86 % de l'or selon le minerai considéré. Ces valeurs sont calculées en considérant des pertes en or nulles, et en supposant que l'intégralité du minerai soit broyée à des granulométries inférieures à 1 mm.

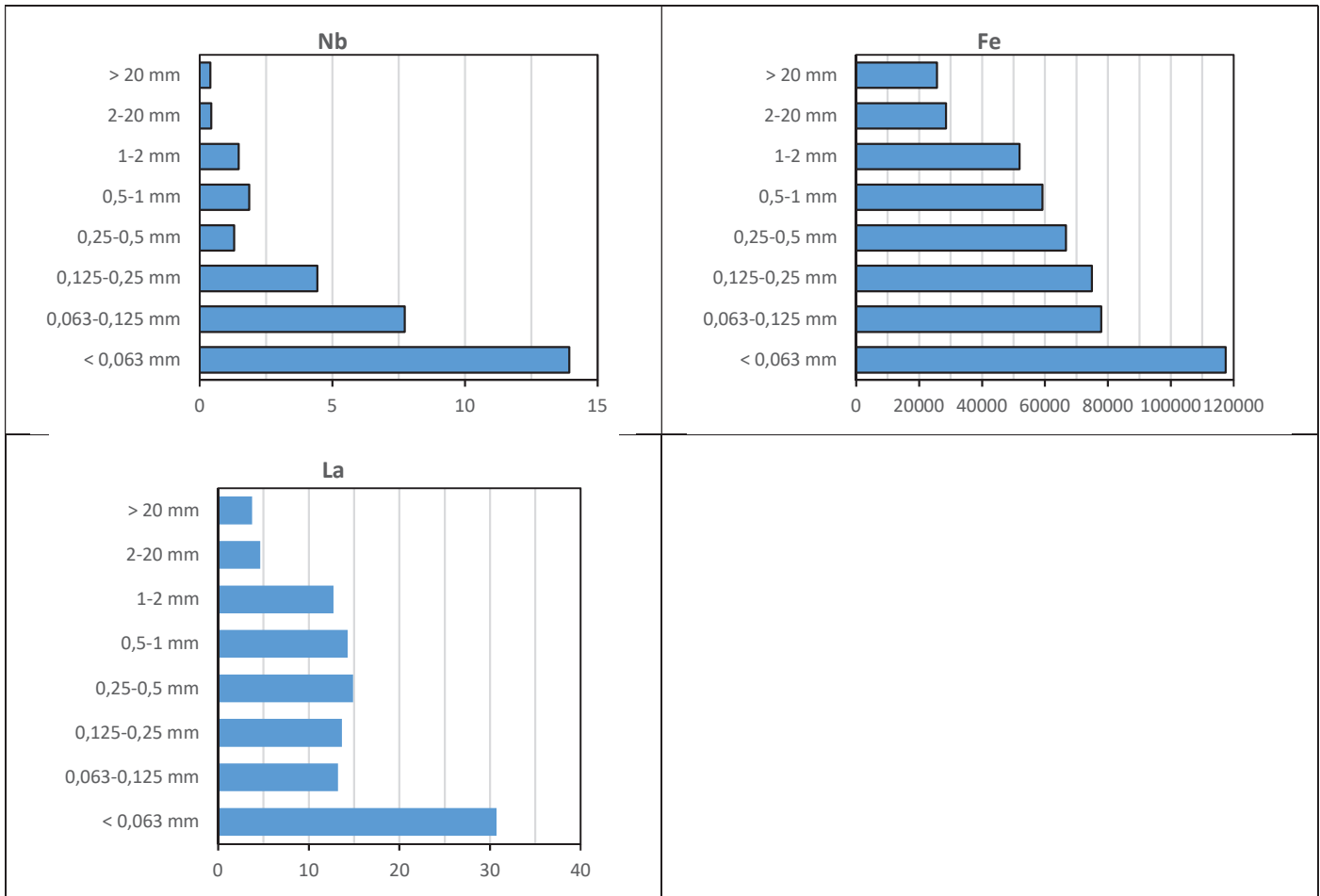
Annexe 1 Analyse granulochimique des échantillons

1. ECHANTILLONS DE DIEU MERCI

1.1. Teneurs par éléments, exprimées en ppm





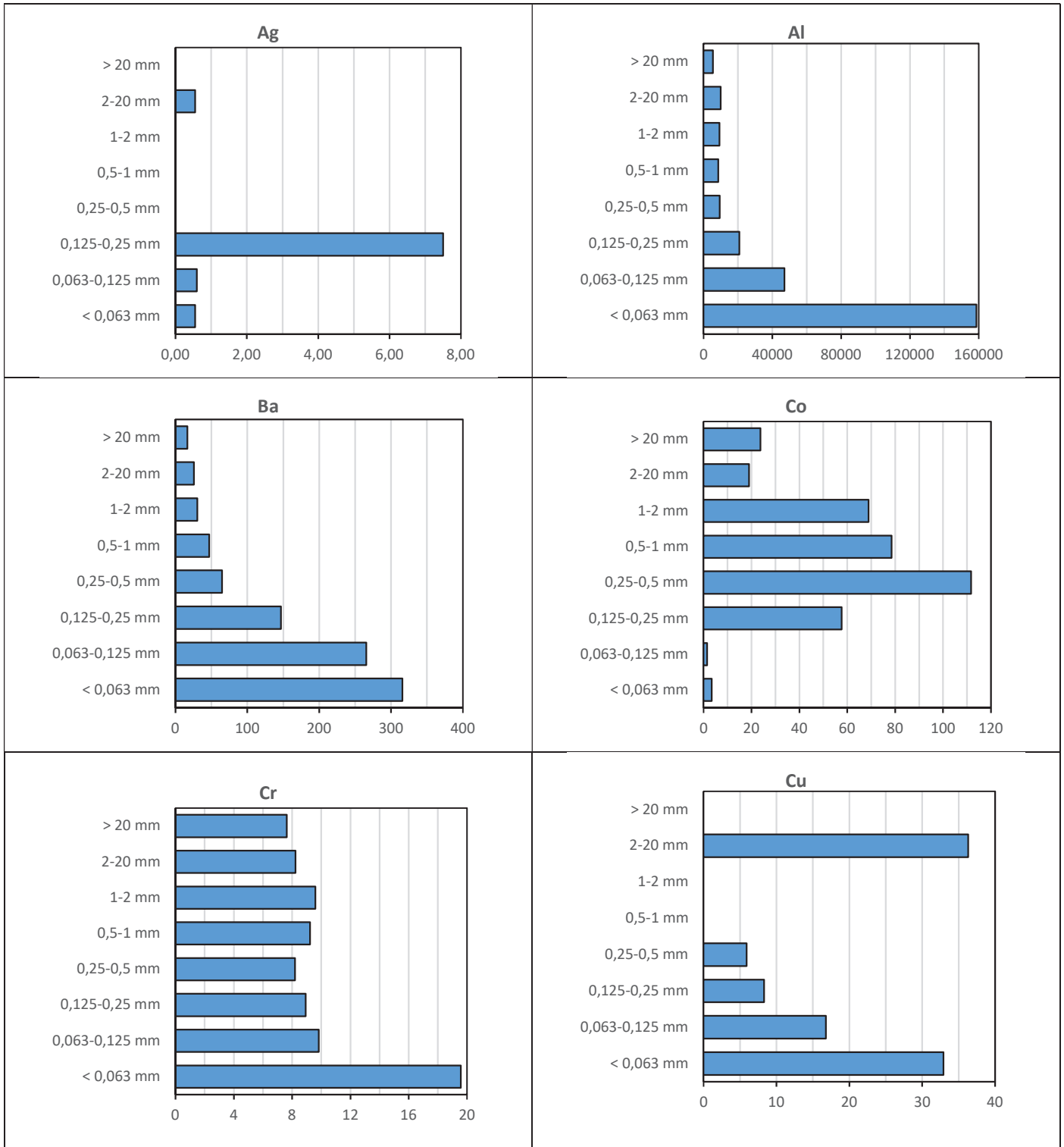


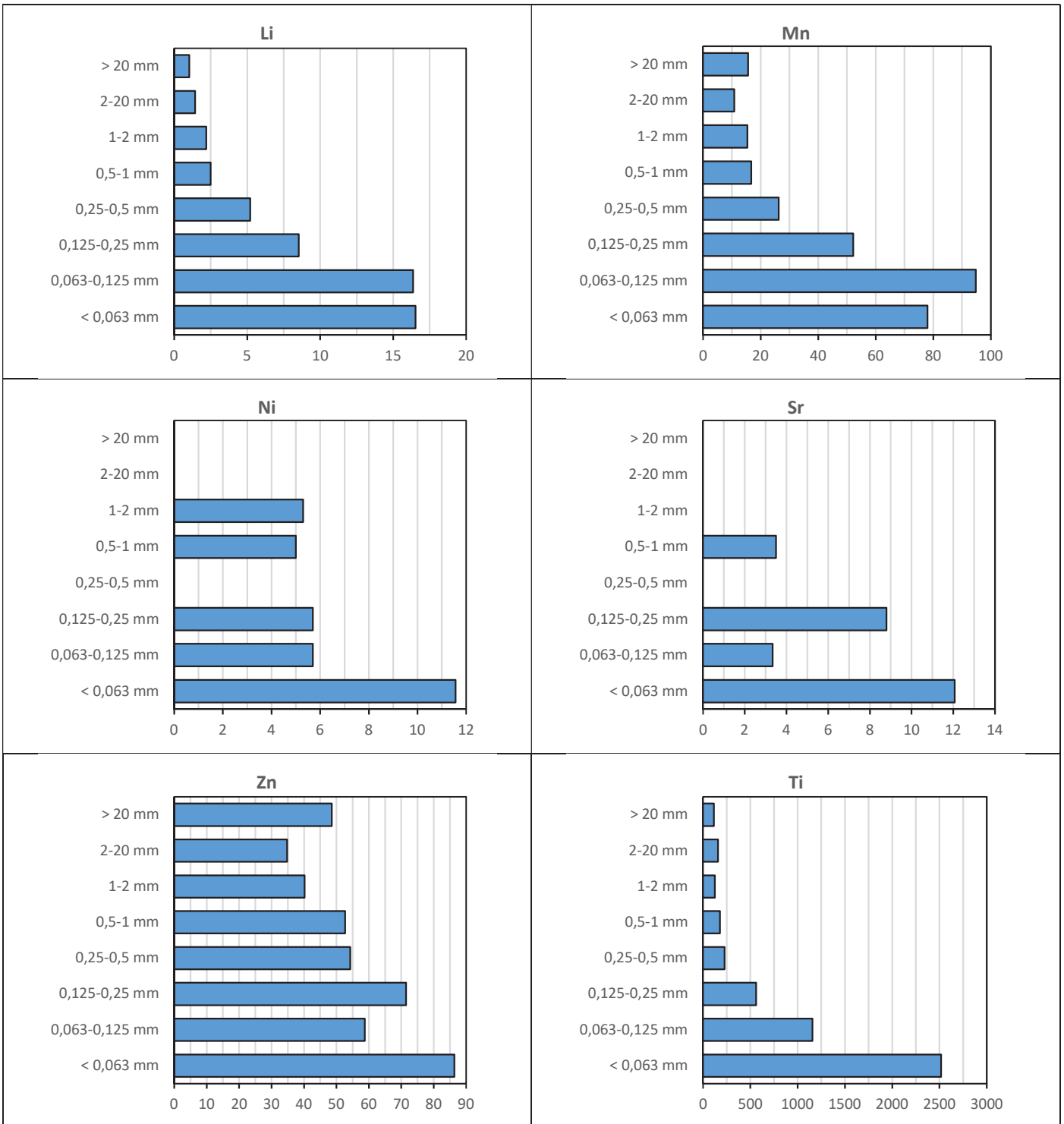
1.2. Répartition des éléments par fraction, exprimées en %

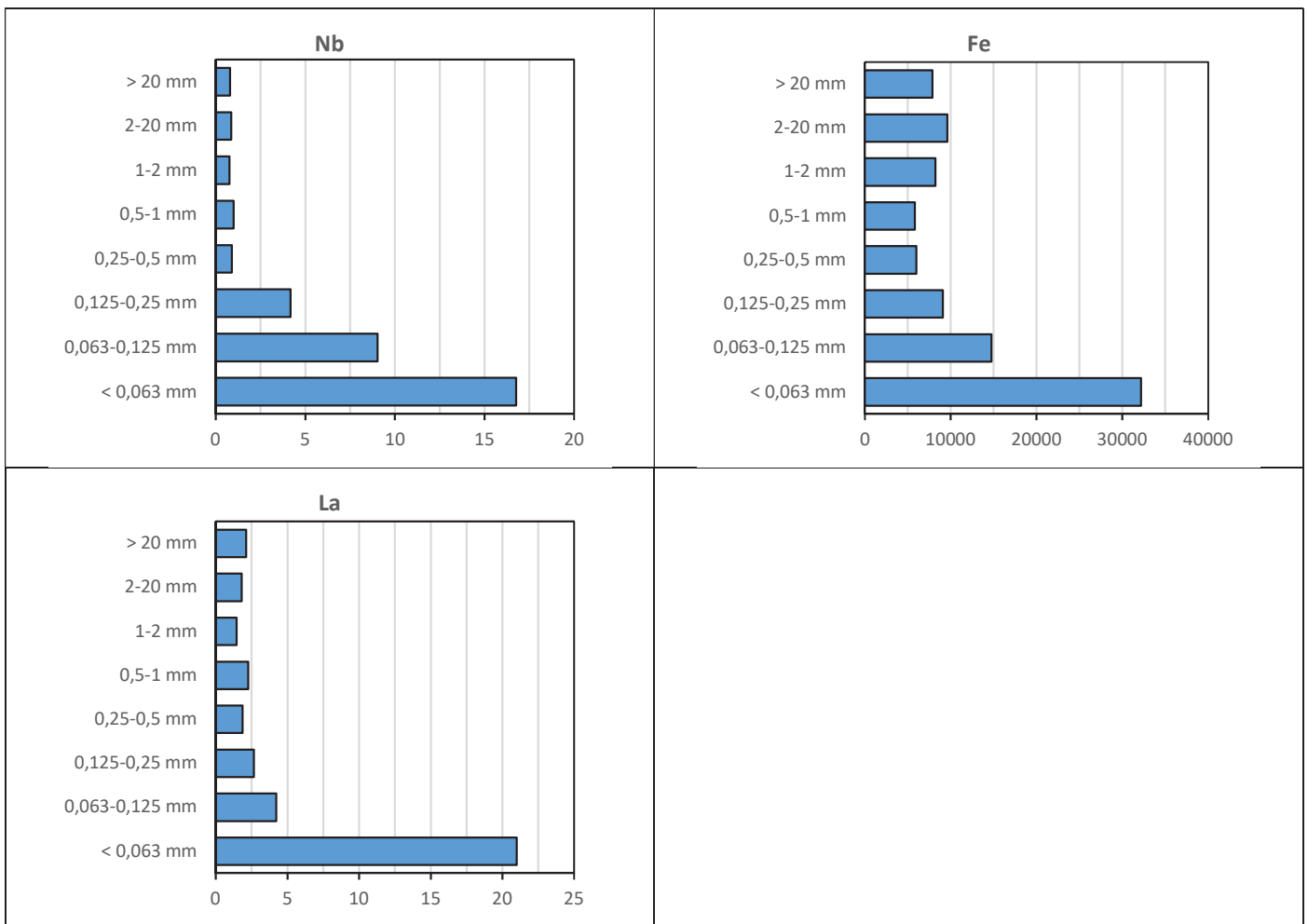


2. ECHANTILLONS DE BELIZON

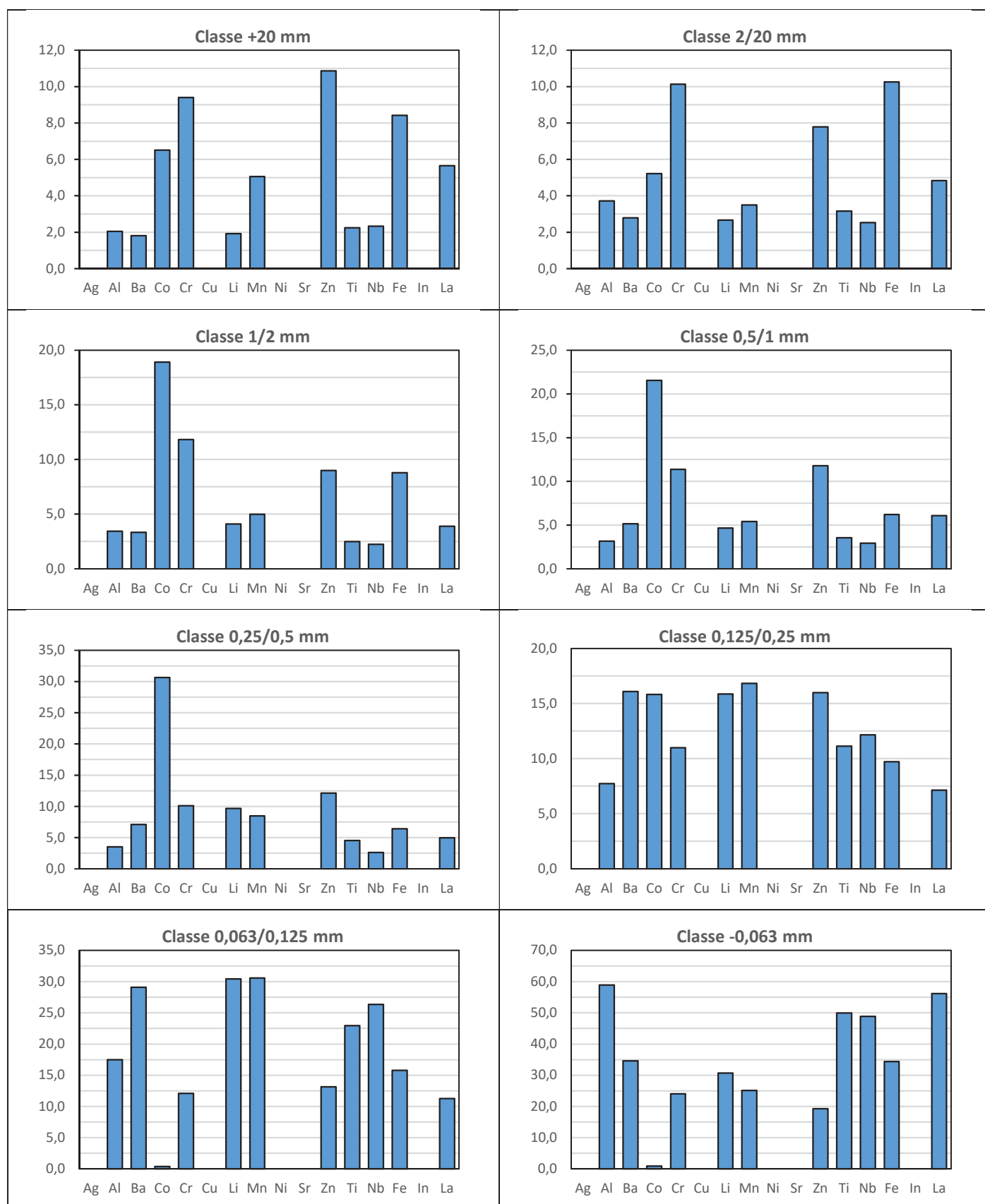
2.1. Teneurs par éléments, exprimées en ppm





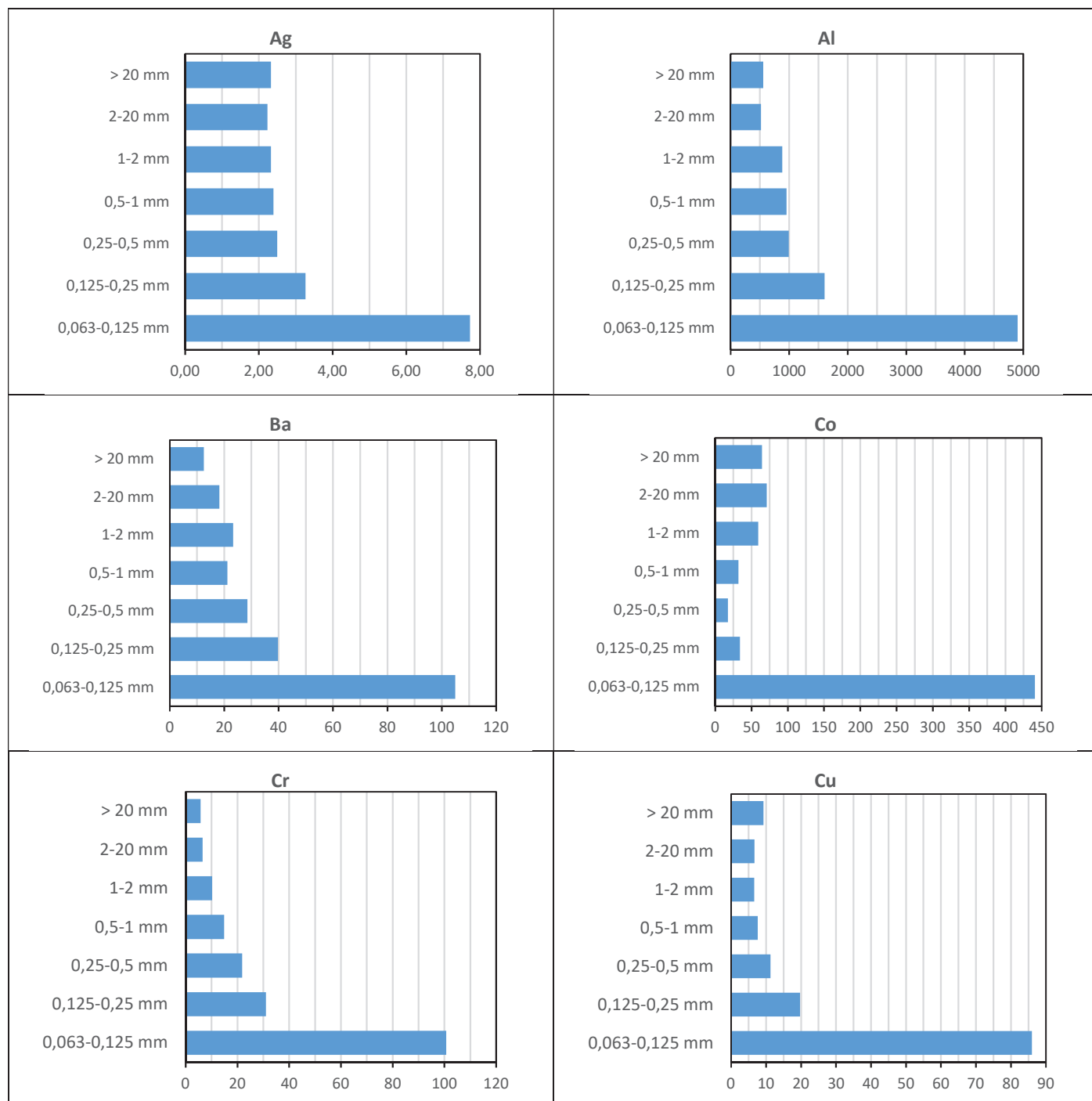


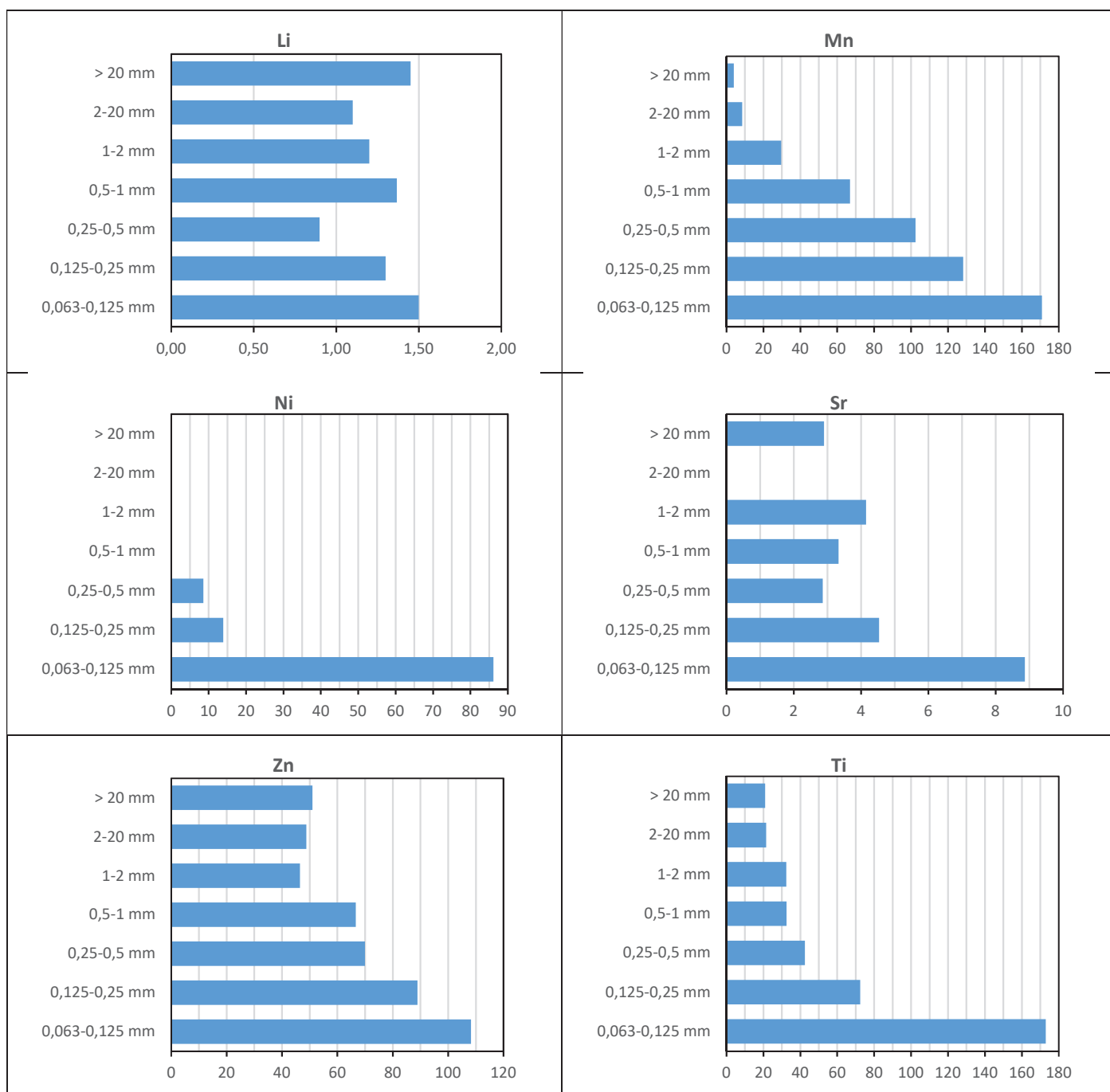
2.2. Répartition des éléments par fraction, exprimées en %

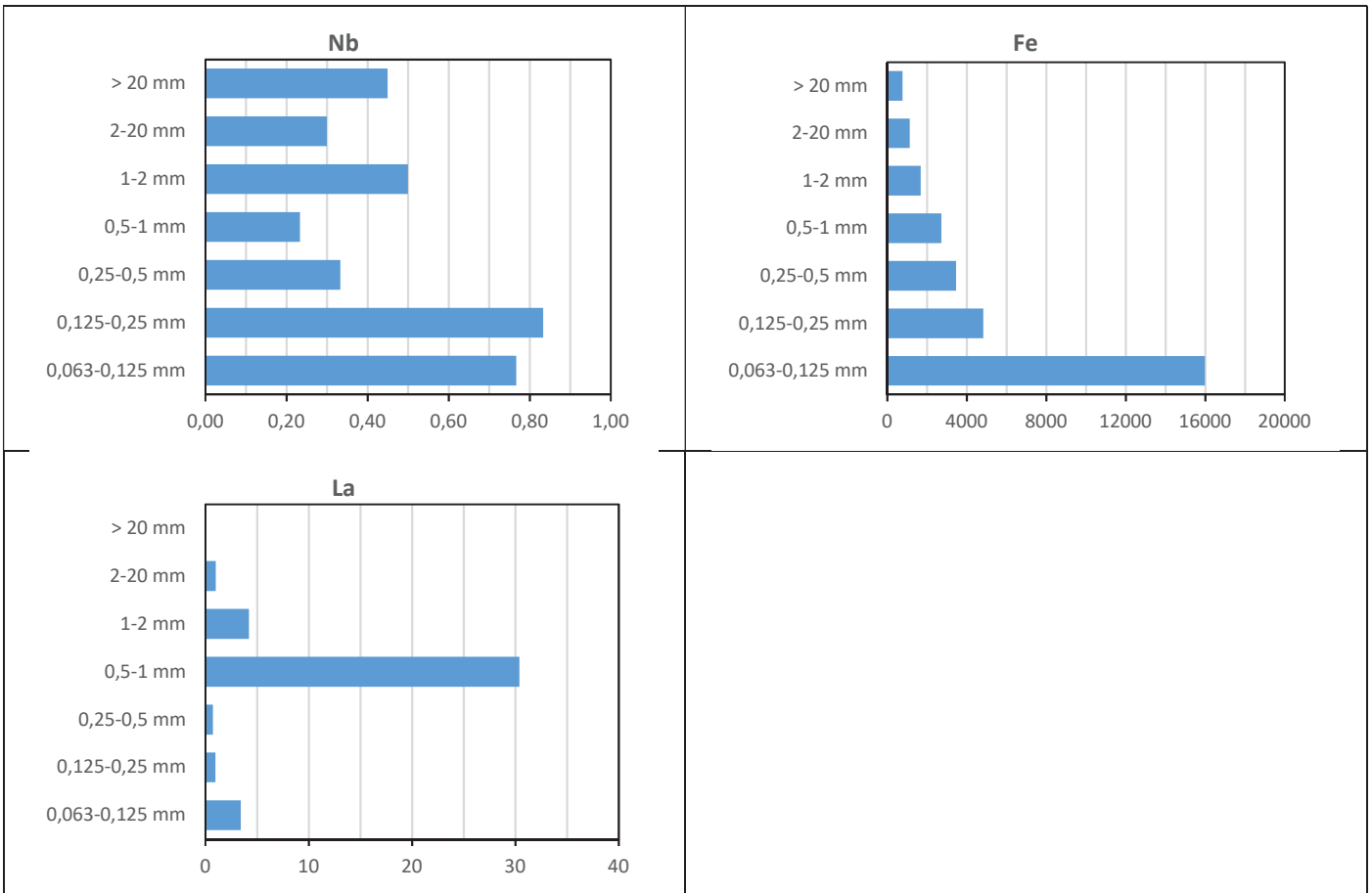


3. ECHANTILLONS DE GRANDE USINE

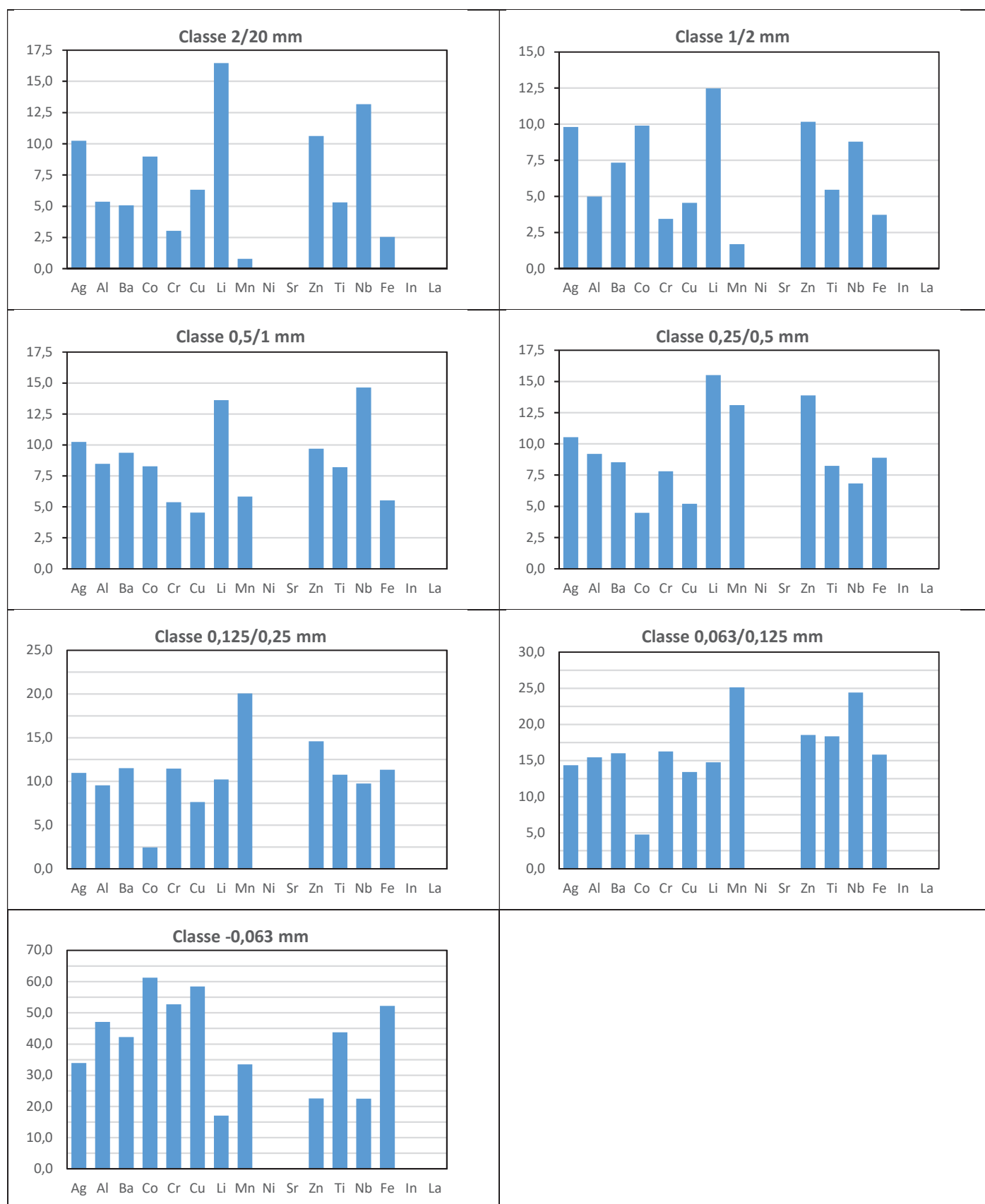
3.1. Teneurs par éléments, exprimées en ppm





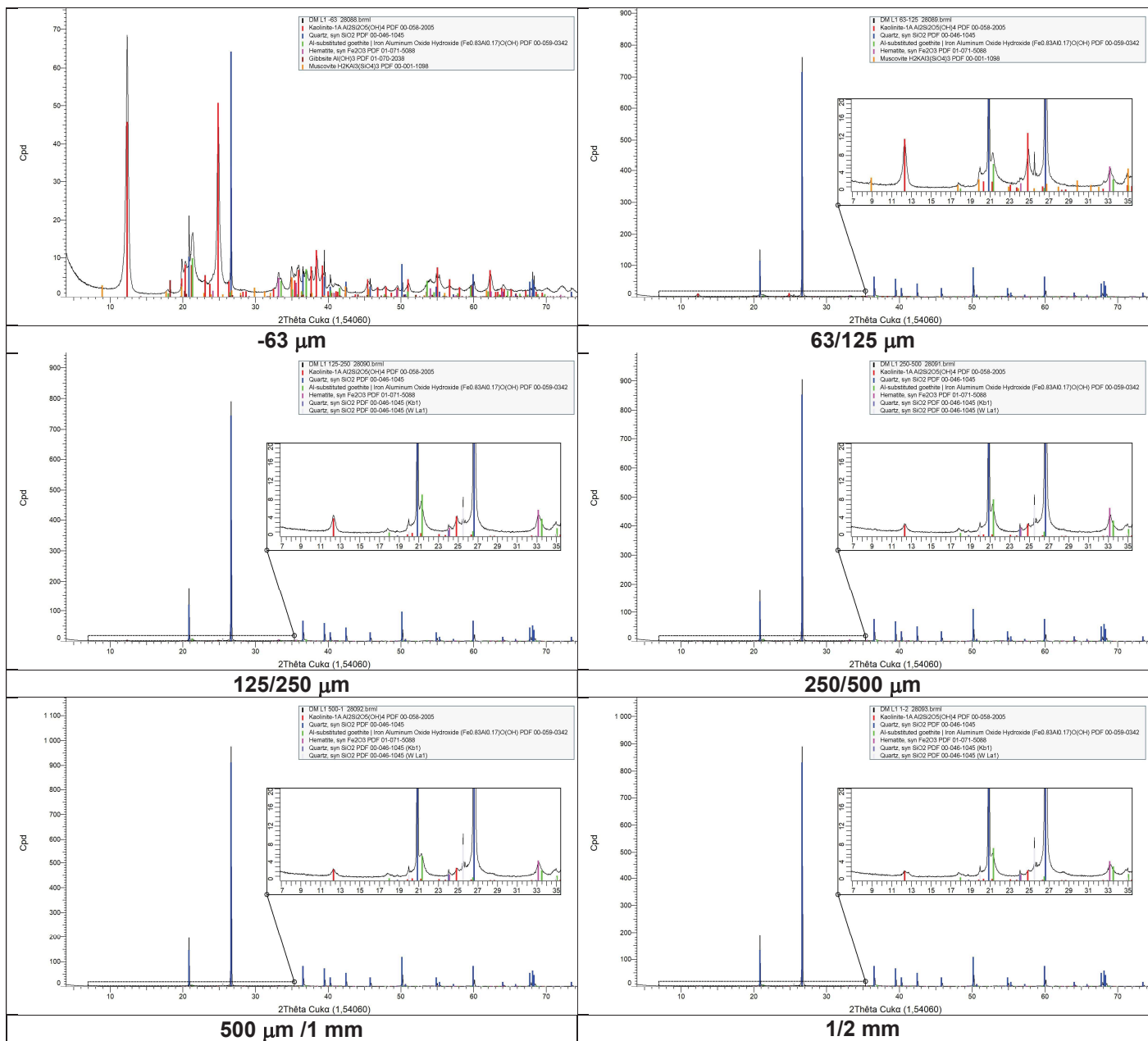


3.2. Répartition des éléments par fraction, exprimées en %

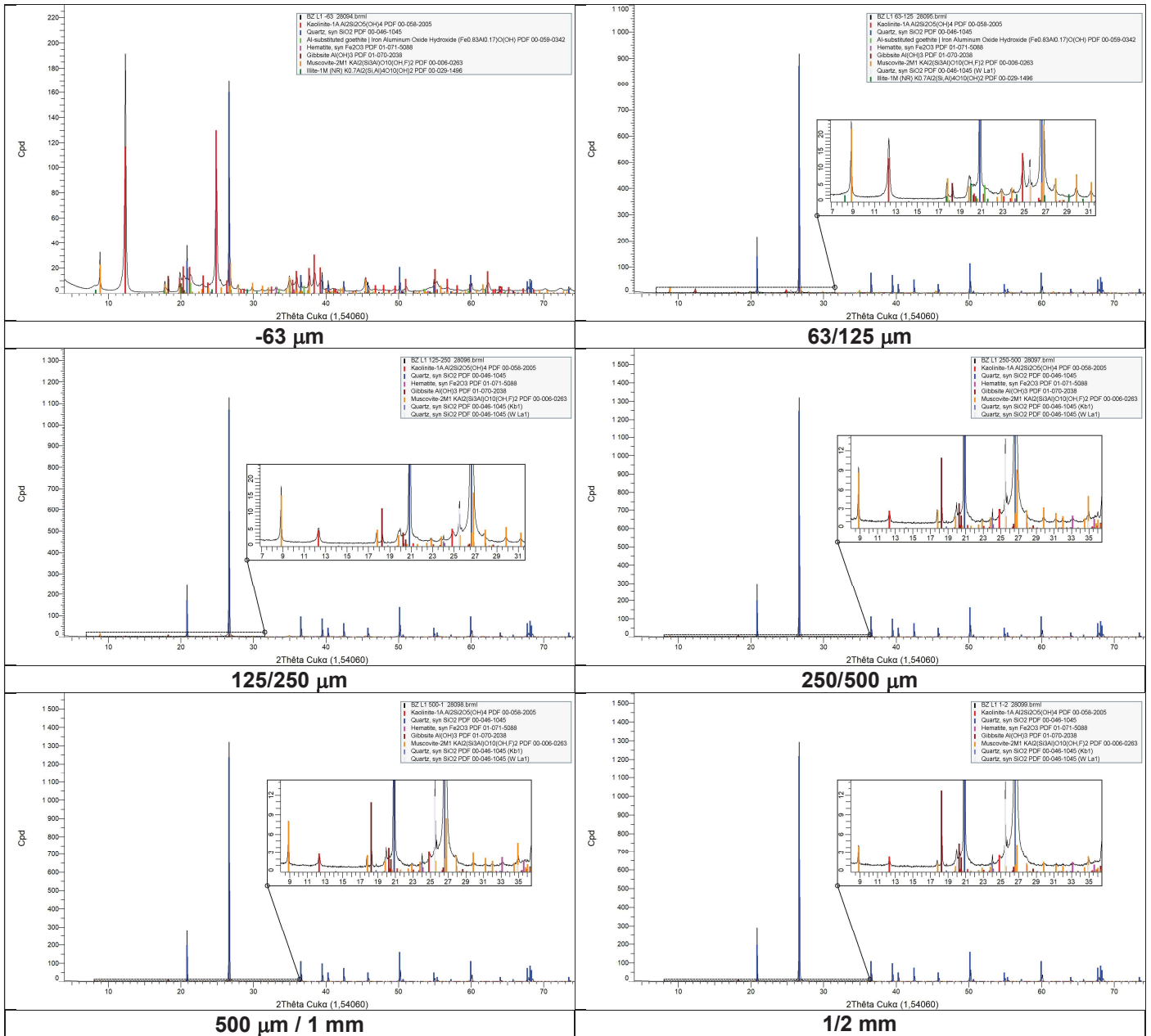


Annexe 2 Spectres DRX des échantillons

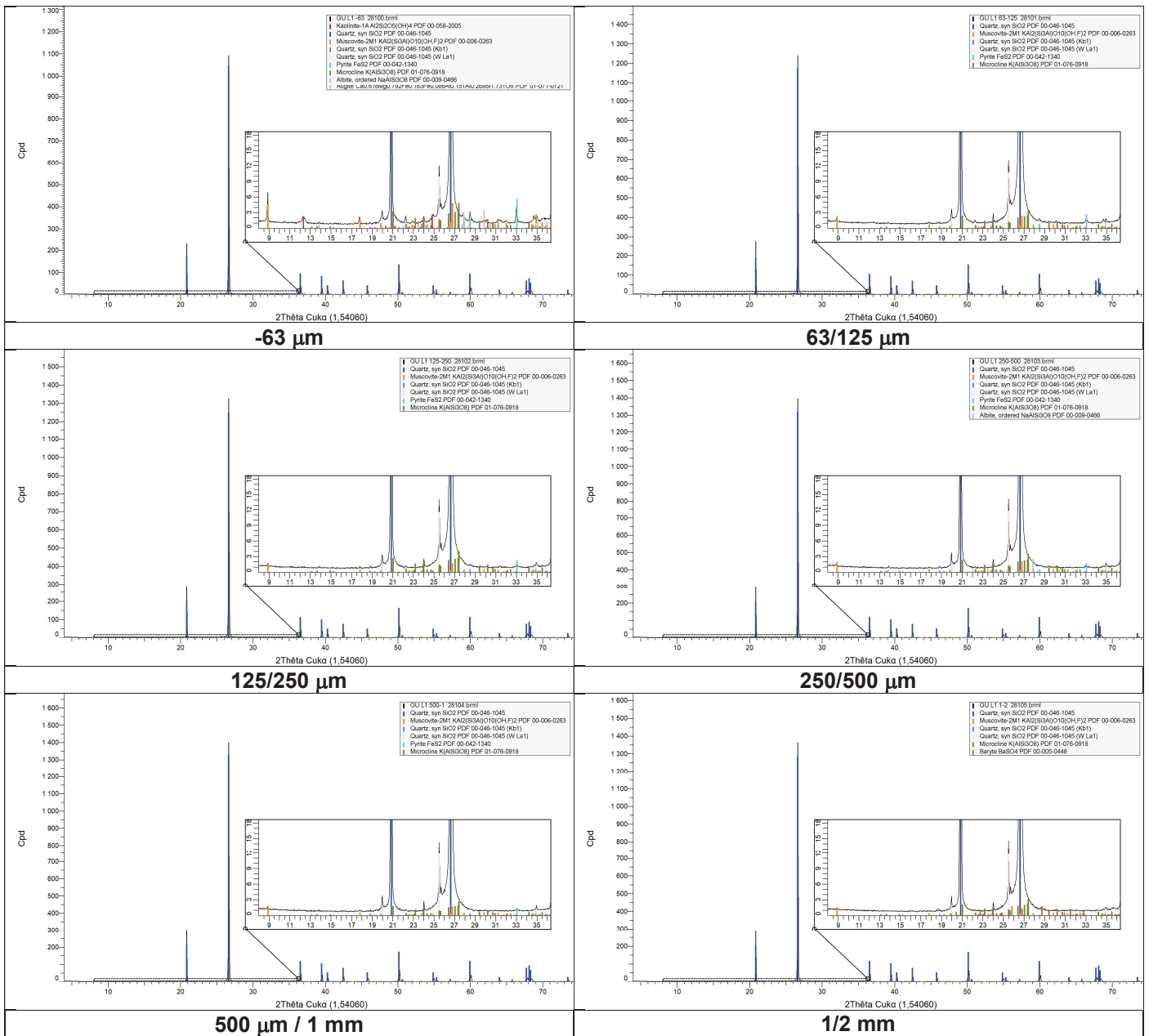
1. ECHANTILLONS DE DIEU MERCI



2. ECHANTILLONS DE BELIZON



3. ECHANTILLONS DE GRANDE USINE





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34



Géosciences pour une Terre durable

brgm

www.brgm.fr