

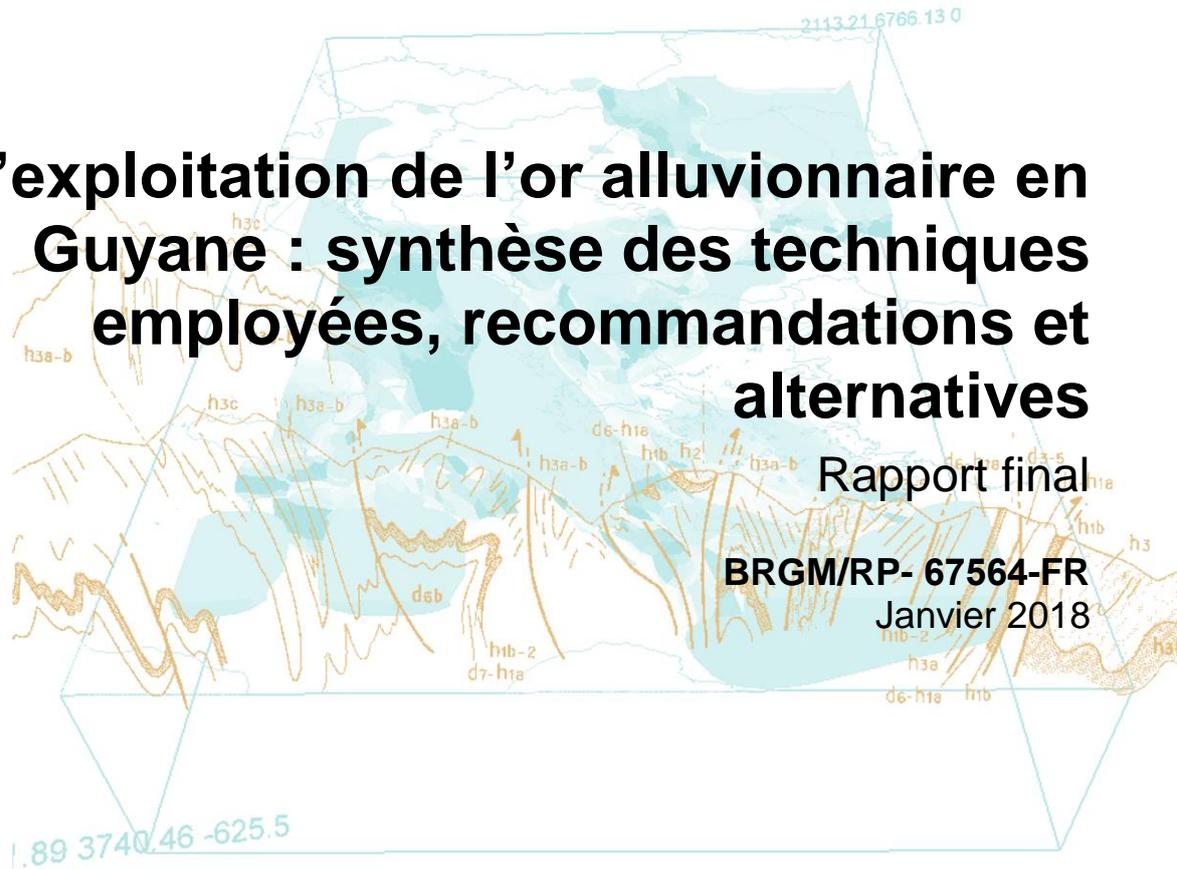


L'exploitation de l'or alluvionnaire en Guyane : synthèse des techniques employées, recommandations et alternatives

Rapport final

BRGM/RP- 67564-FR

Janvier 2018



Géosciences pour une Terre durable

brgm

L'exploitation de l'or alluvionnaire en Guyane : synthèse des techniques employées, recommandations et alternatives

Rapport final

BRGM/RP- 67564-FR

Janvier 2018

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public du BRGM

G. Aertgeerts, J.-L., Nagel, E. Fournier

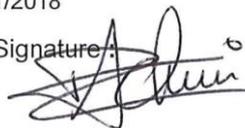
Vérificateur :

Nom : Duhamel-Achin I.

Fonction : Responsable DGR-MIN

Date : 26/01/2018

Signature :



Approbateur :

Nom : Verneyre L.

Fonction : Directrice régionale
Guyane

Date : 12/02/2018

Signature :



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

Mots-clés : Guyane, mine, or alluvionnaire, exploitation, recommandation, alternative, débourbeur, cribleur, panneaux concentrateurs, scrubber, sluice.

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

Aertgeerts G., Nagel J.L., et Fournier E. (2018) – L'exploitation de l'or alluvionnaire en Guyane : synthèse des techniques employées, recommandations et alternatives. Rapport final. BRGM/RP- 67564 -FR, 71 p., 52 fig.

Synthèse

L'exploitation d'or alluvionnaire en Guyane est un secteur dynamique du fait de la hausse des cours de l'or, de la structuration de la filière, des formations dispensées par celle-ci, de l'accélération de l'instruction des titres par les services de l'État et de la pression exercée par les orpailleurs illégaux quant à l'utilisation de mercure dans le procédé de concentration de l'or qui est prohibé sur le territoire national français depuis 2006. Si cette filière guyanaise est surtout représentée par des entreprises de petites tailles dites artisanales travaillant en alluvionnaire, l'extraction d'or peut être scindée en trois grandes phases quelle que soit la taille des exploitations considérées:

- la phase de prospection ;
- la phase d'exploitation ;
- la phase de réhabilitation.

Après un rappel du cadre légal et géologique respectivement de la mine et de la géologie en Guyane, ce rapport vise à procéder en seconde partie, sur la base des observations réalisées sur le terrain, à des recommandations et des alternatives aux méthodes utilisées actuellement.

Pour ce faire, l'étude s'est basée sur neuf visites de sites miniers, ce qui a permis d'identifier les problèmes techniques, parfois récurrents, qui ont un fort impact sur la concentration de l'or.

Cette étude a montré que le principal poste générateur de pertes de production aurifère se situe au niveau du débourbage, souvent imparfaitement réalisé. L'or inclus dans de l'argile constitue un assemblage relativement allégé qui n'est pas récupérable par le procédé gravitaire le plus couramment employé car la puissance des jets (Monitor) utilisés expulse du système une partie de cette fraction du minerai entrant. Par ailleurs, l'or fin une fois libéré, qui autrefois pouvait être amalgamé par le mercure, échappe à présent aux tables de récupération (sluices) trop courtes, trop inclinées et le plus souvent non réglables. Beaucoup d'exploitants ne procèdent pas aux nécessaires contrôles réguliers des rejets en sortie de la laverie, opération qui permettrait d'en ajuster les paramètres (i.e. pentes et débit d'eau).

D'une manière générale, la séparation finale de l'or est une opération bien conduite ; quelques soient les appareils utilisés, il reste toujours une partie visuelle et manuelle de finition, seulement plus chronophage si l'opération n'est pas facilitée avec l'aide de séparateurs mécaniques (e.g. Bol de Knelson, tables à secousses, sluices, etc.).

De plus, en parallèle à ces observations sur le terrain, une recherche bibliographique a été menée afin d'identifier ce qui, ailleurs dans le monde, est employé pour débourber, cribler et concentrer l'or. Cette recherche a montré que, si l'on s'impose des conditions d'exploitation comparables à celle que l'on trouve en Guyane (i.e. minerais très argileux, accès limité, mercure interdit), il existe en réalité peu d'alternatives. Il est aussi apparu que le système utilisé en Guyane n'est pas utilisé ailleurs, probablement pour les raisons évoquées précédemment. La grande différence entre ces alternatives et la méthode guyanaise réside dans le fait que cette dernière se fait en système ouvert, ce qui encore une fois génère une perte substantielle de minerai.

Le système guyanais n'est pas obligatoirement à remplacer par les alternatives qui sont présentées dans ce rapport, mais pourrait être substantiellement amélioré. En fonction des possibilités et des moyens de chacun, il nous semble impératif (1) que le débourbage se fasse en circuit fermé avec déperditions contrôlées, (2) que les plateaux portant les canaux de concentration (sluices) soient au nombre minimal de 3, et (3) que ces plateaux soient réglables

en inclinaison. Dans l'éventualité d'une amélioration possible du système par l'opérateur minier, il serait pertinent de remplacer le bac de débouillage par un système cylindrique constitué d'un débouilleur (scrubber), suivi d'un cribleur (trommel), comme c'est le cas pour de nombreux équipements développés par les industries professionnelles (quelques exemples qui pourraient être utilisés en contexte guyanais sont présentés à la fin de ce rapport). Rappelons d'ailleurs que ce type d'équipements a déjà été utilisé en Guyane auparavant par des entreprises structurées à forts capitaux, leur retrait ayant laissé place aux artisans utilisant des méthodes plus rustiques et moins coûteuses.

Concernant l'étape d'affinage de l'or, il apparaît que peu de techniques complémentaires, aussi récentes et développées soient-elles, apportent des résultats meilleurs que ceux obtenus avec les techniques employées aujourd'hui en Guyane. Seul un gain ou une perte de temps s'opère à ce niveau. Il ne semble donc pas forcément nécessaire de multiplier les dépenses de matériel technique, voire technologique pour une plus-value aussi faible. Les investissements des opérateurs sur cette étape aval du traitement ne sont pas prioritaires comparativement à la plus-value que pourrait apporter les améliorations technologiques sur les étapes amont de lavage et de concentration (débouillage et criblage).

Sommaire

1. Introduction	9
2. Cadre légal et socio-économique de l'activité minière aurifère en Guyane	11
2.1. CODE MINIER	11
2.2. SCHEMA DEPARTEMENTAL D'ORIENTATION MINIERE (SDOM)	12
2.3. GROUPE DE TRAVAIL EXPLOITATION ENVIRONNEMENT ZONAGE (GTEEZ) 13	
2.4. FACTEURS LIMITANTS	14
2.4.1. Contraintes géographiques	14
2.4.2. Contraintes climatiques et saisonnières	14
3. Contexte géologique et potentiel aurifère	15
3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE GUYANE.....	15
3.2. POTENTIEL MINIER AURIFERE EN GUYANE	17
4. L'exploitation de l'or en Guyane : constat et recommandation	23
1. PREAMBULE.....	23
2. LE PLAN D'EXPLOITATION DU FLAT	23
4.1.1. Constat	23
4.1.2. Recommandations	24
3. LA SEPARATION DU MINERAI AURIFERE	24
4.1.3. Constats	27
4.1.4. Conséquences.....	27
4.1.5. Recommandations	27
4. LE SYSTEME DE LAVAGE CLASSIQUEMENT UTILISE EN GUYANE	27
4.1.6. Description du système classique	27
4.1.7. Analyse critique de l'unité de débouage.....	29
4.1.8. Analyse critique de l'unité de criblage	38
4.1.9. Analyse critique de l'unité de piégeage	42
4.1.10. Analyse critique de la phase de levée	45
5. AFFINAGE ET SEPARATION DE L'OR.....	46
6. L'EAU	55

5. Synthèse principale sur les constats et recommandations concernant les techniques d'exploitation d'or en Guyane	57
1. LE PLAN D'EXPLOITATION.....	57
2. L'EXTRACTION DE LA COUCHE MINERALISEE	57
3. LE CIRCUIT DE TRAITEMENT	57
4. LA FINITION, LE PRODUIT COMMERCIAL.....	60
6. Alternative au système guyanais : les équipements mobiles utilisés dans le monde	61
5. EXEMPLE D'EQUIPEMENT ASSOCIANT : DEBOURBEUR – CRIBLEUSE –SLUICES	62
6. EXEMPLE D'EQUIPEMENT ASSOCIANT : DEBOURBEUR – CRIBLEUSE – CENTRIFUGEUSE	62
7. EXEMPLE D'EQUIPEMENT ASSOCIANT : DEBOURBEUR – CRIBLEUSE – CENTRIFUGEUSE, MONTES SUR ROUES	63
7. Conclusion	65
8. Bibliographie	67

Liste des figures

Figure 1 : synthèse des différents actes miniers et de leurs principales caractéristiques	12
Figure 2 : schéma départemental d'orientation minière (SDOM, modifiée de https://carto.geoguyane.fr/1/sdom.map , mise à jour du 10/07/2017).....	13
Figure 3 : Carte géologique simplifiée présentant les principales unités géologiques s.l. de Guyane. D'après Cassard et al. (2008).....	16
Figure 4 : Carte des prospections de l'Inventaire minier et ses découvertes aurifères modifié de Nagel J.-L., et al. 1996.	18
Figure 5 : Carte des secteurs couverts par les prospections ciblées en sol de l'Inventaire minier modifiée de Nagel J.-L., 1996.....	19
Figure 6 : Carte des indices aurifères de Guyane sur fond géologique modifiée de Colin, S. 2017.	20
Figure 7 : Carte des principaux districts aurifères de Guyane modifiée de Nagel J.-L. et al. 199521	
Figure 8 : Assemblage du bouclier guyano-africain reconstitué et ses principaux gisements d'or du Protérozoïque. D'après Nagel J.-L., 1996	22
Figure 9 :Front de taille d'un flat aurifère, décapage du stérile et extraction du gravier minéralisé, façonnage de la digue (J.L.Nagel).....	25
Figure 10 :Coupe d'un autre flat minéralisé sur base kaolinique (J.L.Nagel).	25
Figure 11 : L'argile du bed-rock montre souvent des structures rocheuses héritées encore discernables (J.L.Nagel).	25
Figure 12 : exemple d'interface entre la couverture argilo-silteuse stérile et le niveau de gravier minéralisé très riche en débris végétaux (J.L. Nagel).	26
Figure 13 : Contact du gravier minéralisé avec le toit du bed-rock kaolinique blanchâtre (J.L.Nagel).	26
Figure 14 : Cas d'un minerai hétérogène (stérile et gravier aurifères mélangés), chantier de reprise d'anciens travaux (J.L. Nagel).	26
Figure 15 : schéma d'exploitation type d'un placer ; circuit de l'eau et de l'or (J.L. Nagel, E. Fournier).	28
Figure 16 : photographies montrant le débouage du minerai aurifère à l'aide des lances Monitor à haute pression (J.L. Nagel). (a) lances Monitor avec 2 opérateurs, (b) gravier minéralisé en cours de liquéfaction dans la caisse de débouage, (c) vue d'ensemble du poste de lances Monitor.....	29
Figure 17 : modèles de laverie classiquement rencontrés dans les exploitations d'or alluvionnaire en Guyane française. (a) modèle relativement élaboré avec un poste de lance Monitor fixé à la laverie. A noter que des améliorations de ce modèle sont souhaitables. (b) Modèle rudimentaire avec un poste de lance Monitor non fixé à la laverie. Ce modèle est à proscrire, car il engendre des pertes importantes de minerai.	30
Figure 18 : photographies montrant les boulettes d'argile éjectées lors de la phase de débouage.	31
Figure 19 : schéma proposé illustrant une caisse de débouage plus conservatrice et plus efficace (J.L. Nagel, E.Fournier).	32
Figure 20 : schéma d'exploitation incluant une pompe à graviers (J.L. Nagel, E. Fournier)	33
Figure 21 : la pompe à graviers 6 pouces (J.L. Nagel).	34
Figure 22 : corps de pompe et rotor (J.L. Nagel).	34

Figure 23 : photographie des différentes étapes de fonctionnement d'un système de débouillage associé à une pompe à graviers. (a) façonnage du canal collecteur des graviers lavés dans le bed-rock argileux. (b) débouillage du minerai par jets Monitor et brassage du tas. (c) la pulpe minéralisée s'écoule vers la pompe à graviers, et l'élimination des galets est manuelle. (d) cuvette d'alimentation de la pompe et personnels en régulation de flux.....	35
Figure 24 : photographies de l'unité de lavage avec une pompe à graviers. (a) parcours de la pulpe du chenal argileux vers la laverie. (b) la laverie, alimentation et concentrateurs. (c) la caisse étanche de réception de la pulpe. (d) les trois étages de la laverie avec pentes réglables (J.L. Nagel).....	36
Figure 25 : schéma d'exploitation avec pompe à gravier et Trommel-crible (J.L. Nagel, E. Fournier).	37
Figure 26 : (a) photographies de l'unité de criblage. (b) complément de lavage par trois tubes injecteurs fixes (J.L.Nagel).....	38
Figure 27 : photographie des deux types de crible utilisés dans l'exploitation de l'or alluvionnaire en Guyane française. Ces photographies montrent très nettement l'engorgement du crible, en particulier pour le crible à barres rondes. A noter aussi la déformation des barres plates (c).	39
Figure 28 : schéma de traitement où débouillage et tri seraient assurés par un trommel-crible.....	40
Figure 29 : Photographies de trommels utilisés dans l'exploitation aurifère. (a et b) Trommel dans une unité de lavage d'éluvions en Guyane (J. Petot, 1993). (b et c) : Trommel et son crible, ici habillés de caoutchouc (Source : http://somatrap.fr/).....	41
Figure 30 : Trommel à crible grillagé utilisé au Guatemala (Source : https://riosuerte.com).	41
Figure 31 : (a) passage du flux sur le concentrateur à moquette et fer déployé (b) : panneaux de fer déployé (flux vers la droite) sur moquette spaghetti. (c) profil de riffles dit hongrois favorisant la sédimentation des minéraux lourds (J.L. Nagel).	43
Figure 32 : (a et b) photographies de l'unité de piégeage en fonctionnement. Dans les deux cas, le flux est trop important et ne permet pas la sédimentation des minéraux lourds. (b et c) sluice à 4 canaux améliorant la répartition des écoulements (J.L. Nagel). A noter sur les photographies c et d la présence de barres transversales qui sécurisent le plan concentrateur.	44
Figure 33 : photographies des différentes étapes de la phase de levée (a) retrait des panneaux de fer déployé. (b) retrait des moquettes. (c) nettoyage des moquettes dans un bac de transport. (d) : récupération des lourds du sluice déséquipé.....	45
Figure 34 : formes diverses de récipients concentrateur. (a) batée, (b) pan rainuré californien, (c) plat finlandais (source : http://www.orpaillage.fr).....	46
Figure 35 : cycle de mouvements réalisés lors de l'utilisation d'une batée (source : http://www.orpaillage.fr).	47
Figure 36 : or et métaux lourds concentrés à l'aide d'un couy.....	47
Figure 37 : photographie et schémas de principe du bol de Nelson	48
Figure 38 : Bol de Knelson, mise en œuvre et produit de sortie semi-affiné (J.L.Nagel).....	49
Figure 39 : photographie d'une table à secousses Géméni (https://www.911metallurgist.com/blog/gemini-gold-shaking-table#iLightbox[postimages]/0)	50
Figure 40 : photographie de détail des différents éléments d'une table à secousses Gemini. (a) réglage des flux d'eau de la table à secousses Gemini. (b) la table à secousses Gemini en production. (c) identification et réglage des secousses de la table Gemini (J.L.Nagel).....	50
Figure 41 : photographie d'une table à secousses Goldfield (J.L. Nagel).....	51

Figure 42 : photographie d'une table à vagues en fonctionnement (CMB)..... 51

Figure 43 : crible vibrant et 5 sluices avec récupération de l'or ici à droite(J.L. Nagel) 52

Figure 44 : spirale de Humphreys et son fonctionnement (P. Blazy, 1970 & <https://riosuerte>) .. 53

Figure 45 : jig Harz (à gauche), jig Bedelari (à droite) (P. Balzy, 1970)..... 53

Figure 46 : séparateur à bande (Source : <https://riosuerte>) 53

Figure 47 : fourchettes idéales d'utilisation de quelques concentrateurs (<https://riosuerte>) 54

Figure 48 : exemple de circuit de décantation de l'eau (ici à 5 bassins) (fond : CMB) 56

Figure 49 : schéma de traitement où débouillage et tri seraient assurés par un trommel-crible 59

Figure 50 : exemple d'équipement imposant pour le traitement de minerai aurifère, développé par MSI-MINING (source : <https://www.msi-mining.com/>). 61

Figure 51 : exemple d'unité de traitement d'un minerai à or et diamants utilisée dans une mine d'Amérique du Sud (source : <http://www.alluvialgoldmachine.com>, modifié) 62

Figure 52 : exemple d'unité de traitement d'un minerai aurifère utilisée en Asie et en Indonésie du Sud (source : <http://www.alluvialgoldmachine.com>, modifié). 63

Figure 53 : exemple de dispositif mobile facilement transportable et constitué d'un débouilleur + cribleur et d'une centrifugeuse. Le tout monté sur roues. 64

1. Introduction

En Guyane, après le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et Arianespace, l'exploitation aurifère constitue la seconde activité industrielle. De ce fait, elle est considérée régionalement et nationalement comme d'intérêt majeur pour le développement du territoire. Cette filière a commencé à se structurer en 2010 avec la création de plusieurs entités telle la grappe ORkidé (inter-professionnelle) ou le PTMG (Pôle Technique Minier de Guyane). La hausse des cours de l'or et les travaux réalisés par ces différentes structures ont largement contribué à l'affichage et la reconnaissance de la filière aurifère de Guyane. Ils ont permis de soulever de nombreux problèmes récurrents dans les procédés d'exploitation *s.l.* (prospection, extraction, remise en état des sites) ; problèmes qui parfois conduisent à la faillite des entreprises et à des passifs environnementaux. De plus, la grappe ORkidé et le PTMG ont aussi permis l'identification des artisans miniers légaux.

Aujourd'hui, s'il existe quelques entreprises de petite taille (PME) ayant des compétences reconnues dans l'exploration et l'exploitation de gisement d'or alluvionnaire, la plupart des sociétés déposant des demandes de titres miniers et notamment des Autorisations d'EXploitation (AEX) sont de très petites entreprises qui ne disposent pas toujours des compétences techniques et du savoir scientifique nécessaires pour assurer :

- une estimation fiable d'un gisement permettant sa rentabilité opérationnelle et la minimisation des risques financiers de l'exploitant et des investisseurs ;
- une exploitation minière responsable conduisant à la valorisation efficiente et optimisée de la ressource ainsi qu'à la limitation des impacts environnementaux ;
- une remise en état du site exploité comprenant la réhabilitation de l'environnement minier et la revégétalisation de la zone d'extraction ainsi que des résidus qu'elle a engendrés.

Dans ce cadre, cette étude est le second maillon (après l'étude publiée par le BRGM en 2017 ; Nagel *et al.*, 2017) d'une chaîne qui vise à fournir aux opérateurs artisans miniers, les connaissances techniques et pratiques qui leur permettront d'améliorer et de développer la filière artisanale aurifère en Guyane, mais aussi d'optimiser les techniques employées par l'ensemble des opérateurs.

Elle se structure comme suit :

- la première partie de ce rapport replace l'activité minière dans son cadre légal ;
- la seconde partie du rapport s'attache à présenter le contexte géologique général de la Guyane et son potentiel aurifère ;
- la troisième partie expose les différents problèmes techniques identifiés lors de plusieurs visites de sites en cours d'exploitation ;
- la quatrième partie présente, sur la base de la troisième partie, des recommandations visant soit à améliorer le système actuel en place, soit à envisager le remplacement en partie par des techniques et équipements plus performants et/ou moins impactant pour l'environnement.
- La cinquième partie présente, à titre de comparaison, des équipements alternatifs utilisés à travers le monde pour l'extraction aurifère.

2. Cadre légal et socio-économique de l'activité minière aurifère en Guyane

Cette partie est consacrée à la présentation des textes de loi et structures associatives ou professionnelles qui encadrent l'activité minière aurifère en Guyane. Cette partie introductive ne figurait pas dans les objectifs initiaux de l'étude, mais s'appuie sur les paragraphes empruntés au Tome 8 de la collection « la mine en France » intitulé « Exploration et exploitation minière en Guyane » paru en 2017. Pour de plus précises informations, il est vivement recommandé de consulter cet ouvrage.

2.1. CODE MINIER

L'application du code minier métropolitain a été étendue aux départements d'outre-mer à la fin des années 1990. Un régime particulier a été adopté par le législateur tenant compte des spécificités des exploitations aurifères artisanales en Guyane (Figure 1).

Ainsi, le code minier prévoit qu'en plus de la concession ou de l'exploitation par l'État, les mines (à l'exception des hydrocarbures liquides ou gazeux) puissent également être exploitées en vertu d'un titre minier dénommé « permis d'exploitation » ou d'une « autorisation d'exploitation ».

Le « permis d'exploitation » (PEX), est attribué par arrêté ministériel pour une durée maximale de 5 ans, renouvelable deux fois pour la même durée. La surface concernée est déterminée par l'acte accordant le permis.

Dans tous les cas, la délivrance d'un permis d'exploitation est subordonnée à la production d'une notice d'impact ou, en cas de dépôt conjoint de demande d'ouverture de travaux, d'une étude d'impact. Les permis d'exploitation étant des titres miniers, il est donc nécessaire avant de pouvoir entreprendre quelques travaux que ce soient, de procéder à une déclaration ou à une demande d'autorisation de travaux. Cette procédure peut être engagée simultanément à la demande de permis ou a posteriori. L'autorisation qui en découle prend la forme d'un arrêté préfectoral accompagné de prescriptions.

L'« autorisation d'exploitation » (AEX), est attribuée par le préfet, pour une durée maximale de 4 ans, renouvelable une fois pour la même durée, sur une superficie maximale de 1 kilomètre carré (km²). Sa caractéristique principale est d'être une autorisation de travaux, entrant par conséquent dans le champ de compétence du préfet et demandant le consentement préalable du propriétaire du sol. En Guyane, l'État étant gestionnaire d'une grande partie du territoire, il lui revient donc de délivrer des autorisations d'occupation temporaire du domaine public en plus des autorisations d'exploitation et des titres miniers.

Dans ce même cadre, l'autorisation de recherches minières (ARM), permet d'obtenir l'autorisation du propriétaire (État), représenté par l'Office National des Forêts, pour réaliser des travaux de recherche sous un simple régime déclaratif.

Les demandes de titres miniers et les autorisations de travaux sont soumises à l'avis consultatif de la commission départementale des mines regroupant notamment les associations de protection de l'environnement et les élus.

	ARM	AEX	PER	PEX	CONCESSION
SURFACE	1 à 3 km ²	1 km ² Sous forme de rectangle ou de carré	Libre	Libre	Libre
DURÉE	4 mois 1 demande par secteur, renouvelable une fois	4 ans max. Renouvelable une fois 3AEX simultanés max.	5 ans max. Renouvelable deux fois	5 ans max. Renouvelable deux fois	Max. 50 ans Renouvelable par tranche de 25 ans (expir. 2018 des titres historiques)
TYPES DE SOCIÉTÉS	Artisans / PME	Artisans / PME	PME / Multinationales	PME / Multinationales	PME / Multinationales

Figure 1 : synthèse des différents actes miniers et de leurs principales caractéristiques

Le projet de réforme engagé par le gouvernement en 2012 (Tome 2 - Législation et réglementation minière) ne prévoit pas de modifier sensiblement le régime minier applicable en Guyane.

Le projet de loi réajusterait les dispositions relatives aux autorisations d'exploitation. Ainsi, la superficie des autorisations d'exploitation serait réduite à 25 hectares (soit 0.25 km² au lieu de 1 kilomètre carré) et limitée aux seules substances alluvionnaires. La surface maximale retenue serait ainsi en deçà de celle qui requiert une évaluation systématique suivant la directive n°2011/92/UE du 13/12/2011 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.

Il est également prévu que la commission départementale des mines soit substituée au groupement participatif d'information et de concertation, lorsque la procédure renforcée de participation serait mise en œuvre. Un décret préciserait les modalités spécifiques d'organisation de la commission départementale des mines lorsqu'elle exercera les compétences du groupement participatif dans les processus d'instruction de titres miniers.

2.2. SCHEMA DEPARTEMENTAL D'ORIENTATION MINIERE (SDOM)

Le SDOM, adopté en décembre 2011 a pour objectif l'instauration d'une politique équilibrée permettant le développement économique par la mise en valeur de la ressource minière et garantissant le respect de l'environnement (Figure 2).

Les espaces constituant le territoire du département de la Guyane sont répartis en quatre zones dans lesquelles les possibilités de prospection et d'exploitation minières sont définies conformément à l'article L.621-1 du code minier. Le zonage prendra en compte la protection des milieux naturels sensibles, des paysages, des sites et des populations et la gestion équilibrée de l'espace et des ressources naturelles, compte tenu de l'intérêt économique de la Guyane et de la valorisation durable de ses ressources minières.

À chaque zone correspondent des règles qui s'appliquent sans préjudice des dispositions législatives et réglementaires relatives aux activités minières, y compris celles spécifiques à la Guyane.

Le zonage a été défini en croisant les enjeux humains et environnementaux et le potentiel en ressources minières. Il intègre ainsi une analyse des enjeux économiques, humains et environnementaux, bien que les prescriptions particulières destinées à la zone sous contraintes (zone 2) ne soient pas totalement explicitées. Des mesures particulières sont prises, mais concernent principalement l'exploitation aurifère alluvionnaire, comme les mesures visant la largeur maximale de dérivation des cours d'eau (7,5 m) ou encore le seuil de rejet de matières en suspension (teneur maximale 35 mg/L des rejets à l'exutoire).

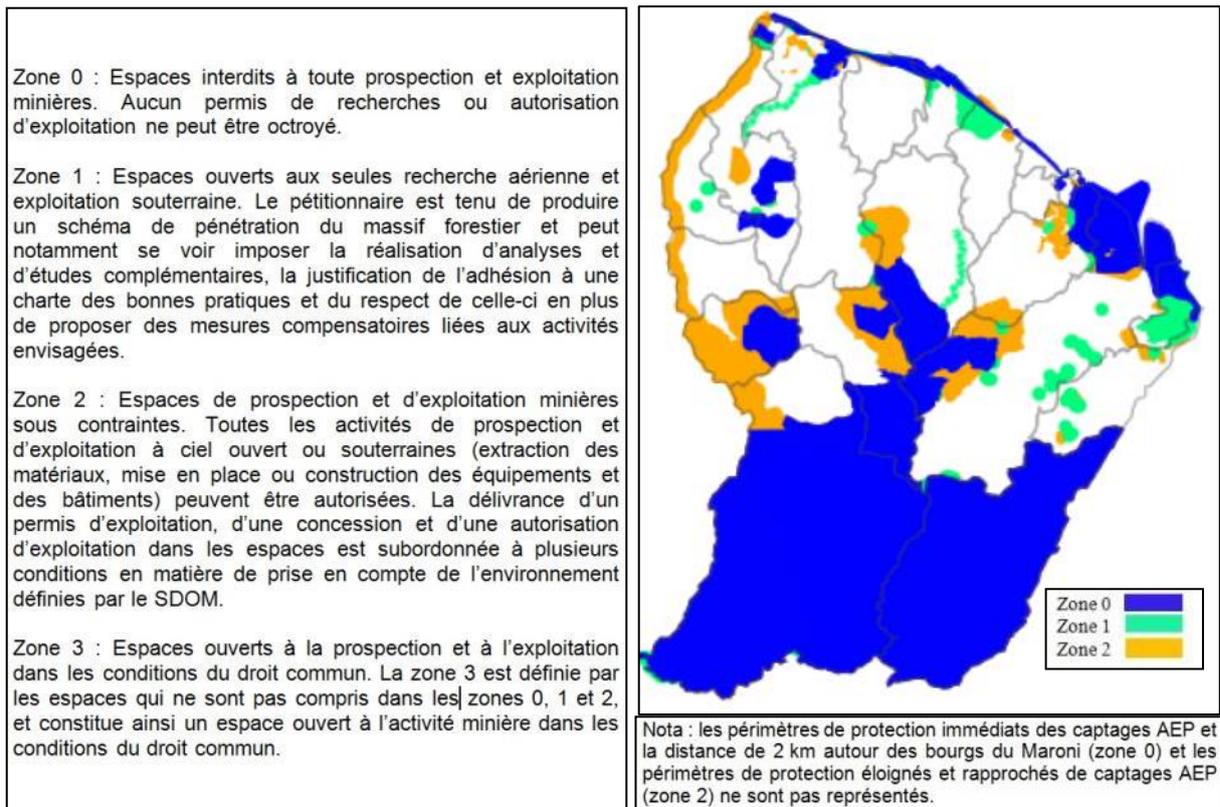


Figure 2 : schéma départemental d'orientation minière (SDOM, modifiée de <https://carto.geoquyane.fr/1/sdom.map>, mise à jour du 10/07/2017).

Tous les quatre ans au moins, la commission départementale élargie doit élaborer un rapport de bilan complet d'évaluation du SDOM. Il pourra proposer des mesures correctrices et des indications sur les modifications qui pourront être apportées au schéma à l'avenir.

2.3. GROUPE DE TRAVAIL EXPLOITATION ENVIRONNEMENT ZONAGE (GTEEZ)

Le GTEEZ a pour objectif d'étudier et de piloter la mise en œuvre de diverses actions en rapport avec l'activité aurifère pratiquée en Guyane. Ce groupe de travail piloté par la DEAL-Guyane regroupe des professionnels, les services de l'État, des bureaux d'études, des ONG et des associations environnementales. Ses activités sont pour le moment essentiellement tournées vers les techniques employées dans l'exploitation alluvionnaire. Les travaux récents visaient à

définir les modalités techniques d'application des prescriptions du SDOM (notice d'impact renforcée, limite des 7,5 m de largeur de cours d'eau, etc.)

2.4. FACTEURS LIMITANTS

2.4.1. Contraintes géographiques

La décision d'implantation artisanale aurifère tient largement compte du facteur d'accessibilité, éloignement et contrainte logistique étant des handicaps pesant fortement dans la faisabilité économique d'un projet. Le réseau routier se concentre sur la partie proche du littoral avec quelques pistes forestières s'engageant vers l'intérieur à partir de ce réseau ou des grands fleuves.

Le cours élevé de l'or autorise actuellement des coûts de production jamais envisagés par le passé, permettant un recours à l'héliportage ou l'ouverture de pistes d'accès. Il reste que l'accessibilité reste un facteur majeur pesant dans la décision d'entreprendre une prospection en secteur isolé.

La mise en œuvre d'une pelle mécanique en prospection ne peut se concevoir sans un accès terrestre existant ou à concevoir. Or, l'usage de cet outil pour la prospection ne justifie pas cet investissement, la démonstration du potentiel économique n'étant pas faite. Son usage reste donc dépendant du réseau d'accès existant.

2.4.2. Contraintes climatiques et saisonnières

La saison des pluies n'est évidemment pas la meilleure période pour ouvrir des pistes, déplacer des engins de chantier lourds sur des layons de bordure de criques, ouvrir des puits à la pelle ou manuellement au risque d'inondation de l'ouvrage. Cependant les contraintes de temps incitent les opérateurs miniers à ne pas différer le dépôt de leur dossier et bien souvent le chronogramme prévaut sur la contrainte climatique. En saison humide, une campagne de prospection par tarières sera plus facilement réalisée qu'une prospection par puits à la pelle mécanique lourde.

3. Contexte géologique et potentiel aurifère

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE GUYANE

Le bouclier guyanais est organisé selon le modèle classique des grands boucliers précambriens où alternent des ceintures de roches vertes d'origine volcano-sédimentaire et des complexes granitiques parfois déformés et métamorphisés (granitoïdes *s.l.*, gneiss et migmatites).

En Guyane, les formations géologiques du socle (Figure 3) sont principalement datées du Protérozoïque inférieur (2.5 à 1.6 Ga¹) et se répartissent en quatre grands ensembles :

- la ceinture de roches vertes : elle comprend deux formations principales qui sont la Formation de Paramaca et la Formation d'Armina. Ces deux formations se distinguent l'une de l'autre par la nature des roches qui les compose. En effet, la Formation de Paramaca est principalement constituée de termes volcaniques (c.-à-d. des laves) métamorphisés (métabasaltes, méta-andésites, méta-dacites, voire méta-rhyolites) alors que la Formation d'Armina comprend principalement des termes volcano-sédimentaires et sédimentaires (c.-à-d. un mélange de cendres et de laves) métamorphisés (métapelites et méta-greywackes) ;
- les complexes granitoïdiques *s.l.* : trois grands complexes sont reconnus en Guyane. Le premier (Complexe migmatitisé de Laussat et de Tamouri, 2.18-2.16 Ga) est exposé au nord et au sud de la Guyane. Le second (Complexe central de TTG², 2.15-2.13 Ga) est principalement exposé au centre de la Guyane, entre la Formation de Paramaca et la Formation d'Armina. Enfin, le troisième (Complexe de Saint-Georges-de-l'Oyapock, 2.11-2.08 Ga) occupe les extrémités sud et nord-ouest du département ;
- l'unité détritique de Rosebel-Bonidoro : elle affleure au nord de la Guyane et est principalement constituée de quartzite et de grès interstratifiés de niveaux pélitiques. À sa base, cette unité comprend localement des niveaux conglomératiques ;
- les filons basiques : ils recourent l'ensemble des unités du socle et trois séries peuvent être distinguées. La première série (série d'Apatoes ; 198-189 Ma³) affleure à l'est de la Guyane et tout le long du littoral. Elle est constituée de filons et de sills basaltiques qui sont orientés soit selon un axe nord-nord-ouest – sud sud-est, soit selon un axe nord-ouest – sud-est. La deuxième série (série de Tampok ; 808 Ma) apparaît principalement dans le quart sud-ouest du département où elle forme une série de filons alignés selon un axe nord-ouest – sud-est. Cette série est principalement constituée de microgabbros. Enfin, la troisième série (série de la Comté ; 1800-1900 Ma) affleure dans la partie centrale de la Guyane où elle forme une série de filons orientée nord nord-est – sud sud-ouest. Elle est principalement constituée de microgabbro.

En plus de ces formations du socle, la Guyane expose aussi des formations sédimentaires qui peuvent être classées en deux grands ensembles :

- les formations de la couverture sédimentaire : elles affleurent uniquement dans la partie septentrionale de la Guyane où elles sont posées en discordance sur les unités

¹ Ga = Milliards d'années

² TTG = Tonalite–trondhjemite–granodiorite

³ Ma = Million d'années

du socle. Elles correspondent principalement à des formations (Formation de Démérara, Formation de Coswine) d'âge quaternaire qui sont principalement constituées de sables, de limons et d'argiles d'origine fluvio-marine ;

- les formations superficielles : elles affleurent dans toute la Guyane et correspondent aux produits de démantèlement des unités du socle et de la couverture sédimentaire. Elles sont principalement constituées d'éluvions, de colluvions et d'alluvions. Le lecteur notera donc que les principaux gisements d'or qui font l'objet de ce rapport appartiennent à ces formations superficielles.

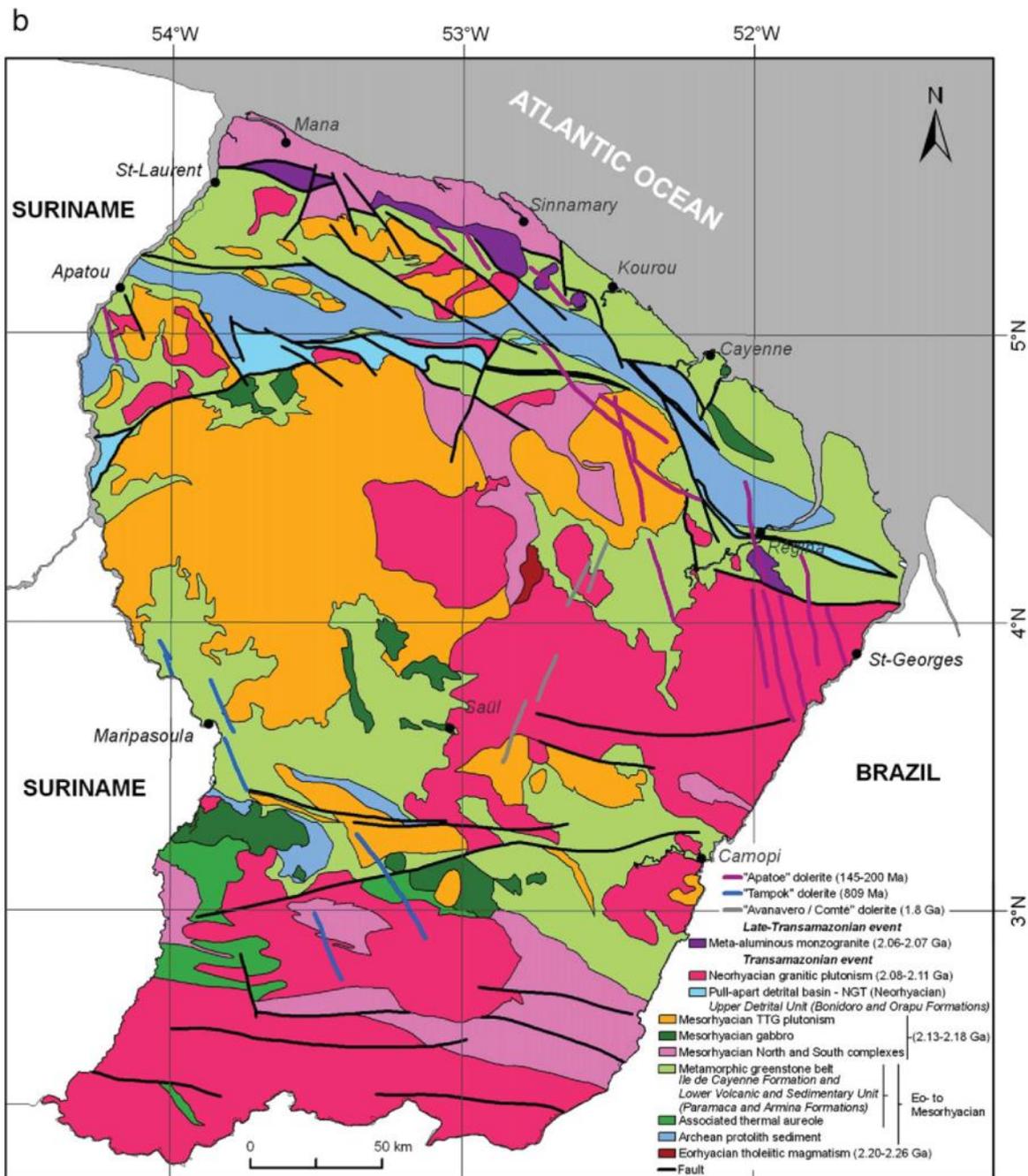


Figure 3 : Carte géologique simplifiée présentant les principales unités géologiques s.l. de Guyane. D'après Cassard et al. (2008).

3.2. POTENTIEL MINIER AURIFERE EN GUYANE

La connaissance du potentiel minier en Guyane (Figure 4 ; Figure 5 ; Figure 6 ; Figure 7) s'est considérablement développée avec les prospections et cartographies géologiques et minières réalisées dans les années 1950, complétées par l'Inventaire minier de la Guyane réalisé durant 20 années par le BRGM entre 1975 et 1995, comprenant des campagnes d'échantillonnage et d'analyses géochimiques.

Deux principales méthodes de prospection au sol ont été utilisées :

- une grande reconnaissance pour la cartographie géologique avec le prélèvement systématique de sédiments de ruisseau (drains courts) : méthode utilisée principalement au sud du parallèle 3° 30' ; la densité de prélèvements y est variable, en moyenne de 1 échantillon pour 5 km², donnant une "couverture" de l'ensemble des bassins assez importante (itinéraires espacés de 5 km en moyenne suivant les grandes rivières) ; la prospection a été faite également par batée sur une grande partie de cette zone.
- sur les formations géologiques favorables au point de vue potentialité minérale, en prospection géochimique par layons rectilignes avec prélèvement de sols à maille régulière (de l'ordre de 2000 m x 500 m, avec resserrements éventuels) ; la densité d'échantillonnage varie de 1 échantillon par km² pour l'essentiel des zones couvertes, à 8 échantillons par km² après resserrement sur des secteurs privilégiés ; des sédiments étaient également prélevés au croisement des layons avec les ruisseaux ou petites rivières ;
- la prospection géochimique par layons rectilignes avec prélèvement de sols est critiquable car la représentativité analytique d'un sol est très localisée et donc a pu laisser dans l'ombre des zones minéralisées importantes ; l'analyse systématique de sédiments au passage (fréquent) des ruisseaux a cependant compensé en partie ce défaut de représentativité des sols.

Ensuite, des grilles pour l'analyse géochimique en sols systématique dans les zones reconnues porteuses d'indices ont été développées. Cet inventaire a été complété par des levés géophysiques (levés aéromagnétique et radiométrique en 1996), et des travaux de développement ciblés (tarières, tranchées, sondages) sur des zones d'intérêt dans le cadre de l'inventaire minier.

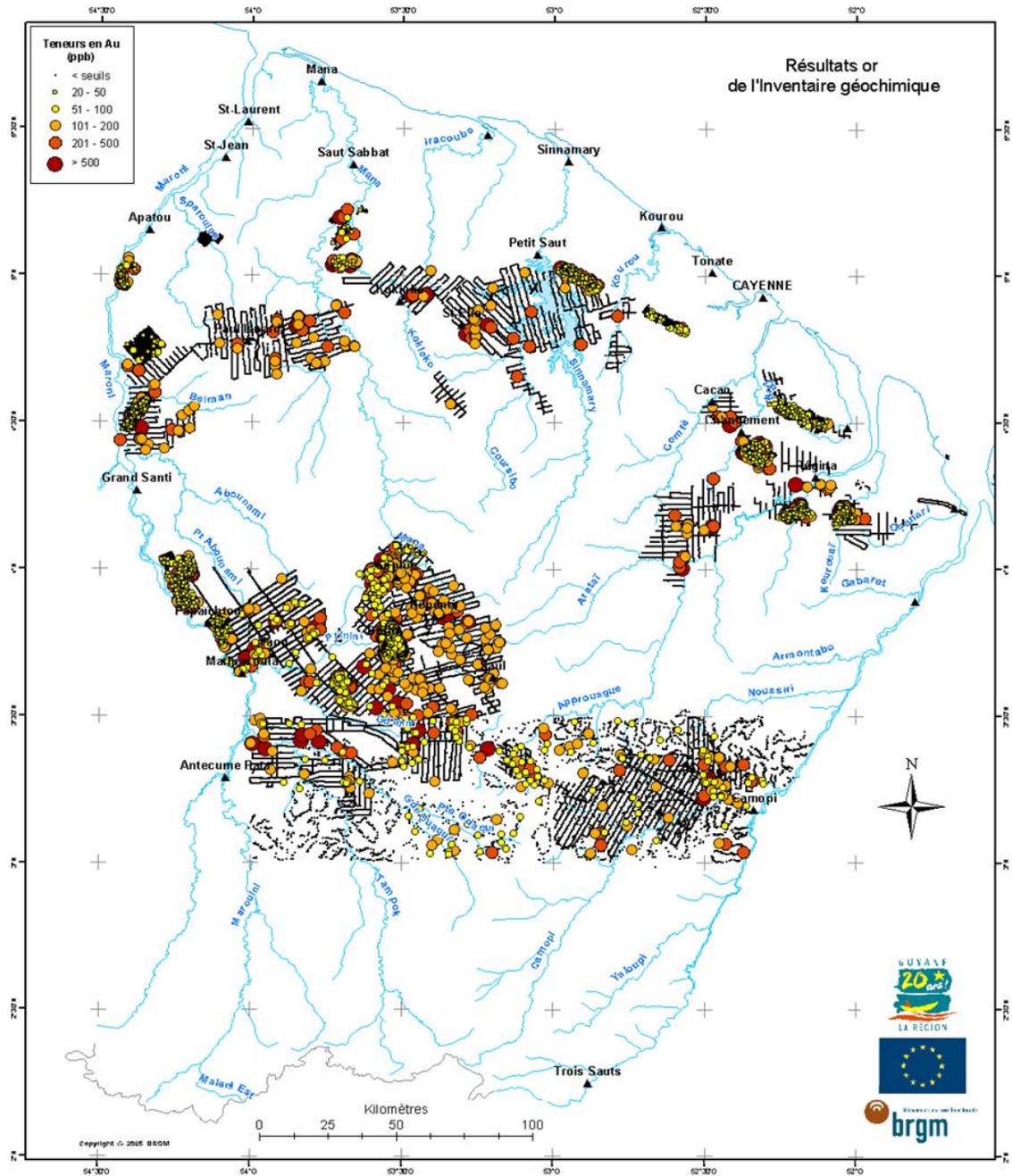


Figure 4 : Carte des prospections de l'Inventaire minier et ses découvertes aurifères modifié de Nagel J.-L., et al. 1996.

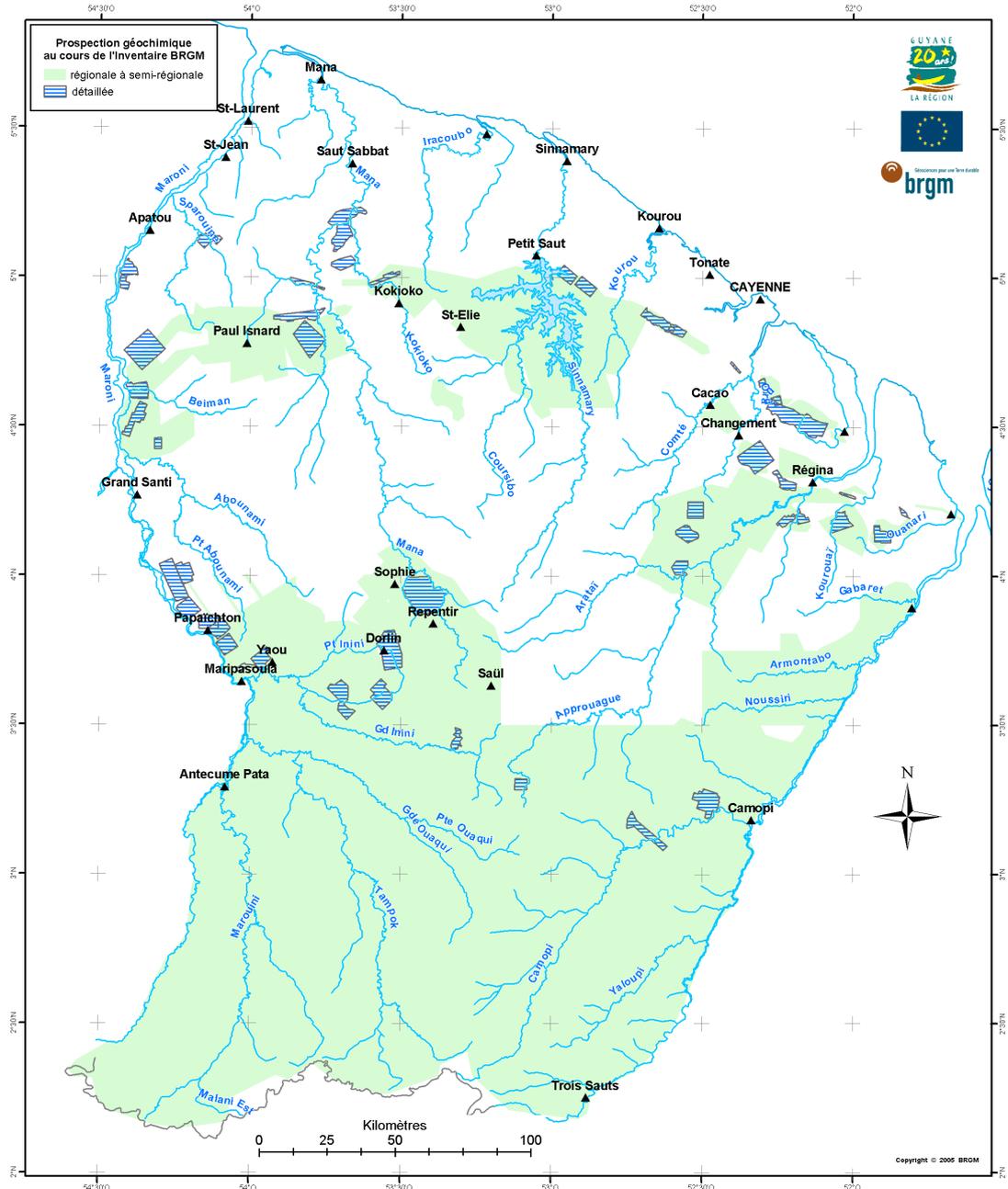


Figure 5 : Carte des secteurs couverts par les prospections ciblées en sol de l'Inventaire minier modifiée de Nagel J.-L., 1996.

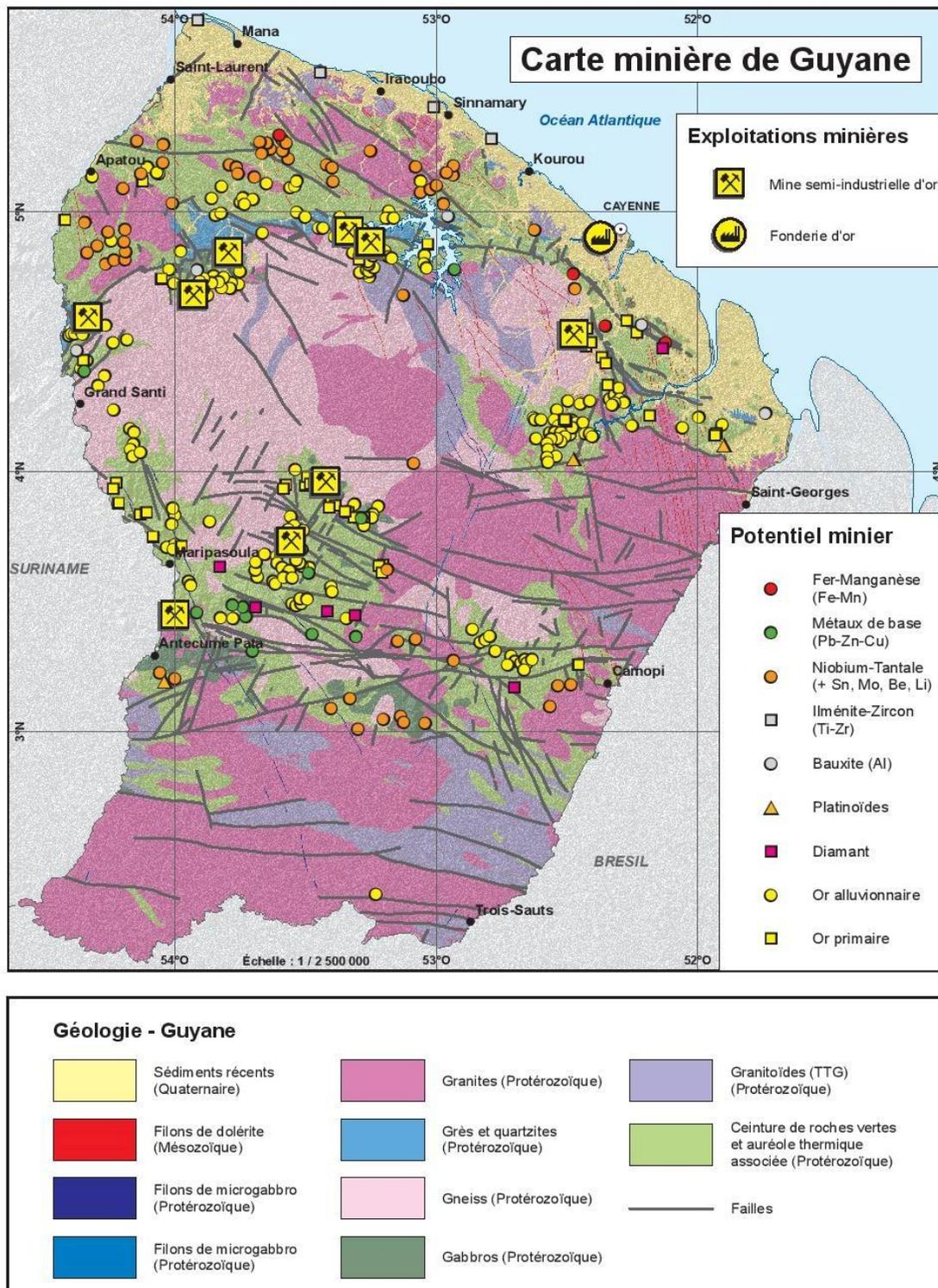
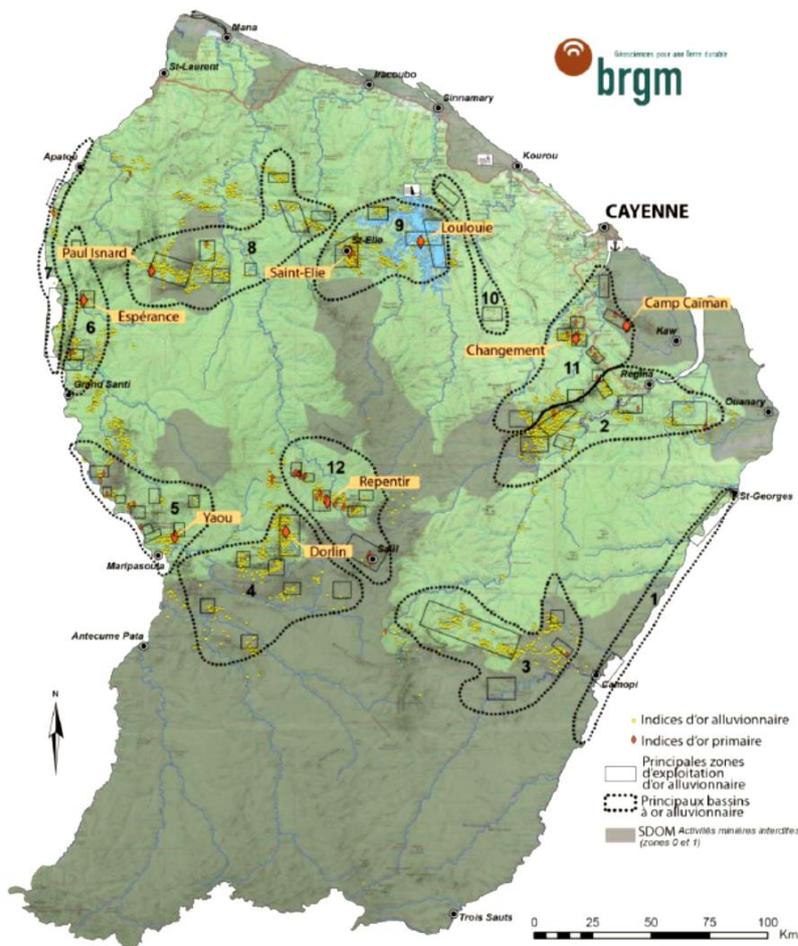


Figure 6 : Carte des indices aurifères de Guyane sur fond géologique modifiée de Colin, S. 2017.



DOTATION & DISTRICTS MAJEURS

- **Indices d'or primaire** : Paul Isnard, Repentir, Camp Caïman, Espérance, Yaou, Dorlin, Loulouie, Saint-Elie, Changement

- **Indices d'or alluvionnaire**

- **SDOM : Activités minières interdites**

Figure 7 : Carte des principaux districts aurifères de Guyane modifiée de Nagel J.-L. et al. 1995

La région guyanaise et plus largement l'ensemble du bouclier guyanais possèdent un fort potentiel aurifère en raison de leur parenté et de leur continuité avec le bouclier ouest-africain au sein duquel de nombreux gisements sont connus (Figure 8). Plus localement, cet intérêt est confirmé par des découvertes et mises en production telles celles des gisements d'Omaï au Guyana, de Las Cristinas au Venezuela, de Gross Rosebel au Suriname (Figure 8) ; gisements qui ont suscité un intérêt et continuent d'attirer des explorateurs et investisseurs miniers étrangers pour la Guyane.

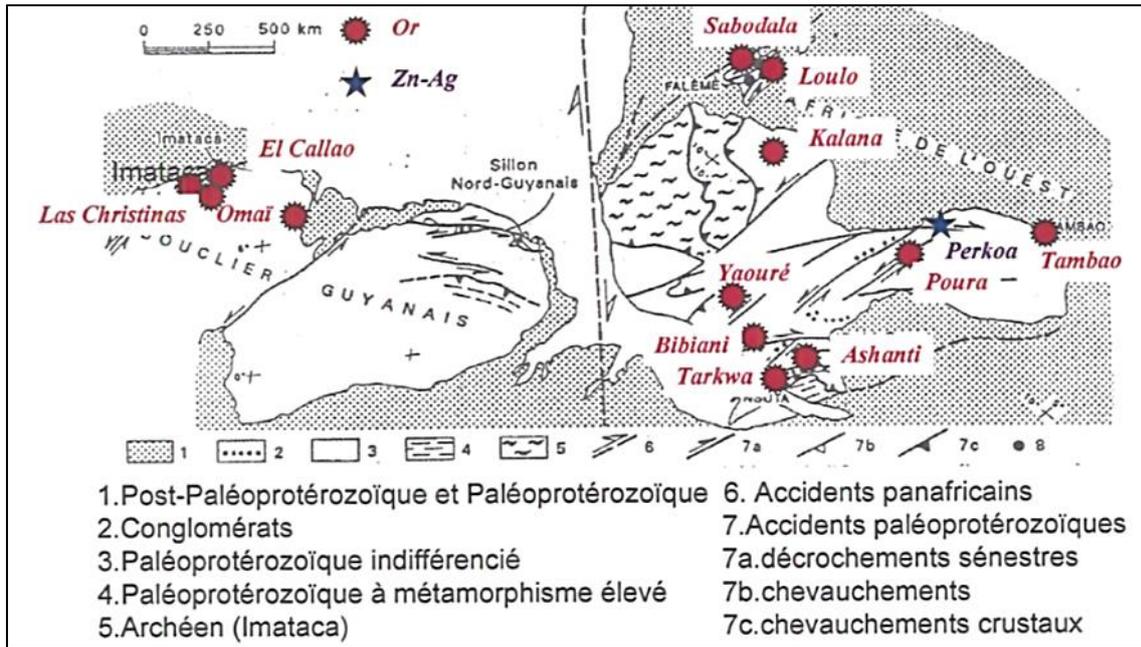


Figure 8 : Assemblage du bouclier guyano-africain reconstitué et ses principaux gisements d'or du Protérozoïque. D'après Nagel J.-L., 1996

Le Bouclier afro-guyanais comporte différents types de gisements aurifères primaires et secondaires :

- les gisements primaires en roche :
 - tourmalinisés de Loulo (Mali) ou Dorlin (Guyane du sud) ;
 - conglomératiques de Tarkwa (Ghana) ou Sillon (nord-guyanais) ;
 - de type zone de cisaillement de la Gold-Coast (Ghana) ou Espérance (Guyane) ;
- les gisements dérivés par altération des types précédents (éluvionnaires ou latéritiques) ;
- les gisements alluvionnaires, en aval des dépôts primaires et éluvionnaires.

Depuis la découverte de l'or en Guyane en 1857, environ 95 % de la production recensée a été produit à partir des gisements secondaires alluvionnaires et, dans une moindre mesure, éluvionnaires.

On estime que le stock d'or alluvionnaire et éluvionnaire récupérable par gravimétrie est déjà largement entamé ; la recherche de teneurs de coupures plus basses est encore favorisée par le cours particulièrement élevé de l'or. Par conséquent, ce sont les gisements primaires qui constituent la seconde étape et l'avenir aurifère économique de la Guyane. La mise en exploitation des gisements primaires (Yaou, Repentir, Montagne Tortue, Paul Isnard, Dorlin, Saint-Elie, etc.) est un enjeu majeur qui nécessite une forte capacité industrielle. L'extraction significative de l'or primaire n'est à la portée que des grands opérateurs miniers, car elle exige d'autres technologies et des investissements beaucoup plus importants que ceux mobilisés par l'artisanat aurifère local.

4. L'exploitation de l'or en Guyane : constat et recommandation

1. PREAMBULE

Aucune des exploitations aurifères alluvionnaires en Guyane, historiques ou actuelles, n'est parvenue, en premier passage, à épuiser l'intégralité de l'or contenu dans un flat. La méthode d'exploitation, bien souvent rudimentaire (laveries simples et courtes), ne permet pas une récupération supérieure à 40% de l'or contenu. Le prix actuel de l'or, très élevé, ouvre la faisabilité à de nombreuses criques réputées pauvres à l'époque des accords de Brenton Woods (35 \$/once sur une longue période après 1944) et conduit à reconsidérer les placers anciennement exploités et encore suffisamment minéralisés pour y justifier d'une repasse (1200-1300 \$/once actuellement).

L'exploitation aurifère alluviale en Guyane relève de l'artisanat et plus rarement de la petite mine. Les moyens techniques y étant simples, parfois rudimentaires, mais dans la plupart des cas susceptibles d'améliorations. Il est devenu d'autant plus nécessaire d'améliorer cet outil depuis que la loi de 2006 a interdit l'usage du mercure et qu'ainsi la fraction de minerai inférieure à 100 µm contient l'or fin n'est plus récupéré par le procédé à amalgamation.

Ce chapitre, qui constitue le cœur de cette étude, s'attarde sur des constats qui ont été effectués au cours de l'année 2017 lors des neuf visites sur le terrain. A partir de ces constats, une analyse critique, sur laquelle des recommandations sont proposées, a été réalisée. Il est évident que les techniques proposées en amélioration ou en alternative ne sont pas les techniques les plus performantes d'aujourd'hui. Cependant, il est apparu nécessaire de ne recommander que des améliorations qui paraissent réalistes aux regards, à la fois du contexte Guyanais, mais aussi à celui de la faisabilité technique et financière pour les exploitants.

A noter aussi que les illustrations photographiques et exemples de procédés, pour des raisons de discrétion, ne seront pas localisées, les chantiers visités ne seront pas nommés.

2. LE PLAN D'EXPLOITATION DU FLAT

4.1.1. Constat

Avant même d'entamer la réflexion sur les techniques d'exploitation de l'or en Guyane, il est important de préciser « l'état d'esprit » avec lequel certains exploitants abordent la phase d'exploitation, c'est-à-dire celle qui succède à la phase d'exploration et qui devrait se baser sur les résultats de celle-ci. Dans ce cadre, il est important de souligner les points suivants :

- la prospection, parfois considérée comme une contrainte préliminaire (légale ou non selon les exigences d'octroi des AEX en application des règles liées au SDOM), n'est pas toujours prise en compte pour bâtir le plan d'exploitation ;
- il n'est pas rare de constater que des exploitants ne tiennent aucun compte des conclusions apportées par la prospection et dans la réalité exploitent la totalité du flat ;

- la prospection, telle qu'elle est organisée, est trop fréquemment conduite de façon légère, à une maille large ne renseignant pas sur le potentiel de zones du flat dont la minéralisation n'a, de ce fait, pas encore été localisée ;
- même conduite dans les règles de l'art et à une maille suffisamment restreinte, la prospection s'oppose à l'idée bien enracinée qu'il puisse exister, entre les points de prélèvement, une concentration hors norme hypothétique (le « Pactole ») que l'on regrettera longtemps d'avoir laissé de côté (marmite, piège local, etc.).

Cette manière de fonctionner a des conséquences sur la rentabilité de l'exploitation qui, rappelons-le, est obtenue uniquement si toutes les phases (prospection-exploitation-réhabilitation) sont optimisées. En effet, traiter de façon identique les zones minéralisées (au-dessus du seuil de rentabilité) et les zones moins intéressantes conduit à :

- diluer la rentabilité par augmentation inutile des volumes excavés et lavés ;
- augmenter inutilement les consommables et les heures travaillées ;
- engendrer des coûts supplémentaires pour réhabiliter une surface inutilement perturbée par l'exploitation de zones non rentables.

4.1.2. Recommandations

Pour remédier à cela, il nous semble important d'insister à nouveau sur la nécessité de disposer d'une phase d'exploration/prospection correctement réalisée à une maille ne laissant aucun doute sur la stérilité ou la faible rentabilité de certaines zones du flat. Dans ce cadre, les bureaux d'étude et de conseils pourraient contribuer à crédibiliser les conclusions d'une prospection bien conduite afin de faire de l'opération aurifère un projet réaliste et industriel débarrassé de ses mythes.

3. LA SEPARATION DU MINERAI AURIFERE

La constitution des flats guyanais est relativement uniforme dans l'organisation des couches lithologiques successives, mais varie dans les épaisseurs relatives des couches, dans la teneur en gros blocs à la base du flat, dans la charge en matière organique des graviers, ainsi que dans la nature du bed-rock altéré (argiles grises, argiles kaoliniques blanches, altérites rocheuses ferruginisées rouge-orangé). La coupe verticale d'un placer vierge comprend du toit au mur (Figure 9):

- une fine couche végétale de 5 à 15 cm ;
- une couche argilo-silteuse, brune à jaunâtre, stérile en couverture ;
- une couche aurifère de graviers de granulométrie hétérogène;
- un bed-rock altéré plus ou moins argileux et minéralisé en or dans sa tranche supérieure (15 à 20 cm).



Figure 9 :Front de taille d'un flat aurifère, décapage du stérile et extraction du gravier minéralisé, façonnage de la digue (J.L.Nagel).



Figure 10 :Coupe d'un autre flat minéralisé sur base kaolinique (J.L.Nagel).



Figure 11 : L'argile du bed-rock montre souvent des structures rocheuses héritées encore discernables (J.L.Nagel).

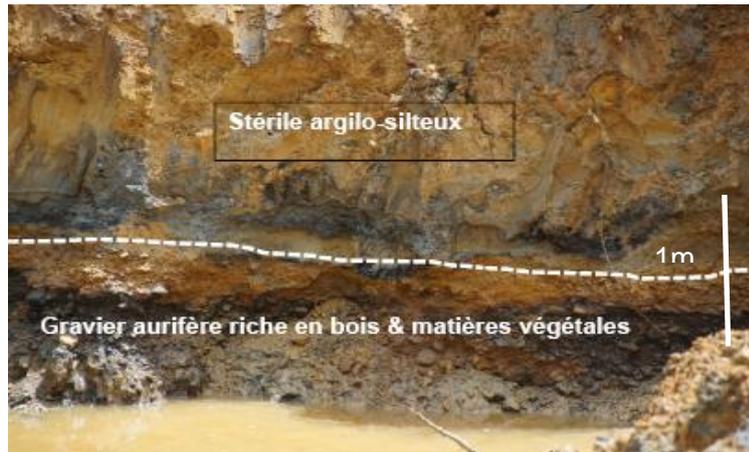


Figure 12 : exemple d'interface entre la couverture argilo-silteuse stérile et le niveau de gravier minéralisé très riche en débris végétaux (J.L. Nagel).



Figure 13 : Contact du gravier minéralisé avec le toit du bed-rock kaolinique blanchâtre (J.L.Nagel).



Figure 14 : Cas d'un minerais hétérogène (stérile et gravier aurifères mélangés), chantier de reprise d'anciens travaux (J.L. Nagel).

4.1.3. Constats

Les observations ont clairement montré que la couverture argilo-silteuse est trop pauvre en or pour être exploitée. Par contre, la couche de gravier et le niveau d'argiles de la lithomarge, en contact direct avec le bed-rock, doivent être récupérés et lavés. L'extraction sélective de ces deux niveaux aurifères s'avère complexe avec les engins utilisés et nécessite une grande dextérité des opérateurs qui y parviennent rarement. L'emploi de pelles mécaniques est en effet moins précis qu'un décapage avec une lame et l'utilisation de bulldozers reste peu courante en alluvionnaire. Ceci conduit généralement à un mélange stérile avec le gravier aurifère ou l'argile au toit du bed-rock altéré est trop ou insuffisamment attaquée (puissance minéralisée : 15 à 20 cm).

4.1.4. Conséquences

Une augmentation de la part d'argiles dans le produit apporté à la laverie complique et ralentit considérablement la phase de débouillage réalisée avec des lances Monitor. Ce problème s'accroît d'autant plus dans le cas des laveries rudimentaires, où le débouillage demeure généralement imparfaitement réalisé, car l'augmentation de la teneur en argiles augmente de facto la quantité de boulettes argileuses qu'il faut casser pour libérer l'or, auquel cas par voie de conséquence, les particules d'or piégées par agglomération à l'argile sont directement entraînées dans les rejets de débouillage.

4.1.5. Recommandations

Dans ce cadre, il nous semble important que les opérateurs soient attentifs aux points suivants :

- soigner la séparation de la couche argilo-silteuse stérile,
- récupérer la totalité du gravier,
- n'engager que la faible tranche d'argile minéralisée du bed-rock (parfois très riche !),
- améliorer la capacité de débouillage des laveries (voir plus loin).

4. LE SYSTEME DE LAVAGE CLASSIQUEMENT UTILISE EN GUYANE

4.1.6. Description du système classique

La grande majorité des mines alluvionnaires de Guyane utilise un système de traitement du minerai comparable. Ce système est schématisé sur la Figure 15. Il est constitué de 3 unités principales qui sont :

- l'unité de débouillage
- l'unité de criblage (grizzly)
- l'unité de piégeage de l'or (tables à moquette sous sluices).

Les parties suivantes présentent une analyse critique de ces trois unités successives.

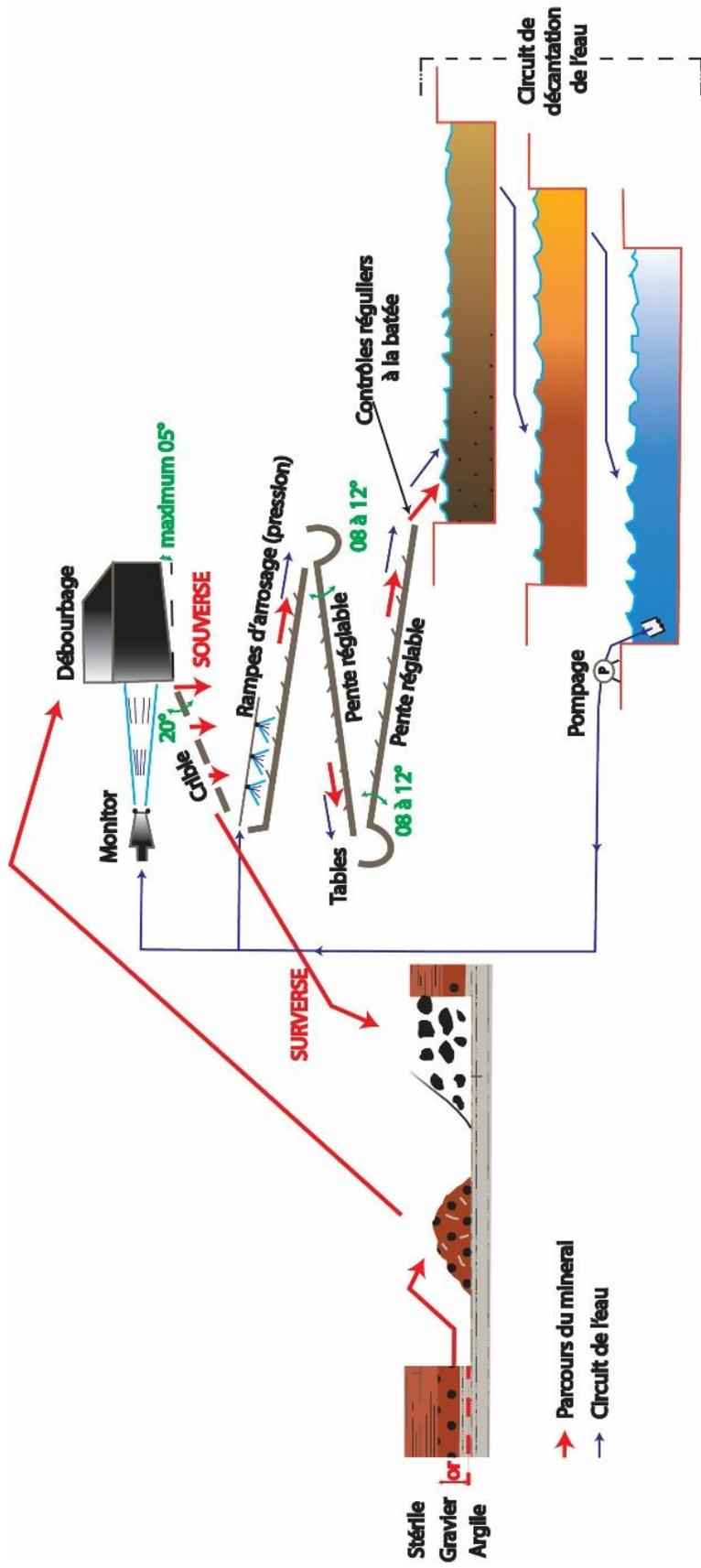


Figure 15 : schéma d'exploitation type d'un placer ; circuit de l'eau et de l'or (J.L. Nagel, E. Fournier).

4.1.7. Analyse critique de l'unité de débouage

L'unité de débouage est constituée généralement de deux sous-unités : les lances Monitor et la caisse de débouage. Cette unité a pour principal but de liquéfier la partie argilo-sableuse du minerai à laquelle sont associées les particules d'or (Figure 16).



Figure 16 : photographies montrant le débouage du minerai aurifère à l'aide des lances Monitor à haute pression (J.L. Nagel). (a) lances Monitor avec 2 opérateurs, (b) gravier minéralisé en cours de liquéfaction dans la caisse de débouage, (c) vue d'ensemble du poste de lances Monitor.

a) Constats

Dans les exploitations visitées, le poste des jets Monitor peut être solidaire du châssis de la laverie ou dissocié. Au cours des visites de terrain, nous avons observé deux dispositifs de débouage. Dans certains cas, il existe des plateformes de débouage dédiées à cette phase (Figure 17 a) et dans d'autres cas, le minerai est directement chargé sur le crible en pente où s'opère le débouage (Figure 17 b).



Figure 17 : modèles de laverie classiquement rencontrés dans les exploitations d'or alluvionnaire en Guyane française. (a) modèle relativement élaboré avec un poste de lance Monitor fixé à la laverie. A noter que des améliorations de ce modèle sont souhaitables. (b) Modèle rudimentaire avec un poste de lance Monitor non fixé à la laverie. Ce modèle est à proscrire, car il engendre des pertes importantes de minerai.

Dans le premier cas, où le poste est solidaire au châssis, nous avons constaté que la caisse de débouage est souvent trop courte pour que puisse s'y réaliser une liquéfaction suffisante du produit argileux. De ce fait, des boulettes d'argile sont transportées jusque sur les tables de tri. De plus, la hauteur des bords de cette zone de lavage sous pression est aussi insuffisante ; ce qui facilite l'éjection de boulettes d'argile (Figure 18) et engendre une perte importante de minerai sous l'action des jets d'eau. Enfin, la caisse présente souvent des bords évasés vers le haut, ce qui contribue également à aux pertes en minerai par éjection (Figure 18). Cette unité est donc perfectible en adaptant la taille et la forme de la caisse de débouage pour éviter ou minimiser les éjections.

Dans le second cas, où les lances sont indépendantes du châssis, nous avons constaté deux faits qui nous amène à fortement déconseiller, voire à proscrire ce type d'installation :

- d'une part la pente forte du dispositif (10 à 20°) ne permet pas un temps de débouage suffisamment long pour être efficace, des boulettes d'argiles passent rapidement au travers du crible avant d'avoir été liquéfiées ; d'autres, plus grosses, quittent le système vers la surverse avec les blocs ;
- d'autre part, dans cette configuration, l'opérateur tente de ralentir l'entraînement du minerai en utilisant la puissance du jet Monitor pour freiner son trajet vers la sortie de surverse, ce qui contribue alors à l'éjection d'une partie du minerai vers l'extérieur du bac de débouage (pertes importantes).



Figure 18 : photographies montrant les boulettes d'argile ejectées lors de la phase de débourage.

Enfin, au niveau de la surverse de gravier, nous avons souvent constaté un problème d'efficacité du lavage. Là encore, une perte non négligeable de minerai peut être attendue.

b) Recommandations

Il nous semble primordiale que les unités de traitement du minerai soient équipées d'une plateforme de débourage. Nous préconisons qu'elle ait les caractéristiques suivantes :

- une hauteur suffisante (1,50 m)
- des parois verticales ;
- une pente de plancher très faible (5 à 7°) ;
- un garnissage de plaques horizontales sur les flancs favorise la brisure des mottes argileuses tout en limitant l'éjection sous la pression des jets Monitor ;
- la fermeture partielle de l'entrée d'alimentation au moyen de bandes caoutchoutées (possiblement récupérables d'anciennes bandes transporteuses), vissées sur le haut des parois et convergentes pour assurer une fermeture partielle, tout en ménageant un passage minimal pour le godet de la pelle chargeuse asservie.

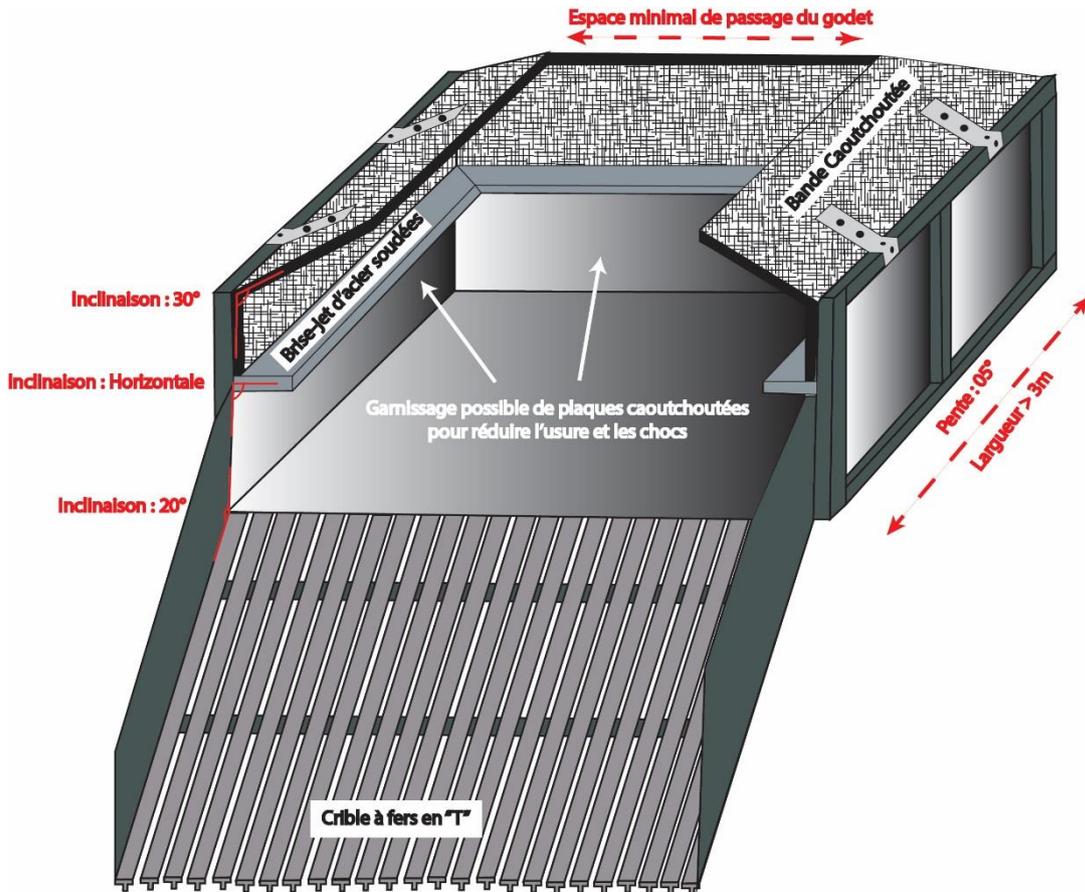


Figure 19 : schéma proposé illustrant une caisse de débouillage plus conservatrice et plus efficace (J.L. Nagel, E.Fournier).

c) Alternatives envisageables : l'utilisation de la pompe à graviers

Ce système utilise une laverie (sluices) alimentée en minerai par une pompe à graviers (Figure 21 et Figure 22). Il est schématisé sur Figure 20. A la différence du système classiquement précédemment décrit, le débouillage par jets Monitor se pratique sur le fond argileux du bassin exploité (Figure 23 a) où le minerai (graviers + couche d'argile de la lithomarge sous-jacente) est mis en tas et lavé (Figure 23 b), les plus gros blocs rocheux étant retirés (action manuelle et pelle mécanique). Cette technique implique 1 à 2 opérateurs de jets, un opérateur pour piloter l'extraction du minerai à la pelle mécanique, constituer les tas, participer à leur brassage et au retrait des très gros blocs. Les jets Monitor débouillent en partie le minerai qui s'écoule ensuite naturellement en suivant un chenal (Figure 23 c) creusé dans l'argile (bed-rock) jusqu'à une cuvette située plus en aval ; la partie de minerai éjecté des tas retombe dans le système et rejoint aussi la cuvette. Ensuite, une pompe à graviers récupère la pulpe minéralisée de la cuvette pour l'envoyer en amont de la laverie (Figure 23 d) ; dans le même temps 1 à 2 agents retirent les blocs dont la taille dépasse la capacité de la pompe (Figure 23 d). A noter qu'une lance Monitor peut aussi être active au niveau de cette cuvette. Une fois pompée, la pulpe arrive en amont de la laverie sous pression, dans une caisse étanche où elle subit un débouillage complémentaire sans perte ; elle suit ensuite le trajet habituel sur des sluices larges (unité de piégeage) équipés de moquette et de fer déployé (aucun agent permanent nécessaire à ce poste).

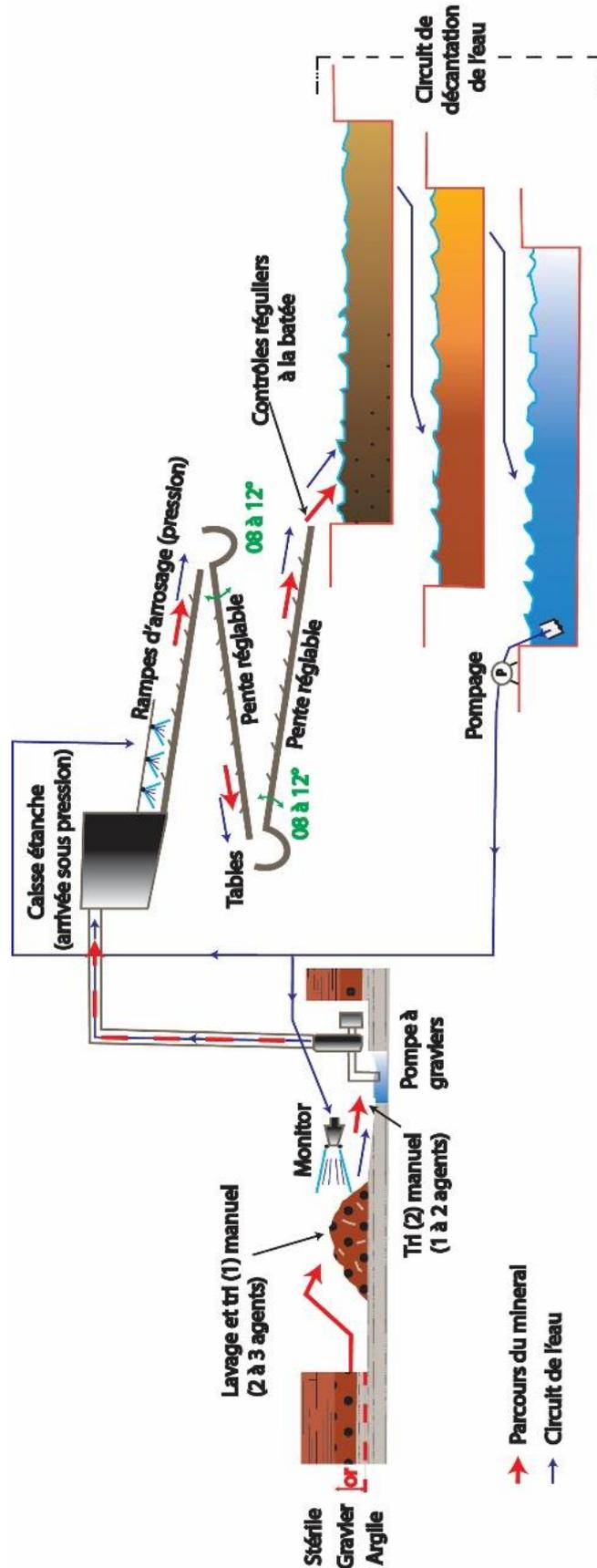


Figure 20 : schéma d'exploitation incluant une pompe à graviers (J.L. Nagel, E. Fournier)



Figure 21 : la pompe à graviers 6 pouces (J.L. Nagel).



Figure 22 : corps de pompe et rotor (J.L. Nagel).



Figure 23 : photographie des différentes étapes de fonctionnement d'un système de débouage associé à une pompe à graviers. (a) façonnage du canal collecteur des graviers lavés dans le bed-rock argileux. (b) débouage du minéral par jets Monitor et brassage du tas. (c) la pulpe minéralisée s'écoule vers la pompe à graviers, et l'élimination des galets est manuelle. (d) cuvette d'alimentation de la pompe et personnels en régulation de flux.



Figure 24 : photographies de l'unité de lavage avec une pompe à graviers. (a) parcours de la pulpe du chenal argileux vers la laverie. (b) la laverie, alimentation et concentrateurs. (c) la caisse étanche de réception de la pulpe. (d) les trois étages de la laverie avec pentes réglables (J.L. Nagel).

L'utilisation du système avec une pompe à graviers présente des avantages certains et permet une perte limitée d'or. En effet, le débouillage initial, réalisé au niveau du tas par jets Monitor, se poursuit lors du passage dans la pompe à graviers, dans la tuyauterie (6 pouces), puis dans la caisse étanche de la laverie. De ce fait, la liquéfaction de l'argile est nettement supérieure à celle réalisée par débouillage classique (voir partie 4.1.6) lorsque le minerai arrive sur le crible. De plus, l'étanchéité de la caisse limite considérablement l'éjection de boulettes d'argile et la perte d'or associé. Par ailleurs, une seule pelle mécanique peut suffire car la pelle asservie à la laverie devient inutile. Néanmoins, la pompe à graviers s'use (durée de vie du rotor : 200 h ; durée de vie du stator : 900 h), les tuyaux également, et ce coût (rotor : 6 000 € ; stator : 6 000 €) est à prendre en compte dans la faisabilité. *A priori*, ce coût nous semble largement compensé par l'absence d'une deuxième pelle mécanique, mais aussi par une récupération plus élevée d'or.

Ce schéma d'exploitation avec une pompe à graviers peut être nettement amélioré pour ce qui concerne la phase de débouillage et de tri, tout en réduisant les charges en personnel en remplaçant le lavage en tas sur bed-rock, et le tri manuel le long du canal par l'installation d'un trommel à crible alimenté directement par la pelle d'exploitation. La surverse du trommel est laissée sur place et la sousverse reprise par la pompe à graviers. Dans ce cas, le besoin en personnel se réduit à un minimum de 2 agents (1 opérateur de pelle, 1 agent de contrôle du trommel et de la pompe).

Par ailleurs, ce dispositif à trommel-crible assure une alimentation de la pompe et de la laverie nettement mieux calibrée.

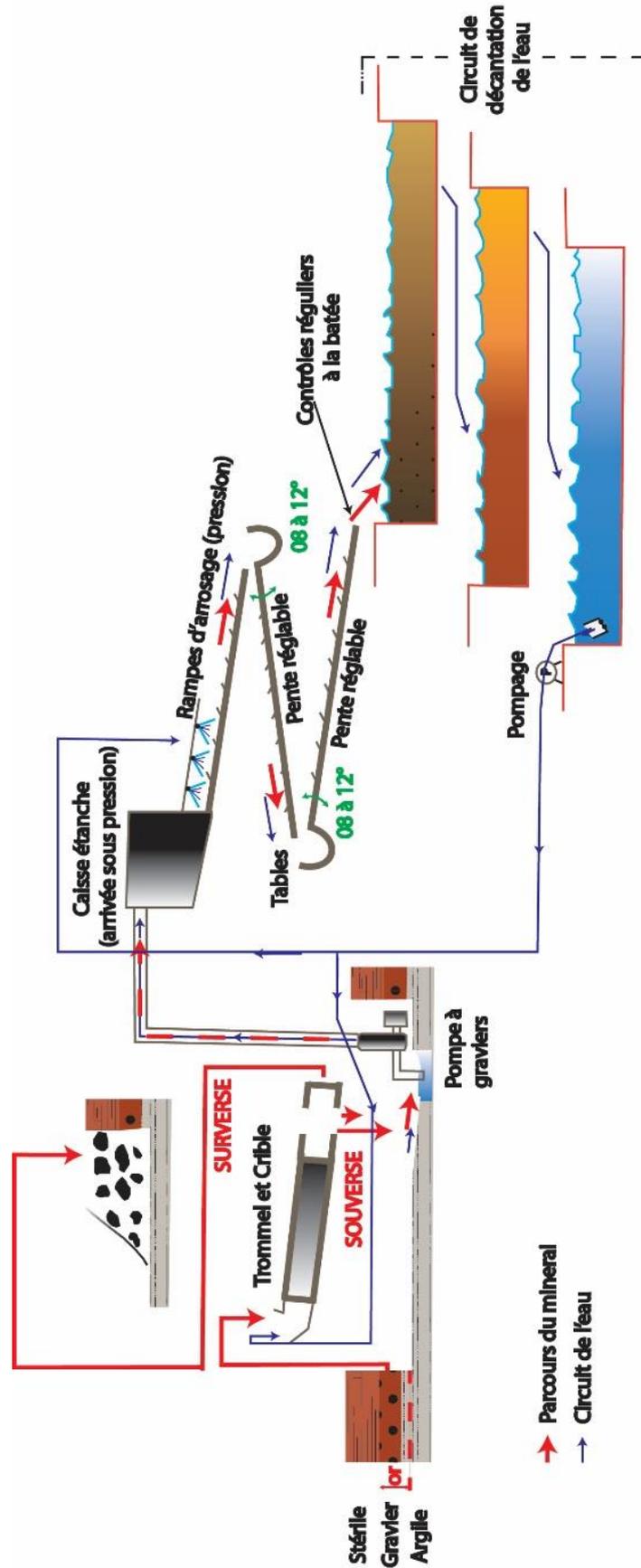


Figure 25 : schéma d'exploitation avec pompe à gravier et Trommel-crible (J.L. Nagel, E. Fournier).

4.1.8. Analyse critique de l'unité de criblage

L'objectif de l'unité de criblage est de séparer la partie graveleuse de la partie argilo-sableuse liquéfiée qui contient l'or, de diriger la première fraction plus grossière vers une surverse et d'orienter la seconde vers l'unité de piégeage.



Figure 26 : (a) photographies de l'unité de criblage. (b) complément de lavage par trois tubes injecteurs fixes (J.L.Nagel)

a) Constats

Généralement constitué de barreaux de fer parallèles soudés sur un châssis, le crible a pour fonction d'éliminer en surverse les blocs et de laisser passer en sousverse le minerai de gravier argileux dirigé vers l'unité de piégeage (sluices). L'écartement de ces barreaux est généralement compris entre 1,5 et 2,5 cm. La section des barreaux est souvent circulaire (diamètre de 10 à 15 cm), mais d'autres cribles sont constitués de barres de fer plates dont la largeur est de 15 à 25 cm. Nous avons aussi observé une tentative d'utilisation d'un panneau de fer déployé en guise de crible, mais ce projet expérimental ne paraît pas opérationnel.

L'avantage du crible à fer rond réside dans sa meilleure résistance à l'usure et à la déformation. Par contre, l'engorgement par des éléments rocheux d'une taille proche de l'écartement est

rapide (effet de coincement- Figure 27) ; le crible devient ainsi rapidement fermé par obstruction et le gravier minéralisé peut alors ne pas être récupéré et traité. D'un autre côté, l'utilisation de barres de fer plates limite cet effet d'obturation ; mais en contrepartie l'usure et la déformation de ces barres sont rapides (Figure 27).



Figure 27 : photographie des deux types de crible utilisés dans l'exploitation de l'or alluvionnaire en Guyane française. Ces photographies montrent très nettement l'engorgement du crible, en particulier pour le crible à barres rondes. A noter aussi la déformation des barres plates (c).

b) Recommandations et alternatives envisageables

Pour remédier à ce problème, nous préconisons la construction de cribles à partir de fers à profil en T, le plat étant tourné vers le haut ; le crible est plus résistant à la déformation avec un effet d'obturation réduit. Par ailleurs, en lieu et place de la caisse de débouage et du crible, la phase de débouage-tri pourrait être réalisée bien plus efficacement par un passage du minerai brut dans un trommel rotatif comprenant une partie crible, en pente vers une laverie à sluices uniquement (surverse vers les stériles, sousverse vers les sluices) (Figure 28); le débouage dans le trommel (Figure 29 et 30) peut être amélioré par l'installation de barres longitudinales et/ou de chaînes pendantes ; cet équipement, d'usage courant dans les exploitations alluviales du Yukon (Canada) n'a que peu été introduit en Guyane (p.ex. mine Boulanger). En plus de l'alimentation en eau, on peut y ajouter des rampes d'arrosage statiques au-dessus du premier sluice.

Il est à noter que toutes les exploitations que nous avons visitées utilisent des laveries statiques alors qu'il existe des systèmes où le crible est animé de vibrations améliorant le tri ; cette solution a été testée (p.ex. CMB) mais ne semble pas avoir fait d'émules. Cette technique à vibrations équipe la plupart des chantiers sur placers au Canada ; la laverie ainsi complexifiée, si elle améliore le criblage est toutefois également source de pannes.

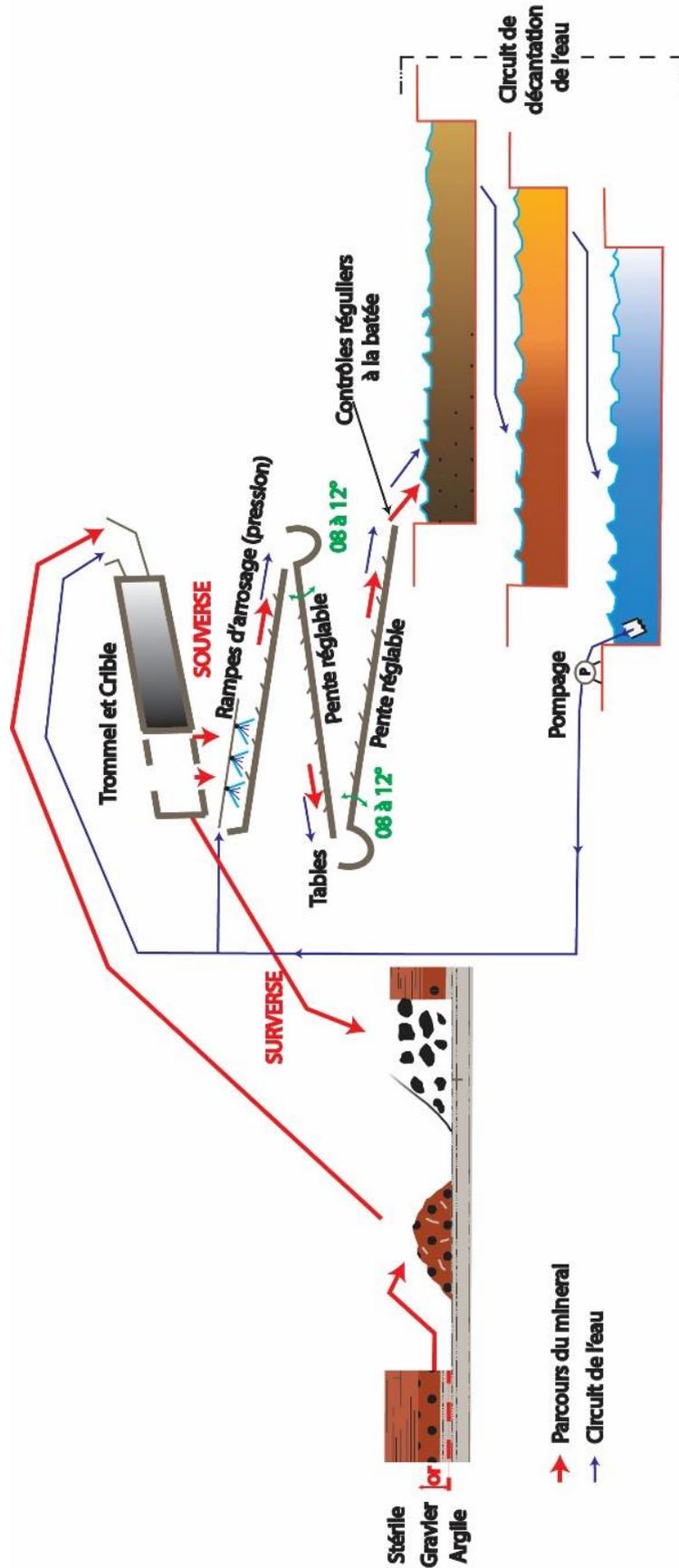


Figure 28 : schéma de traitement où débourbage et tri seraient assurés par un trommel-crible.



Figure 29 : Photographies de trommels utilisés dans l'exploitation aurifère. (a et b) Trommel dans une unité de lavage d'éluvions en Guyane (J. Petot, 1993). (b et c) : Trommel et son crible, ici habillés de caoutchouc (Source : <http://somatrap.fr/>).



Figure 30 : Trommel à crible grillagé utilisé au Guatemala (Source : <https://riosuerte.com/>).

4.1.9. Analyse critique de l'unité de piégeage

Le piégeage de l'or alluvionnaire en Guyane est toujours obtenu en se servant de l'un de ses paramètres physiques majeurs, sa densité exceptionnelle élevée (17 à 19). Autrefois, le principal outil de récupération fondé sur la gravité était en bois (canal étroit long : sluice, ou court : Longtom), garni d'obstacles à l'écoulement de l'eau transporteur du gravier et du sable : les riffles. Des Longtom ou dalles (1m à 1,50m), transportables à dos d'homme, ont équipé autrefois les petits orpailleurs itinérants (c'est encore le cas en Afrique). Dans les premières exploitations alluvionnaires des grands flats de Guyane (p.ex. Saint Elie, ...), les sluices pouvaient atteindre des longueurs impressionnantes : 50 à 70 m, voire plus.

a) *Constats*

Le modèle de laverie communément utilisé en Guyane est donc un ensemble métallique compact, déplaçable sur skis, de fabrication locale, tracté par une pelle mécanique.

La partie concentration-piégeage des minéraux lourds -le sluice- est fractionnée et composée d'un enchaînement de 2 ou 3 plans (Figure 31 a), avec une disposition en « Z » et placés sous le crible. Les plans concentrateurs sont plus larges que les anciens sluices (2 à 3 m), mais au cumul de longueur aussi bien plus court : une dizaine de mètres seulement. Les riffles en bois ont été remplacés par un ensemble comportant systématiquement, à la base, une garniture à tapis synthétique type spaghetti (Figure 31 b) (plus ou moins épaisse, noire, verte ou bleue), sans fond pour faciliter l'extraction des minéraux lors de la levée, et surmontée de panneaux de feuillards de fer entrelacés (matériel utilisé pour l'armature de béton) : panneaux de fer déployé (Figure 31 b); ils sont fixés au centre et sur les bords par vissage et/ou coins. Le riffle idéal correspond au profil connu sous le nom de profil « hongrois » (Figure 31 c). Ce riffle n'est efficace que dans des conditions de flux contrôlé. En effet, trop puissant (Figure 32 a et b), le flux ne crée pas le rouleau en arrière de l'obstacle et la concentration des lourds ne se fait pas. Par ailleurs, il est à noter que ce flux est davantage contrôlé si le plan concentrateur est fragmenté en canaux/couloirs (Figure 32 c et d). Le produit industriel courant qui s'en rapproche le plus est celui des plaques de fer déployé. A noter que ce dispositif a été mis en œuvre pour la première fois par P. Jalbaud à Belizon vers 1860.

Dans les mines que nous avons visitées, les plans-concentrateurs ont une pente de l'ordre de 6 à 8° et sont rarement réglables. Enfin, la fixation des panneaux de fer déployé, non sécurisée dans la plupart des cas, facilite les vols nocturnes de moquette.

Ce système bien que fonctionnel, ne nous paraît pas être, dans la plupart des cas, optimisé. En effet, la rusticité et la légèreté des laveries est privilégiée au détriment du taux de récupération de l'or, et les plans concentrateurs sont trop courts pour permettre à l'or fin de s'y déposer et aux argiles porteuses de s'y liquéfier en libérant l'or contenu.

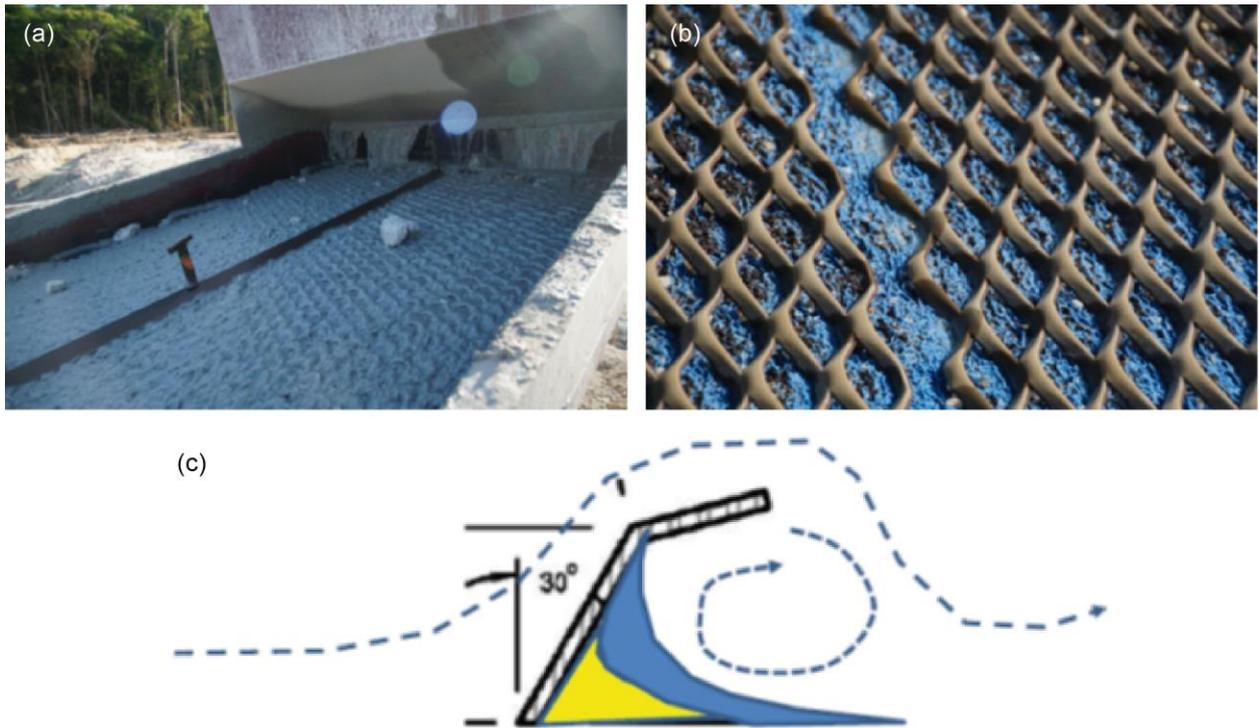


Figure 31 : (a) passage du flux sur le concentrateur à moquette et fer déployé (b) : panneaux de fer déployé (flux vers la droite) sur moquette spaghetti. (c) profil de riffles dit hongrois favorisant la sédimentation des minéraux lourds (J.L. Nagel).



Figure 32 : (a et b) photographies de l'unité de piégeage en fonctionnement. Dans les deux cas, le flux est trop important et ne permet pas la sédimentation des minéraux lourds. (b et c) sluice à 4 canaux améliorant la répartition des écoulements (J.L. Nagel). A noter sur les photographies c et d la présence de barres transversales qui sécurisent le plan concentrateur.

b) Recommandations

En terme de recommandations, il nous semble que l'unité de piégeage doit en premier lieu être construite avec des tables réglables afin de pouvoir optimiser la pente. De plus, il est nécessaire de prévoir non pas 2, mais au moins 3 plans-concentrateurs ; la levée sera effectivement plus longue à réaliser, mais la récupération des fines devrait être améliorée. Si l'on envisage d'espacer les levées, il conviendra d'utiliser la version épaisse des tapis textiles PVC spaghetti (volume d'accueil plus important des minéraux lourds). En ce qui concerne la vitesse de circulation des eaux issues du débouillage sur les tables de piégeage, il est nécessaire d'adapter le débit des lances aux capacités de la machine de façon à obtenir un flux moutonnant de la pulpe au-dessus des fers déployés qui pourront ainsi jouer leur rôle de piège ; un flux trop important produira un effet de chasse nuisible à la récupération optimale des minéraux lourds. Nous recommandons de procéder à de fréquents contrôles à la batée en aval de la laverie et d'adapter à la fois flux et pente en fonction des résultats. Un contrôle à la loupe de terrain peut aussi être envisagé pour les cellules piégeant les minéraux plus fins en aval. Dans ce cas, si des particules d'or sont visibles à la loupe, le système n'est pas bien réglé et de l'or est perdu, probablement en quantité suffisante pour avoir un impact sur la rentabilité de l'exploitation. Enfin, une solution sécuritaire pour éviter les vols de moquettes consisterait à fixer les fers déployés sous un cadre métallique articulé en amont, et fixé au bâti en aval par des cadenas ; ce système articulé a, par ailleurs, l'avantage de simplifier l'accès aux moquettes lors des levées (il semble cependant que des opérateurs préfèrent laisser libre accès aux moquettes plutôt que de se voir contraints sous la menace de les libérer...).

4.1.10. Analyse critique de la phase de levée

a) *Constats et conséquences*

L'opération (Figure 33) nécessite le retrait des panneaux de fer déployé pour accéder aux moquettes chargées en minéraux lourds. Le cas échéant, lorsqu'un plan-concentrateur est directement aménagé sous le crible, il convient de déposer celui-ci pour y avoir accès. La levée est l'occasion d'un nettoyage du crible engorgé par des éléments rocheux coincés. Les moquettes sont parfois lavées sur les plans-concentrateurs y libérant les minéraux lourds qui sont ensuite acheminés vers le laboratoire de la base. A noter que ce concentré pauvre est parfois réduit sur place par élimination manuelle rapide d'une partie des minéraux résiduels noirs ou blancs et plus légers que l'or.

Cette manière de procéder à la levée n'est pas sans conséquences sur la quantité d'or récoltée in fine. En effet, si la décharge des moquettes sur place permet de les replacer rapidement et de relancer rapidement le lavage pendant que la finition s'opèrera au laboratoire, cette opération mobilise l'ensemble du personnel et peut engendrer des pertes car les conditions de lavage sur site n'y sont pas optimales.



Figure 33 : photographies des différentes étapes de la phase de levée (a) retrait des panneaux de fer déployé. (b) retrait des moquettes. (c) nettoyage des moquettes dans un bac de transport. (d) : récupération des lourds du sluice déséquipé.

b) *Recommandations*

Même si l'impact de cette phase de levée des moquettes sur la quantité d'or récoltée in fine lors de la phase d'affinage est minime, nous recommandons qu'elle soit réalisée dans les meilleures conditions possibles, c'est-à-dire au laboratoire. Aussi, il nous paraît envisageable, pendant le nettoyage des moquettes au laboratoire, d'utiliser un second jeu de moquettes afin de redémarrer rapidement l'activité productrice.

5. AFFINAGE ET SEPARATION DE L'OR

Le concentré lourd (or, minéraux noirs et minéraux légers résiduels) subit une première phase d'épuration par l'usage isolé ou combiné des techniques suivantes en voie humide : la batée, le pan californien, le plat finlandais.

La batée (Figure 34) a) représente probablement l'outil le plus simple et le plus utilisé pour l'affinage et la séparation de l'or. Son utilisation nécessite la succession de mouvements précis qui demandent une certaine dextérité (Figure 35). Cet outil conduit à une répartition radiale, par densité, des minéraux lourds et de l'or. Ce dernier étant le plus dense, il doit, si l'outil est correctement manipulé, se retrouver concentré au centre.



Figure 34 : formes diverses de récipients concentrateur. (a) batée, (b) pan rainuré californien, (c) plat finlandais (source : <http://www.orpaillage.fr>).

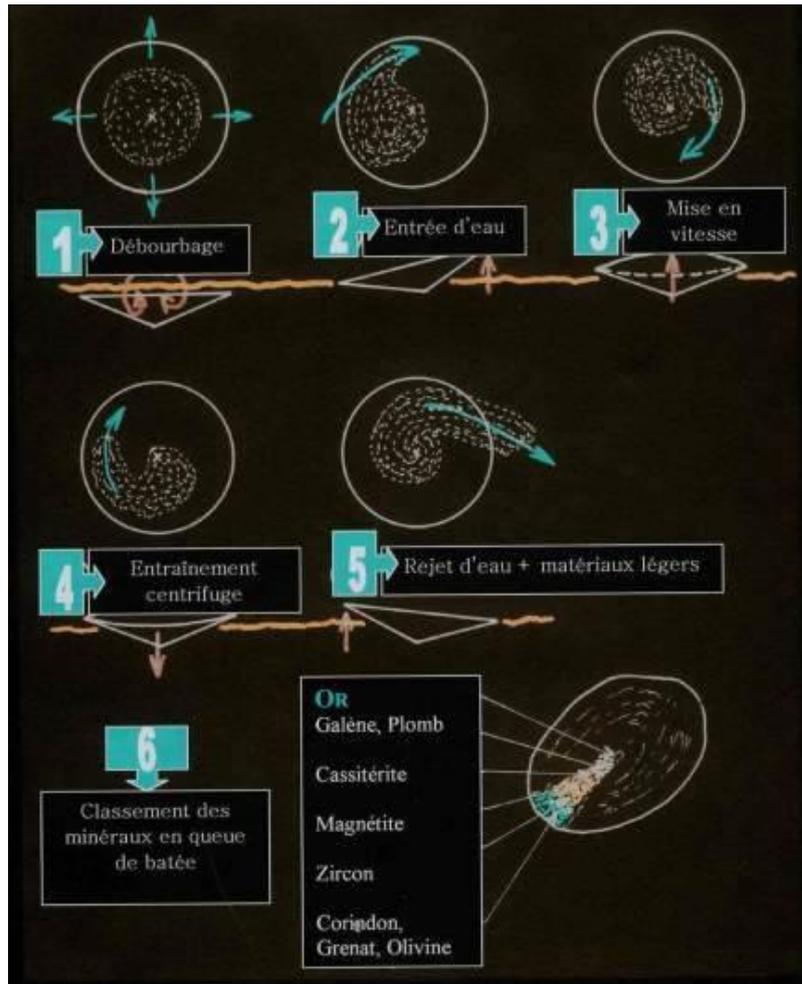


Figure 35 : cycle de mouvements réalisés lors de l'utilisation d'une batée (source : <http://www.orpillage.fr>).

- Le Couy

Il s'agit d'un bol demi-sphérique métallique généralement utilisé pour la phase finale de séparation et pour de faibles volumes à traiter (Figure 36).



Figure 36 : or et métaux lourds concentrés à l'aide d'un cuy

- Le Bol de Knelson

Développé pour la mine Euréka (Canada, Yukon) (réf : <https://im-mining.com/2014/10/07> & <https://www.911metallurgist.com/knelson-concentrator>), l'appareil est largement répandu en Guyane, car il est capable de séparer l'or même fin ; il agit par centrifugation ; l'eau est introduite latéralement dans le cône et y crée un lit fluidisé. Le minerais est introduit par le haut et la rotation ainsi que les jets latéraux contribuent à maintenir les lourds dans les rigoles alors que les légers sont éjectés (Figure 37). Le Bol de Knusden agit de façon identique (Figure 38).

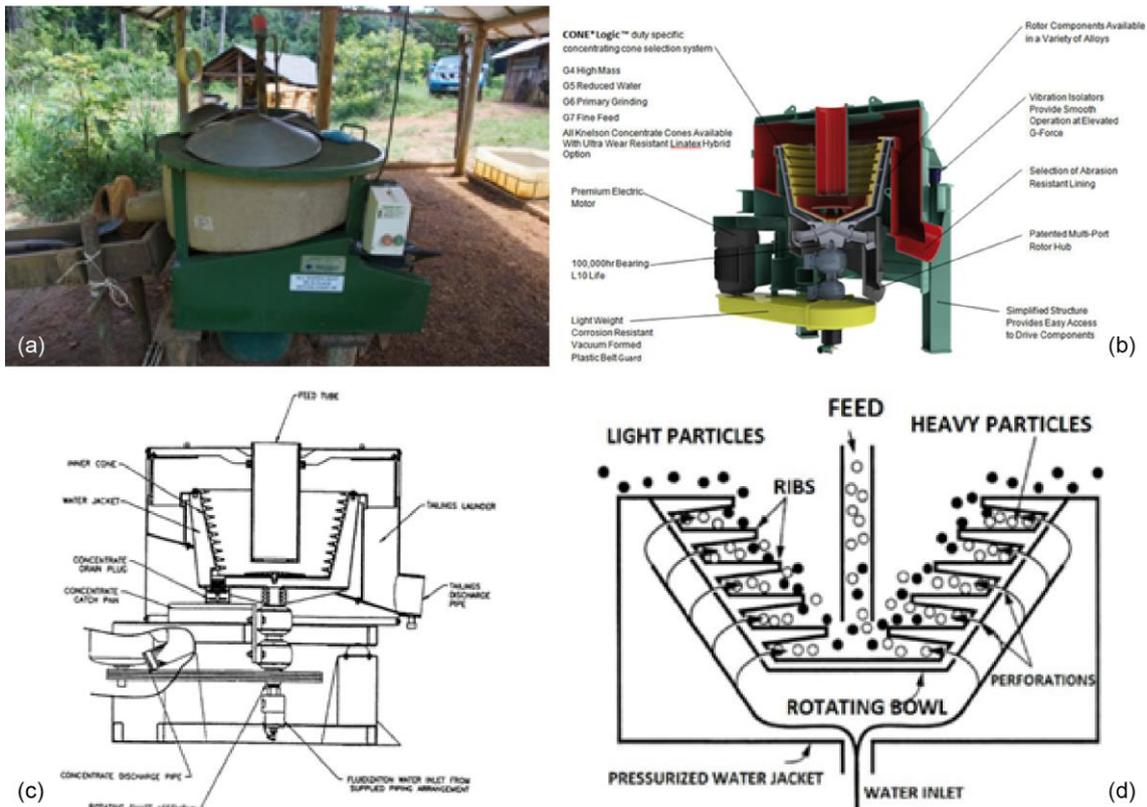


Figure 37 : photographie et schémas de principe du bol de Nelson



Figure 38 : Bol de Knelson, mise en œuvre et produit de sortie semi-affiné (J.L.Nagel)

- La table à secousse de type Gemini (ou Goldfield)

Cette table ne s'utilise qu'après retrait des gros grains d'or et pépites. La séparation fine réalisée par la table Gemini (vers les récepteurs de droite) n'est efficace que pour des minéraux lourds dont la taille n'excède pas celle des rainurages ; les grosses particules d'or auront tendance à descendre directement avec les minéraux lourds noirs en pertes dans la sousverse (Figures 39,40 et 41).



Figure 39 : photographie d'une table à secousses Géméni ([https://www.911metallurgist.com/blog/gemini-gold-shaking-table#lightbox\[postimages\]/0](https://www.911metallurgist.com/blog/gemini-gold-shaking-table#lightbox[postimages]/0))



Figure 40 : photographie de détail des différents éléments d'une table à secousses Gemini. (a) réglage des flux d'eau de la table à secousses Gemini. (b) la table à secousses Gemini en production. (c) identification et réglage des secousses de la table Gemini (J.L.Nagel)



Figure 41 : photographie d'une table à secousses Goldfield (J.L. Nagel)

- La table à vagues (Figure 42)

L'écoulement se fait depuis la buse à eau vers la droite sur la figure 42, l'ondulation des vagues permet de trier les minéraux par contraste de densité : les plus lourds se retrouvent classés vers la gauche ; l'or occupe la bande la plus à gauche, vient ensuite le dépôt des minéraux noirs et enfin, à droite, les minéraux légers résiduels. L'opérateur élimine les minéraux magnétiques (bande noire) à l'aide d'un aimant entouré d'un tissu (Figure 42).

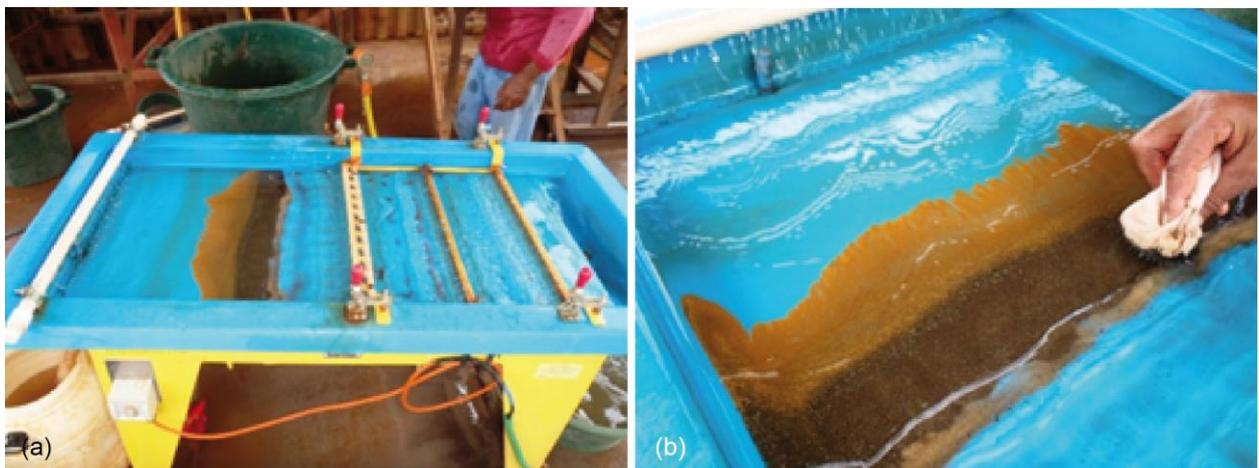


Figure 42 : photographie d'une table à vagues en fonctionnement (CMB)

- Les sluices de laboratoire (Figure 43)

Il s'agit de petits canaux concentrateurs qui fonctionnent de la même manière que les canaux utilisés sur le site d'extraction.



Figure 43 : crible vibrant et 5 sluices avec récupération de l'or ici à droite(J.L. Nagel)

- Alternatives

D'autres appareils pourraient être utilisés pour la finition, éventuellement utilisables au niveau de la laverie, après avoir réalisé des essais préliminaires d'efficacité :

- la spirale de Humphreys (Figure 44) en voie humide et le cône de Reichert : l'appareil ne demande aucune force motrice ; la granulométrie des matériaux traités doit être comprise entre 2,3 et 0,074 mm ; la capacité est de 500 à 2 500 Kg/h ; la consommation en eau est relativement faible avec une boucle de recyclage et est comprise entre 0,7 et 1,5 m³/h.
- les jigs (Figure 45), séparation par saltation dans un liquide ou dans l'air : utilisée à Délice en 1955, cette méthode consiste à créer des accélérations différentielles alternatives (pulsion + succion) sur une pulpe conduisant à séparer par densité l'intrant calibré. Il existe une grande variété de jigs dans le commerce (Harz, Hancock, Denver, Bendelari, Baum, BRGM...), à eau ou à air, à crible fixe ou mobile. Le jig BRGM avait surtout été étudié pour récupérer le diamant.
- Les séparateurs à bande en voie humide (Figure 46) : ce système affiche une pente avec circulation d'eau ; les minéraux lourds sont entraînés par le tapis alors que les légers suivent le flux d'eau en sens contraire du déplacement de la bande ; le système peut être amélioré en induisant une légère vibration du système.

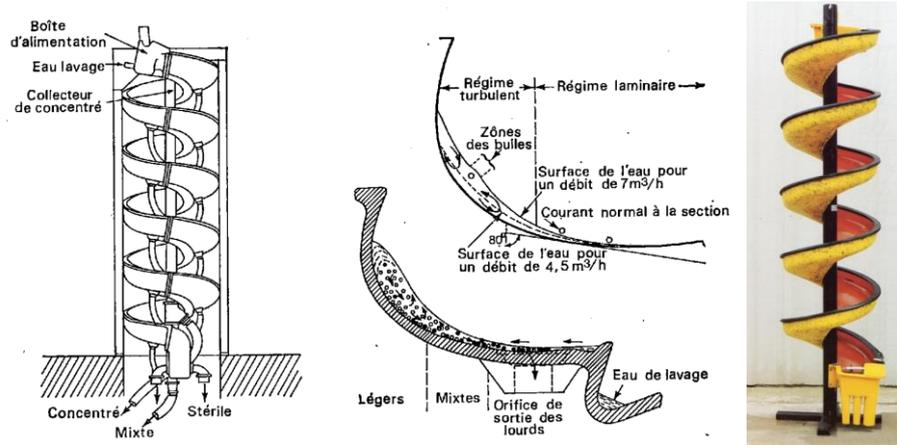


Figure 44 : spirale de Humphreys et son fonctionnement (P. Blazy, 1970 & <https://riosuerte>)

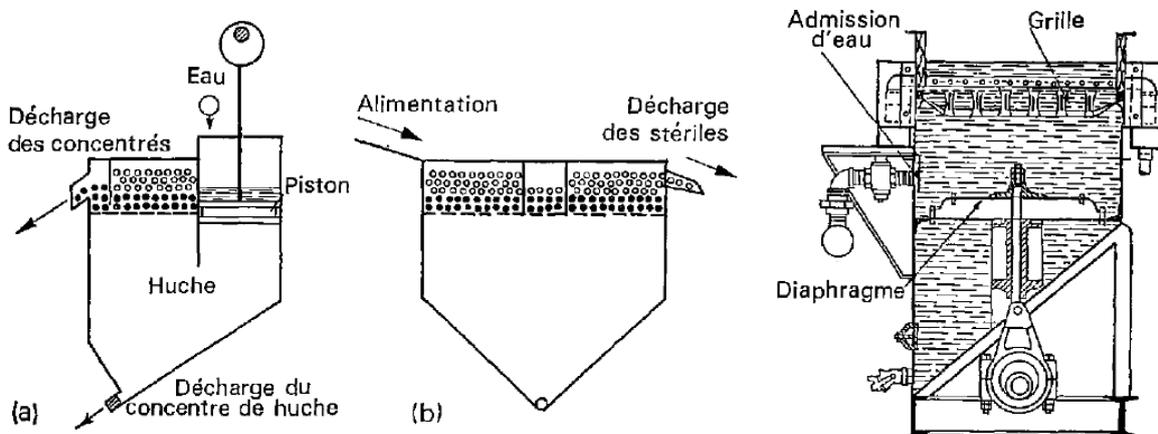


Figure 45 : jig Harz (à gauche), jig Bedelari (à droite) (P. Balzy, 1970)

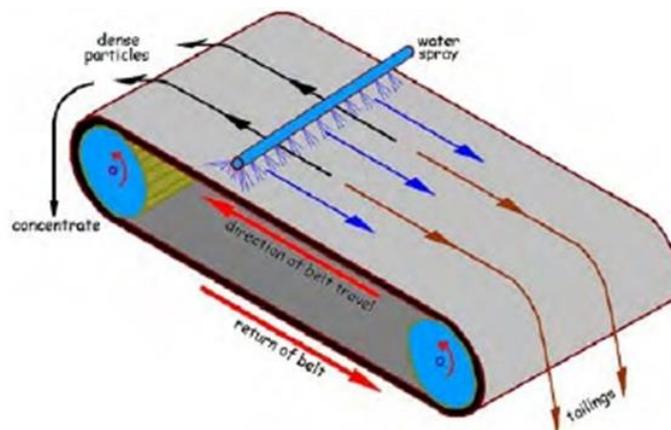


Figure 46 : séparateur à bande (Source : <https://riosuerte>)

- Limites d'utilisation des concentrateurs :

L'utilisation des différents concentrateurs présentés précédemment doit être choisie en fonction de la taille des particules de minerai entrant dans le système (intervalles granulométriques) et des conditions du traitement en voie sèche ou humide. La Figure 47 ci-dessous récapitule le domaine d'utilisation le plus favorable pour chacun des concentrateurs présentés.

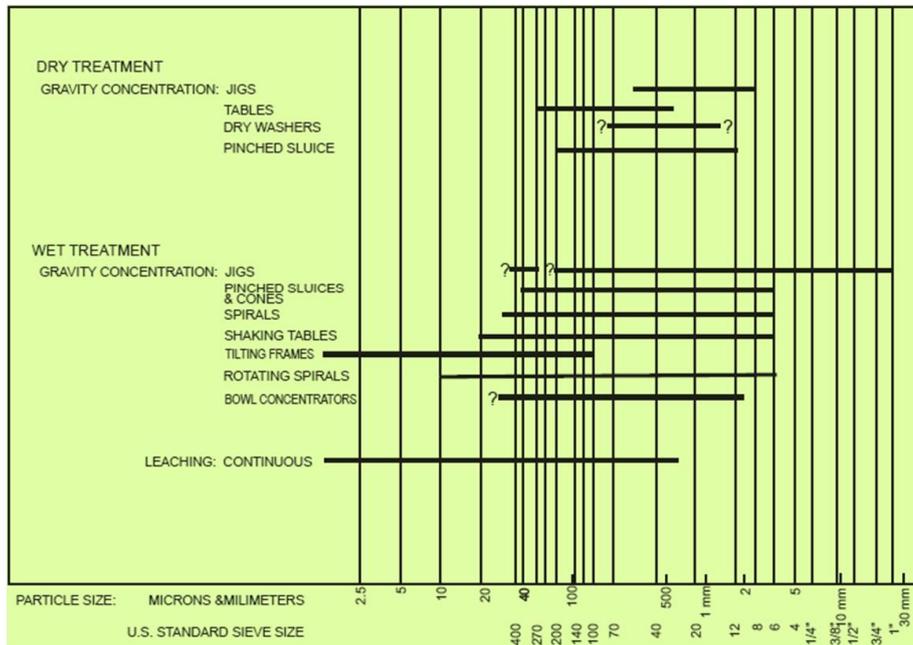


Figure 47 : fourchettes idéales d'utilisation de quelques concentrateurs (<https://riosuerte>)

- Autres remarques sur la concentration en laboratoire

Le recours à des outils plus ou moins complexes, s'ils accélèrent la phase de préconcentration, n'améliore pas la qualité du produit et une étape de tri final manuel reste nécessaire.

Lors de l'affinage manuel une séparation des particules magnétiques est le plus souvent nécessaire afin d'éliminer les minéraux et produits ferromagnétiques (copeaux métalliques, billes de roulements, magnétites, etc...) ; cette action est plus efficace appliquée sur des concentrés secs. Pour cette opération, les techniques les plus couramment utilisées sont :

- des aimants : le concentré est étalé sous l'aimant-ventouse accroché à l'extrémité d'un tendeur élastique vertical fixé au plafond ; l'aimant ainsi suspendu peut-être manipulé sans fatigue. On place sous cet aimant une fine feuille de papier (ou un tissu) ce qui facilitera le nettoyage de l'aimant ;

- des séparateurs magnétiques à cylindre rotatif (Ekkoll ou autre).

Selon nous, un modèle paraît efficace, il s'agit d'un aimant à main type ventouse UGINE (le modèle AM 5556 Ticonal 700 GD a une force portante 50 kg) ; cet aimant cylindrique (diamètre de 45 mm), présente une couronne circulaire aimantée ; mais tout aimant suffisamment puissant et large pourra assurer cette fonction.

Les plombs de chasse, de par leur densité forte (9 à 11 suivant l'alliage) suivent de près les grains d'or et l'on constate de fréquents accolements de l'or sur ces plombs de chasse, difficilement séparables (observé en inclusions dans les dorés produit par fusion par Augé et al., 2015). De ce fait, tout au long du processus d'affinage, l'opérateur devra être très attentif à la présence ou non de ces plombs qui dégrade la qualité du produit en diminuant la concentration en or.

La dernière phase d'élimination des minéraux autres que l'or se pratique *in fine* manuellement et visuellement par piquage des grains sans valeur, éventuellement par un soufflage ultime (vannage). Il faut noter aussi que le produit granuleux final peut encore contenir quelques minéraux noirs très fins et donc peu visibles ; il sera généralement commercialisé dans cet état.

Concernant la fusion de l'or, certains opérateurs préfèrent procéder à une fusion en lingotière du produit final à l'aide d'un chalumeau oxyacétylénique et en présence d'un fondant (Borax), qui abaisse la température de fusion de l'or (l'or sans borax ajouté fond à 1064°C). Néanmoins, si cette procédure est encore acceptée par les acheteurs, elle peut soulever des suspicions ; l'argument étant que la fusion gêne un éventuel contrôle d'origine (la traçabilité de l'or) et efface également les formes identifiables résiduelles d'amalgamation (or spongieux).

Pour le soufflage, le concentré est placé sur un carton à rebords ou un plateau rectangulaire avec bords, secoué d'une main pendant que l'autre main tient un sèche-cheveux électrique à 30 cm environ au-dessus de l'échantillon ; le souffle humain permet après quelques essais un meilleur contrôle de l'opération ; le jet d'air tombant obliquement sur l'échantillon élimine les minéraux plus légers, les secousses les faisant remonter à la surface du concentré ; les bords du plateau permettent d'arrêter les poussières d'or, et de maîtriser le départ de l'or.

6. L'EAU

Toutes les mines d'or de Guyane fonctionnent avec un système hydraulique comparable qui nécessite une quantité importante d'eau. Au début de l'exploitation, cette eau est prélevée dans la crique qui circule à proximité du flat exploité. Elle est stockée dans un premier bassin, puis est utilisée pour le débouage du gravier. A l'issue de la phase de lavage, cette eau, chargée en particules fines, est renvoyée dans une série de bassins qui permettent, en théorie, à ces particules fines de décanter. A noter que le dernier bassin de cette série correspond au bassin dans lequel l'eau est pompée pour la phase de lavage (Figure 48).

Dans la théorie, il arrive souvent que cette série de bassins ne soit pas suffisante pour permettre aux particules de décanter. C'est en particulier le cas si les eaux de lavage sont enrichies en kaolin ou en goethite. De ce fait, l'eau de lavage devient très rapidement une eau turbide, avec des concentrations en MES (Matière En Suspension) qui peuvent atteindre des valeurs très élevées (jusqu'à 5.5 g.L⁻¹ pour le kaolin ; Lebret *et al.*, rapport en cours). Ainsi, selon la nature des MES et leur concentration, il y a 3 conséquences principales :

- l'usure accentuée de la pompe ;
- l'usure des tuyauteries et des buses Monitor ;
- un débouage moins efficace ;
- une augmentation progressive de la quantité de MES dans les eaux de lavage au cours du temps.

Depuis une dizaine d'années, plusieurs études se sont attachées à proposer des solutions pour accélérer les processus de décantation de cette série de bassins ; en particulier à l'aide de coagulant et de floculant chimiques. Si ces différentes études ont permis de démontrer

l'adaptabilité de ces produits aux traitements des eaux minières de Guyane, aucune d'entre elles n'a permis de proposer un système opérationnel qui pourrait traiter l'intégralité d'un bassin. Ceci étant, des études allant dans ce sens ont été ou sont conduites par le BRGM (Lebret *et al.*, 2017 ; Lebret *et al.*, en cours). Ces études devraient permettre de rendre plus opérationnels, à l'échelle du traitement d'un bassin complet, les connaissances théoriques et les systèmes de décantation déjà proposés dans la littérature.



Circuit de l'eau de lavage, décantation dans 5 bassins →
Unité de traitement : ○ Pompe à eau alimentant les monitors : ○

Figure 48 : exemple de circuit de décantation de l'eau (ici à 5 bassins) (fond : CMB)

5. Synthèse principale sur les constats et recommandations concernant les techniques d'exploitation d'or en Guyane

1. LE PLAN D'EXPLOITATION

Une exploitation bien planifiée devrait impérativement tenir compte du plan prévisionnel de minéralisation obtenu lors de la prospection ; celle-ci devant être conduite dans les règles pour être fiable. Le lecteur se référera à Nagel *et al.* (2017) pour des précisions techniques quant à cette opération. Nous insistons particulièrement sur le fait qu'il est nécessaire d'abandonner les zones pauvres et de ne s'en tenir qu'à l'exploitation des zones démontrées rentables ; cela améliorera la rentabilité de l'exploitation, d'une part, et réduira la surface déboisée et perturbée, d'autre part.

2. L'EXTRACTION DE LA COUCHE MINERALISEE

Un autre aspect à prendre en compte concerne la précision dans l'extraction du minerai : rejeter tout le stérile et rien que le stérile, ne récupérer que les deux horizons minéralisés, la couche de graviers et les vingt premiers centimètres d'argiles de la lithomarge représentant la surface d'altération directe du bed-rock (zone fréquente d'enrichissement aurifère).

3. LE CIRCUIT DE TRAITEMENT

Si l'on tient à conserver le système de laverie classique (alimentation par pelle mécanique d'un ensemble débourbeur-cribleur-concentrateur), plusieurs points d'amélioration sont à envisager pour rendre plus efficace la récupération et approcher l'épuisement du flat en or (Figure 49 a) :

- le principal point faible de ce processus réside dans sa partie débourbage-crible où nous préconisons d'améliorer la caisse d'accueil qui sert au débourbage (pente maximale de 5°, longueur d'au moins 2,5 m, flancs verticaux, garnissage de brise-jets horizontaux soudés sur les flancs, réduction de la surface d'entrée au moyen de bandes caoutchoutées retenant les matériaux soumis à la forte pression des jets Monitor (Figure 49 a) ;
- l'utilisation d'un crible limite l'effet d'engorgement par obstruction de fragments de roche ; nous suggérons l'abandon des fers ronds ou plats pour une utilisation de fers profilés en T, plat vers le haut (Figure 49 a) ;
- le remplacement de la caisse de débourbage et du crible par un système trommel-crible est une solution à étudier, car probablement plus efficace ;
- la laverie doit être parfaitement positionnée à l'horizontal afin que le flux puisse se répartir de façon homogène sur les tables ; la division des tables longitudinalement au moyen de nervures pourra compenser les petits écarts d'inclinaison de la machine (écarts pouvant notamment apparaître lors du tassement des matériaux meubles de la digue) ;

Les tables doivent avoir une pente réglable pour adapter l'écoulement au volume d'eau apporté par les jets débourbeurs ; le flux s'écoulant sur les tables doit idéalement avoir un aspect « moutonnant » (la forme de la grille en fer déployé ayant un effet de riffles), les minéraux lourds doivent se concentrer dans la moquette placée sous la grille et la composition des rejets

normalement stérile à la sortie de la laverie doit être régulièrement vérifiée, à la batée par exemple (contrôle essentiel).

Parmi les techniques d'exploitations alluvionnaires aurifères pratiquées en Guyane, celle qui fait intervenir une pompe à graviers (Figure 49 b) présente, selon nous, les meilleurs avantages, et ce d'autant plus si le minerai extrait passe dans un trommel-crible avant l'entrée dans la pompe, car :

- une seule pelle est indispensable au niveau de l'exploitation au lieu des 2 qu'impose la laverie ouverte traditionnelle ;
- le débouillage dans le milieu fermé du trommel se poursuit lors du passage dans la pompe, sous l'effet turbulent du transfert de la pulpe dans les tuyaux, et enfin par l'effet de projection à l'arrivée dans la boîte étanche d'accueil sur la laverie (milieu clos, pertes très réduites à nulles) ;
- la laverie, plus légère, peut facilement accueillir trois tables (réglables en inclinaison) de type sluice ;
- les éléments grossiers sont déposés loin de la laverie et ne l'encombrent pas ;
- le coût représenté par les pièces d'usure (stator, rotor, tuyaux) et l'ajout du trommel (matériel simple, moteur de faible puissance) nous paraît largement compensé par :
 - o l'économie d'une pelle de production (achat, entretien et consommables) ;
 - o la réduction du besoin en main d'œuvre à **2 agents** (au minimum : 1 opérateur de pelle, 1 agent de contrôle du trommel et de la pompe / alors que sans trommel et avec un lavage sur place et le tri manuel, le chantier demande l'intervention de 6 à 7 agents) ;
 - o la réduction majeure des pertes en minerai conduisant à un taux de récupération bien supérieur (système fermé et débouillage amélioré).

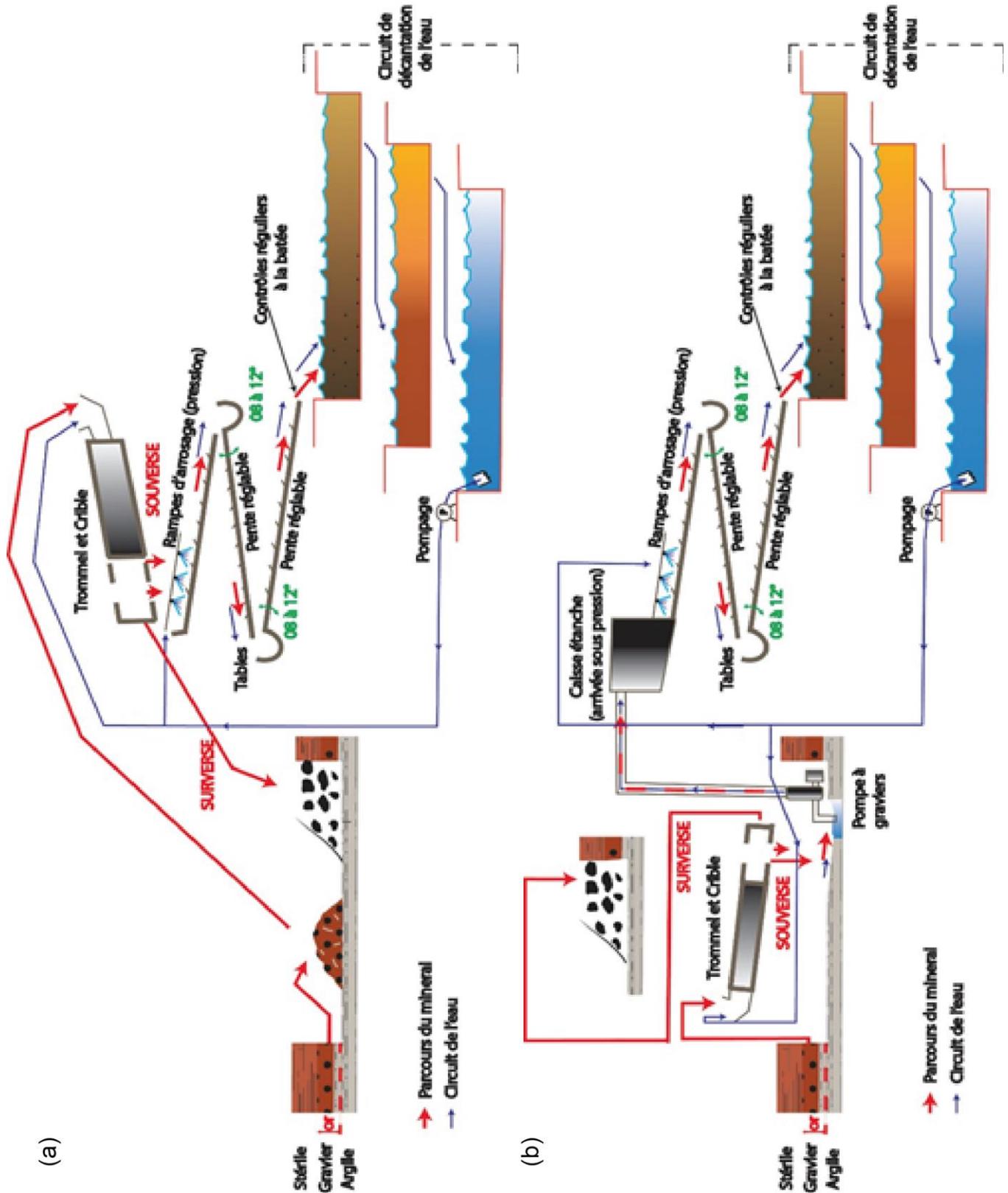


Figure 49 : schéma de traitement où débouillage et tri seraient assurés par un trommel-crible

4. LA FINITION, LE PRODUIT COMMERCIAL

Obtenir un concentré aurifère de qualité commerciale peut faire appel à un ou plusieurs des appareils de concentration proposés sur le marché (ils sont nombreux et variés, nord-américains pour l'essentiel), ce qui ne fera que réduire le temps consacré à ce travail, mais n'en améliorera pas la qualité du produit final, la toute dernière phase étant manuelle et visuelle.

6. Alternative au système guyanais : les équipements mobiles utilisés dans le monde

Il existe à travers le monde de nombreuses mines alluviales utilisant des procédés d'extraction très différents sur des laps de temps tout aussi différents. De ce fait, de nombreuses sociétés d'ingénierie industrielle se sont positionnées sur le marché du développement d'équipements adaptés à ces différentes conditions. Ainsi, s'il existe des quasi-usines mobiles pour exploiter de grands gisements sur de longues périodes (e.g. Figure 50), il existe aussi de plus petites unités, modulables ou non et mobiles, qui pourraient être tout ou partie adaptées à l'exploitation de placers aurifères en Guyane.

Compte tenu du fait que les flats alluvionnaires de Guyane sont fortement argileux (bed-rock saprolitique), il est primordial que ces équipements disposent d'une unité efficace de lavage. De plus, le déplacement de ces équipements doit être la plus aisée possible. De ce fait, nos recherches ont été concentrées sur des équipements ayant les susdites caractéristiques. Les paragraphes suivants ont pour but de décrire les unités mobiles utilisées à travers le monde dans le cadre d'exploitation d'or alluvionnaire (et d'autres minéraux détritiques associés), qui nous semblent tout ou partie pertinentes dans le cadre du développement des méthodes d'exploitation de la filière aurifère de Guyane.



Figure 50 : exemple d'équipement imposant pour le traitement de minerai aurifère, développé par MSI-MINING (source : <https://www.msi-mining.com/>).

5. EXEMPLE D'EQUIPEMENT ASSOCIANT : DEBOURBEUR – CRIBLEUSE – SLUICES

Ce premier exemple présente une unité mobile déployée dans une mine d'or et de diamants qui est située en Amérique du Sud. Cette unité a été utilisée dans un contexte géologique relativement similaire à celui de Guyane. Elle a été conçue pour répondre à un problème de récupération d'or fin. Les utilisateurs témoignent (sur le site <http://www.alluvialgoldmachine.com>) d'un épais dépôt alluvionnaire constitué d'une couche de gravier, de sable et de cuirasse, sous lequel affleure un niveau argileux saprolitique.

Comme le présente la Figure 51, cette unité mobile est constituée d'un débourbeur (*scrubber*) directement connecté à un trommel à maille de 16 mm. Ce dernier est quant à lui connecté, d'une part à un tapis de récupération et d'évacuation du gravier supérieur à 16 mm et, d'autre part, à une unité de piégeage constituée d'un unique plateau contenant 3 canaux. Concernant ce plateau, on observera sa très faible inclinaison et sa longueur relativement importante.



Figure 51 : exemple d'unité de traitement d'un minerai à or et diamants utilisée dans une mine d'Amérique du Sud (source : <http://www.alluvialgoldmachine.com>, modifié)

6. EXEMPLE D'EQUIPEMENT ASSOCIANT : DEBOURBEUR – CRIBLEUSE – CENTRIFUGEUSE

Ce deuxième exemple présente une unité en partie similaire à la précédente. Il s'agit d'une unité déployée dans des mines d'or d'Asie et d'Indonésie (Figure 52).

La première partie de cette unité est identique à l'unité précédemment décrite. On y retrouve un collecteur de minerai suivi d'un débourbeur (*scrubber*) directement connecté à une cribreuse (trommel), qui elle-même est connectée à une sortie d'évacuation du gravier non criblé. La différence avec l'unité précédemment décrite consiste en la présence, à la place des canaux concentrateurs (*sluices*), de centrifugeuses situées au niveau de la deuxième sortie de la cribreuse. Ces centrifugeuses font office de concentrateur en plaquant l'or et les minéraux lourds contre les parois et en laissant passer les particules plus légères. Selon le site consulté, ce système permettrait de récupérer 90 % de l'or du minerai, y compris l'or fin.



Figure 52 : exemple d'unité de traitement d'un minerai aurifère utilisée en Asie et en Indonésie du Sud (source : <http://www.alluvialgoldmachine.com>, modifié).

7. EXEMPLE D'EQUIPEMENT ASSOCIANT : DEBOURBEUR – CRIBLEUSE – CENTRIFUGEUSE, MONTES SUR ROUES

Ce troisième exemple (Figure 53) présente les mêmes éléments que le précédent. Il est cependant moins imposant et à la particularité d'être monté sur roue, ce qui rend son transport et son déplacement plus simple.

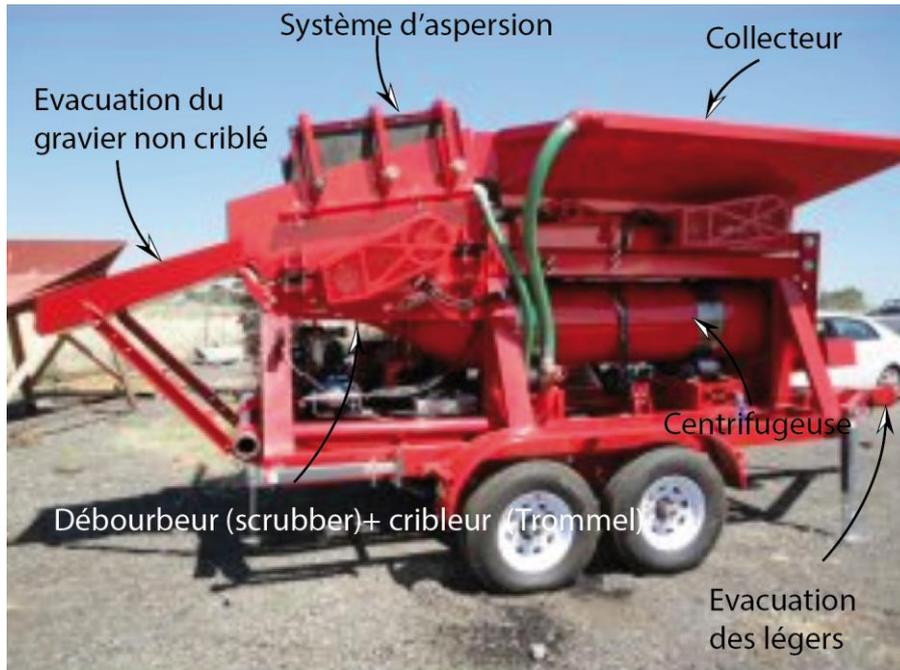


Figure 53 : exemple de dispositif mobile facilement transportable et constitué d'un débourbeur + cribleur et d'une centrifugeuse. Le tout monté sur roues.

7. Conclusion

Cette étude du projet Appui Mine Guyane constitue le deuxième maillon d'une série d'études réalisées sous l'égide de la convention 2017 n°2102186360 de partenariat entre le BRGM et le Ministère de la Transition Energétique et Solidaire (Bureau DGALN/DEB) relative aux ressources minérales. Cette étude vise à appuyer et développer la filière minière aurifère et a permis de faire une synthèse des problèmes techniques des systèmes d'exploitation utilisés en Guyane.

Les résultats de cette étude montrent que le principal poste générateur de pertes se situe au niveau du débouage, souvent imparfaitement réalisé. Tout d'abord, la puissance des jets (Monitor) utilisés expulse du système une partie du minerai entrant, ce qui occasionne des pertes importantes. Par ailleurs, l'or fin inclus dans l'argile constitue un ensemble aggloméré allégé devenu irrécupérable par les procédés gravitaires actuellement en place. En effet, une fois libéré lors du débouage, l'or fin qui était autrefois amalgamé par le mercure (substance dont l'usage est interdit en France depuis 2006), échappe à présent aux tables de récupération (sluices) trop courtes, trop inclinées et le plus souvent non réglables. Enfin, beaucoup d'exploitants ne procèdent pas aux nécessaires contrôles réguliers des rejets en sortie de la laverie, opération qui permettrait d'en ajuster les paramètres (i.e. pentes et débit d'eau).

Cette étude met l'accent sur le fait que le système actuel peut être amélioré, en particulier par l'installation d'une caisse de débouage semi-fermée (dont il est proposé une version schématique), par l'utilisation d'au moins 3 panneaux concentrateurs, eux-mêmes constitués de 3 canaux (i.e. 3 sluices) et par la possibilité de régler l'inclinaison de ces panneaux.

Cette étude présente aussi les bénéfices de l'utilisation de la pompe à graviers dans un système où le minerai serait préalablement lavé à l'aide d'un débouageur-cribleur (scrubber-trommel).

Enfin, cette étude présente quelques équipements alternatifs, développés et conçus par des sociétés spécialisées exploitant les mêmes types de gisements de type placer, dont tout ou partie des éléments techniques pourraient être appliqués au contexte guyanais.

8. Bibliographie

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

Cassard D., Billa M., Lambert A., Picot J.C., Husson Y., Lasserre J.L., and Delor C. (2008) – Gold predictivity mapping in French Guiana using an expert-guided data-driven approach based on a regional-scale GIS. *Ore Geology Reviews*, 34, 471–500.

Colin S. (2017) – Carte d'Extraction et production de métaux et de sel, France (situation 2017). BRGM avec la participation du ministère de la transition écologique et solidaire, du ministère de l'économie et des finances, des fédérations professionnelles : A3M, Aluminium France et CSF

Lebret C., Aertgeerts G., et Joseph B. (2017) – Clarification par coagulation des eaux des industries extractives de Guyane : élaboration d'un protocole expérimental et essais in situ dans la carrière du Galion. Rapport final. BRGM/RP-67030-FR, 84 p., 64 fig., 10 tabl., 2 ann.

Lebret C., Aertgeerts G., Bodin J., et Joseph B. (en cours) – projet DEAL-BRGM ACDC : Aide Chimique à la Décantation par Coagulation dans les industries extractives de Guyane.

Nagel J.-L., Degay.E., Doucelance.R., Guillou.Y., Hocquard.C., Pallier.J.P. (1995) – Inventaire minier du département de la Guyane. Bilan des travaux et résultats; BRGM/RR-38633-FR, 589 p. 2 vol., 10 pht., 6 cart

Nagel J.-L. (1996) – Evaluation du potentiel minier du sud du département de la Guyane sur la base des données disponibles au 30/04/1996. Rapport final. BRGM/RR-38904-FR, 93 p., 09 ill., 2 ann.

Nagel J.-L., Aertgeerts G. et Verneyre L. (2017) – L'exploration de l'or alluvionnaire en Guyane : bilan des méthodes et guide de bonnes pratiques. Rapport final BRGM/RP- 66562-FR, 93 p., 59 ill., 1 tabl., 6 ann.

Pétot J. (1983) – Rapport de prospection. BATM-DII-Guyane, 8/BATM/83, 40 p.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Guyane

Domaine de Suzini – Route de Montabo
BP10552

97333 – Cayenne – France

Tél. : 05 94 30 06 24