

Caractérisation des techniques d'orpaillage illégal en Guyane et en Côte d'Ivoire à partir d'inspections par drone.

Characterization of illegal gold mining techniques in French Guiana and Côte d'Ivoire based on drone inspections.

Théo PLUNIAN^{1*}, Yann GUNZBURGER², Silvain YART¹, Thomas DEWEZ¹
Matthieu CHEVILLARD¹, Florian MASSON¹, Sébastien LINARES³, Laurent BAILLY¹, Noémie FAYOL^{2,4}

1 BRGM, Orléans, France

2 Georessources, Nancy, France

3 EMOPI, Cayenne, France

4 HSM, Univ Montpellier, IMT Mines Ales, CNRS, IRD, Ales, France

**.plunian@externe.brgm.fr*

RESUME : De nombreux pays connaissent actuellement un essor des activités minières aurifères sur leur territoire, avec le développement concomitant de mines industrielles et d'activités illégales d'orpaillage artisanal voir semi-industriel. Ces dernières génèrent de nombreux impacts environnementaux et sociaux, dont la gestion mobilise les institutions publiques.

La caractérisation des techniques d'orpaillage et de ses dynamiques spatiales et temporelles constitue donc un enjeu essentiel de surveillance et de régulation, qui nécessite de recueillir différentes informations sur le terrain, sur des sites d'orpaillage souvent difficilement accessibles. Sur la base de deux exemples, nous montrerons l'intérêt dans ce domaine d'une approche basée sur des inspections par drone, à ciel ouvert et en souterrain, couplée à une analyse géologique des gîtes aurifères et à une caractérisation des interactions entre parties-prenantes.

La première étude, menée sur différents sites d'orpaillage en Guyane, nous a permis de caractériser les techniques d'exploitation de l'or par puits et galeries. A l'aide d'un drone équipé d'un LiDAR SLAM temps réel, nous avons réalisé un modèle 3D antimétrique du sous-sol, qui montre la relation entre la structure des filons minéralisés et la géométrie des ouvrages miniers. Nous avons également proposé un modèle dynamique d'exploitation, grâce à une re-visite de certains ouvrages, qui montre une maîtrise par les orpailleurs illégaux des techniques de soutènement, couplée à une logique d'optimisation des déplacements de matériaux (utilisation du stérile pour le remblayage).

La seconde étude, menée en Côte d'Ivoire, sur un permis en cours d'exploration par une compagnie minière, a permis de comprendre l'organisation sur site, en utilisant les données de surveillance de la compagnie et des observations sur le terrain. Nous montrons que l'exploitation et la valorisation de différents types de minerais est structurée en chaînes de production autonomes, avec une division fonctionnelle de l'espace impliquant un système de transport entre différents sites dévolus à des tâches spécialisées.

ABSTRACT : Many countries are currently experiencing a boom in gold mining activities on their territory, with the concomitant development of industrial mines and illegal artisanal or even semi-industrial gold panning activities.. The latter generate numerous environmental and social impacts, the management of which mobilizes public institutions.

The characterization of gold panning techniques and their spatial and temporal dynamics is therefore a key issue for monitoring, regulation, and/or control, requiring the collection of various information in the field, sometimes without direct access to the gold panning sites. Based on two examples, we will show the value in this field of an approach based on drone inspection, both above ground and underground, coupled with a geological analysis of gold deposits and a characterization of the interactions between stakeholders.

The first study, conducted at various gold mining sites in French Guiana, enabled us to characterize the technique of gold mining using pits and tunnels. Using a drone equipped with real-time LiDAR SLAM, we created a antimetric 3D model of the subsoil, which shows the relationship between the structure of the mineralized veins and the geometry of the mining structures. We also proposed a dynamic mining model, based on a re-visit to certain structures, which shows that gold miners have mastered support techniques, coupled with a logic of optimizing material movements (use of waste rock for backfilling).

The second study, conducted in Côte d'Ivoire on a permit currently being explored by a mining company, provides insight into how gold miners organize themselves, using the company's monitoring data and field observations. We show that the

mining and processing of different types of ore is structured into autonomous production chains, with a functional division of space involving a transport system between different sites dedicated to specialized tasks.

Mots-clés : Orpaillage illégal ; mine artisanale ; ouvrages souterrains ; inspection drone ; techniques d'exploitation.

1 INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, l'augmentation du cours de l'or est à l'origine d'un essor des activités minières associées à son extraction. De nombreux pays dont le potentiel aurifère est reconnu voient ainsi le développement parallèle, sur leur territoire, de projets d'exploitation industrielle et d'activités d'orpaillage artisanal souvent illégaux. Ces dernières, jusqu'à présent peu considérées par les géologues et les géotechniciens du fait de leur petite taille, ciblent non seulement les gisements secondaires traditionnels (placers), exploités à ciel ouvert, mais également les gisements primaires (veines et filons de quartz), exploités en souterrain. Les conséquences locales des mines artisanales sont multiples, avec des impacts sociaux et environnementaux importants, qui requièrent surveillance et régulation. Souvent localisés dans des zones difficilement accessibles (climat tropical et forêts denses), la présence d'ouvrages souterrains peut rendre l'inspection directe d'autant plus complexe. Nous allons donc nous demander en quoi l'utilisation de drones permettant l'acquisition de données visuelles et de données LiDAR (*Light Detection And Ranging*) est adaptée à la caractérisation de sites d'orpaillage illégaux, en particulier en souterrain, où se font jour des enjeux spécifiques de caractérisation du massif rocheux exploité, des structures minéralisées qu'il comporte et de stabilité des ouvrages. Ce travail est mené sur deux zones d'études localisées respectivement en Guyane (sur des sites d'orpaillage illégaux ; Figure 1.a,b) et en Côte d'Ivoire (au voisinage du permis d'exploration d'une compagnie minière privée, dans la région de Tanda). Avec cette étude croisée, nous cherchons à montrer que pour deux territoires éloignés, mais présentant un contexte géologique, climatique et environnemental similaire, il existe un ensemble de caractéristiques communes dans le processus d'extraction et les modes opératoires mis en oeuvre par les orpailleurs, dont l'étude peut être utile à de futurs travaux d'ingénierie géologique et minière

2 ELEMENTS DE CONTEXTE

2.1 Typologie des gisements

Les territoires de la Guyane et de la Côte d'Ivoire sont localisés sur des terrains géologiques anciens d'âge paléoproterozoïque (2.5–1.6 Ga) : respectivement le

Bouclier des Guyanes (*Milesi et al., 1995 ; Milesi & Picot, 1995 ; Théveniaut et al., 2011*) et celui de l'Afrique de l'Ouest (*Milesi et al., 1989 ; Masurel et al., 2022*). Le contexte géodynamique associé à des orogènes accrécionnaires affectant la croûte juvénile (cycle orogénique transamazonien et eburnéen) a été favorable à la mise en place de gîtes aurifères, majoritairement localisés dans des ceintures de roches vertes (séries de roches volcano-sédimentaires métamorphosées au faciès schiste vert ; Figure 1.a) associées à des zones à fortes contraintes structurales.

A partir du Cénozoïque, ces territoires ont été soumis à un climat tropical humide et ont développé d'épais profils d'altérations (*Fookes, 1997*). Les processus physico-chimiques associés ont abouti à la mise en place de gîtes aurifères superficiels en terrains relativement meubles, constituant des cibles à haut potentiel pour les orpailleurs (Figure 1.c). On distingue classiquement les gîtes primaires, pas ou peu affectés par les processus d'altération, des gîtes secondaires éluvionnaires (oxydation prononcée en surface des gisements primaires) et colluvionnaires/alluvionnaires (concentration par érosion, transport et dépôt des matériaux rocheux minéralisés sous forme de sables, graviers et galets).

2.2 L'orpaillage illégal en Côte d'Ivoire et en Guyane

En Côte d'Ivoire, la réforme du code minier de 2014 a favorisé l'acquisition de titres miniers par les compagnies d'exploration et d'exploitation. Les découvertes de gisements, couplées à l'instabilité géopolitique dans la région du Sahel, ont impulsé en parallèle la migration d'orpailleurs, principalement d'origine Burkinabé, vers le territoire ivoirien. Leurs techniques d'exploitation permettent la valorisation des gîtes primaires oxydés grâce à la mise en place d'un système socio-économique tissé avec les villages, en parallèle d'une activité d'extraction traditionnelle des gîtes alluvionnaires. L'utilisation de tricycles permet le transport du minerai jusqu'à quelques kilomètres, depuis les sites d'extraction vers les sites de traitement ayant souvent recours à l'utilisation du cyanure pour la lixiviation de l'or dans des bassins.

En Guyane, avec l'épuisement progressif des gisements d'or alluvionnaires (*Milesi & Picot, 1995*), les orpailleurs illégaux (*garimpeiros*) ciblent à présent les gisements primaires oxydés, exploités en souterrain au moyen de puits et de galeries (Figure

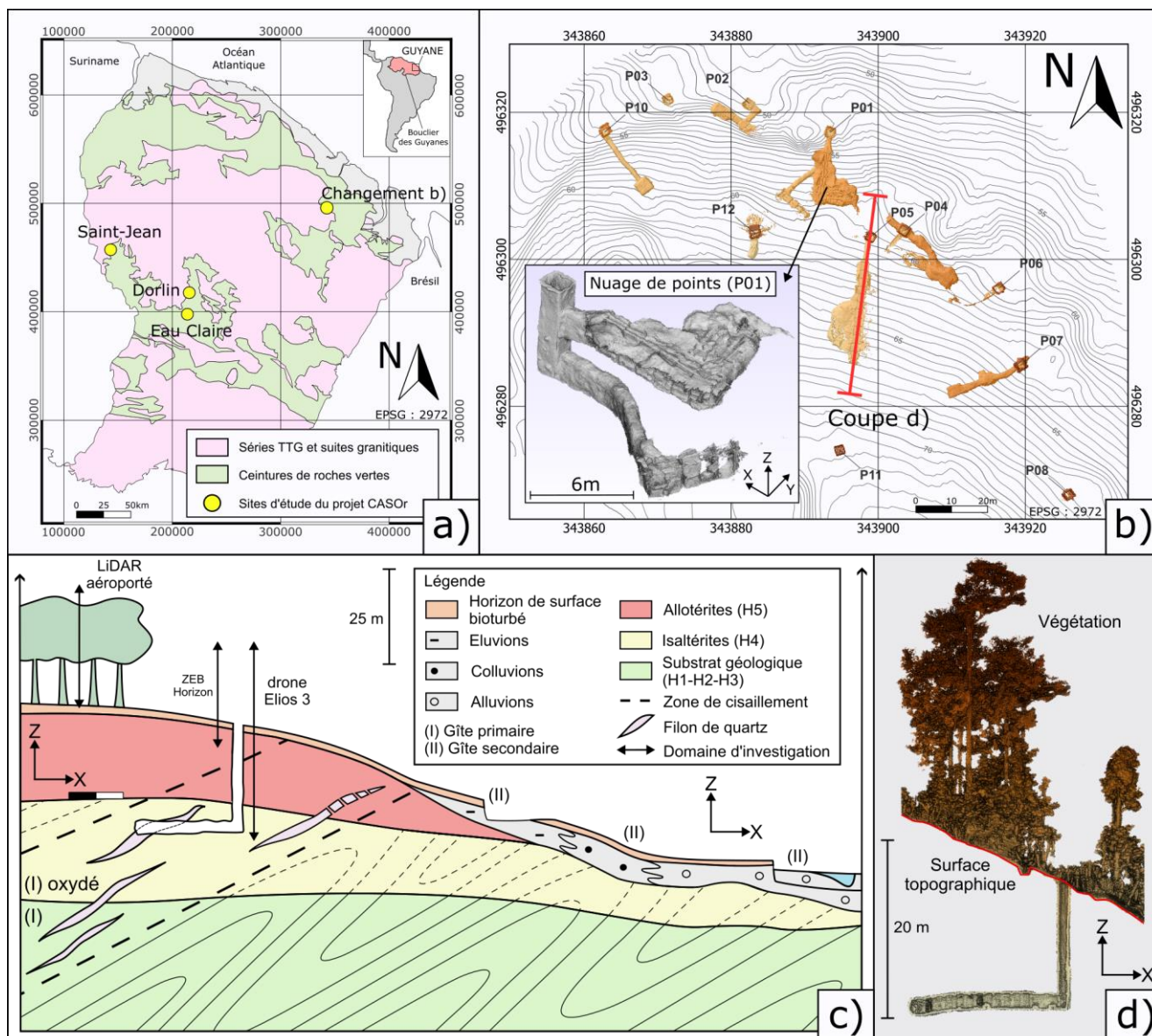


Figure 1. a) Carte géologique simplifiée de la Guyane (modifiée d'après Milési & Picot, 1995) et localisation des sites d'orpaillage étudiés, b) Cartographie des ouvrages sur le site de Changeement, c) Coupe schématique d'un profil d'altération dans une ceinture de roches vertes en contexte inter tropical et relation entre la localisation des ouvrages et l'expression des gîtes superficiels, d) Coupe au travers du nuage de points 3D associé à l'inspection de l'ouvrage P05.

1.c). Un site d'orpaillage est généralement composé de plusieurs ouvrages (Figure 1.b) qui donnent à voir les différentes étapes de récupération de l'or, depuis les travaux d'extraction (pour l'essentiel manuellement à l'aide de petits marteaux-piqueurs) jusqu'aux différents postes de traitement du minerai, associant le concassage et la récupération de l'or au moyen de *sluices* (table de lavage utilisant la séparation gravimétrique) et de mercure. La publication du rapport Taubira (2000) a impulsé la mise en place d'un plan stratégique de lutte contre l'orpaillage illégal (LCOI). Depuis 2019, l'EMOPI (Etat Major de lutte contre l'Orpaillage et la Pêche Illicites) assure notamment le pilotage de l'Observatoire de l'Activité Minière (OAM) qui rassemble l'ensemble des acteurs

impliqués dans la LCOI, dont la gendarmerie et les Forces Armées de Guyane (FAG). Cet observatoire permet d'assurer un suivi des activités par la centralisation des informations de terrain et par l'acquisition de données satellitaires et aéroportées.

Dans l'optique d'approfondir les connaissances sur les sites d'orpaillage illégaux en Guyane et d'apporter des éléments techniques aux services de l'Etat sur la caractérisation de ces sites, un projet -CASOR (Cartographie et caractérisation des Sites d'Orpaillage illégaux)-, financé par la DGALN (Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature du ministère en charge de la transition écologique) et coordonné par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) en partenariat avec

l'EMOPI, a été initié en 2023. Dans ce contexte, plusieurs missions ont été réalisées avec le soutien des forces armées sur différents sites d'orpaillage (Changement, Dorlin, Eau Claire, Saint-Jean), où des campagnes de cartographie aérienne de résolution décimétrique et d'inspection 3D des ouvrages souterrains ont été menées, afin de mieux comprendre l'organisation et les modes opératoires d'exploitations sur ces zones à enjeux (Chevallard *et al.*, 2023 ; Dewez *et al.*, 2024 ; Figure 1.b,d).

2.3 Enjeux de surveillance et d'analyse des pratiques des orpailleurs

L'étude des activités d'orpaillage est associée à de multiples enjeux. De manière globale, une meilleure compréhension de leur dynamique permet l'optimisation des méthodes de surveillance et de répression, dans l'optique de réduire leurs impacts sociaux et environnementaux. En Guyane, la caractérisation des techniques souvent très minutieuses de creusement et de soutènement utilisées par les garimpeiros va en outre permettre d'évaluer la faisabilité géotechnique de petites mines souterraines légales. En effet, le comportement hydrogéomécanique des terrains guyanais étant très mal caractérisé, les ouvrages clandestins offrent un exceptionnel retour d'expérience, en vraie grandeur, sur la stabilité des vides souterrains et leur évolution dans le temps; que des moyens de caractérisation géotechniques classiques ne permettraient que difficilement d'établir.

3 ACQUISITION DES DONNEES

3.1 Inspection des sites et référencement des ouvrages

En Côte d'Ivoire comme en Guyane, un site d'extraction d'un gîte primaire oxydé est souvent constitué de plusieurs ouvrages souterrains, localisés sur des versants ou en sommet de plateaux (Figure 1.b, 1.c). Plusieurs types d'« ouvrages » peuvent être distingués : des puits, des galeries, des tas de minerai ainsi que des zones de traitement du minerai, relativement proches des zones d'exploitation, regroupant concassage et extraction de l'or. Sur chacun des sites investigués, les coordonnées des têtes de puits et des tas de minerai ont été relevées, afin d'alimenter une base de données SIG permettant de visualiser leur distribution spatiale. Par ailleurs, les acquisitions LiDAR, au sol ou en souterrain, ont été géoréférencées dans un système de coordonnées commun, permettant de préciser la pérennité des

ouvrages lors des contrôles successifs sur un site donné.

3.2 Scans 3D au sol

En Guyane, des acquisitions par scanner laser mobile portatif (modèle ZEB HORIZON, fabriqué par GeoSLAM ; Figure 1.c, 2.a), ont été réalisées pour effectuer des scans 3D de la surface. Plusieurs cheminements d'acquisitions ont été réalisés afin de couvrir la totalité des sites et de relier entre eux les différents ouvrages souterrains. Les données acquises vont relever la topographie, la végétation, ainsi que les constructions et le matériel utilisés par les orpailleurs (abris, bancs, chèvre de puits, outils). Ces levés ont été géoréférencés à une exactitude infra-métrique, à l'aide de cibles occupées pendant plusieurs dizaines de minutes et post-traitées par GNSS PPK. Les acquisitions 3D en surface constituent ainsi une référence sur laquelle sont alignées les acquisitions réalisées en souterrain, permettant ainsi de disposer d'un ensemble de données géoréférencées et d'apprécier la position relative des ouvrages à l'échelle du site.



Figure 2. Photographies du matériel d'acquisition, a) GeoSLAM ZEB HORIZON (acquisitions de surface), b) Drone Elios 3 (acquisitions en souterrain, en puits et en galeries).

3.3 Inspections et scans 3D souterrains par drone

Le système de drone Flyability Elios 3 (Figure 1.c, 2.b), utilisé pour l'inspection des ouvrages en Guyane, est conçu pour voler en souterrain avec pilotage déporté en surface. Le drone embarque une caméra vidéo avec éclairage modulable et un LiDAR SLAM temps réel, le tout transmis en direct sur la console du télépilote (Figure 3). Ces flux de données enregistrent des vidéos le long de la trajectoire parcourue qui figent l'état de l'ouvrage avec ses propriétés (géométrie, texture) et son équipement (outils, éclairage, soutènement). Le LiDAR produit

des scans des ouvrages sous forme de nuages de points 3D, à résolution infra-centimétrique, qui donnent accès à la géométrie des vides souterrains avec suffisamment de précision pour interpréter la texture de la roche, déterminer la présence et la géométrie des filons (donc faire des analyses géologiques), la position et les dimensions des boisages (donc analyser les pratiques minières), ainsi que les positions relatives des différentes exploitations entre elles à l'échelle du site.

L'interprétation visuelle conjointe des données vidéo et des nuages de points permet ainsi de proposer une méthode de caractérisation intégrée des ouvrages souterrains, dont la rétro-analyse renseigne sur les propriétés géotechniques des terrains. La complétude des levés est restreinte aux zones atteignables par le drone, dont la section et la portée radio sont des facteurs limitants. Les nuages 3D correspondent donc aux volumes explorables et non à l'extension totale des ouvrages souterrains inspectés.

4 TRAITEMENT DES DONNÉES

4.1 Présentation des données

En Côte d'Ivoire, la surveillance concerne des zones orpaillées plutôt que des ouvrages précis, pouvant atteindre plusieurs kilomètres carrés d'extension. Sur le permis minier de Tanda, les sites d'orpaillage gravitent autour des villages, espacés de quelques kilomètres, qui supervisent les activités. Le décapage de la latérite autour du gisement ciblé par la compagnie minière titulaire du permis favorise la mise en place de sites d'extraction à l'intérieur et autour du permis. En réponse, la compagnie effectue des contrôles périodiques sur les sites susceptibles d'interférer avec son projet minier depuis 2022. Le dénombrement systématique du nombre d'orpailliers, du matériel sur place et du type de site (appuyé par de l'imagerie aérienne par drone) constitue une base d'observations dont l'interprétation permet de définir les types de sites d'orpaillage, basé sur leur fonction au sein de la chaîne de traitement du minerai.

En Guyane, les investigations ciblées sur plusieurs sites en activité ont permis de réaliser une analyse de détail. Cet article se restreint au traitement des données acquises sur le site de Changement et d'Eau Claire (Figure 1.a,b). Changement a été levé à plusieurs reprises ce qui permet une analyse dynamique des travaux d'exploitation (voir Tableau 2).

4.2 Méthode d'analyse des ouvrages souterrains en Guyane

La méthode mise en place est basée sur l'utilisation conjointe des données vidéo et des données LiDAR acquises en surface et en souterrain (Figure 1.c,d). Les vidéos issues du drone constituent le support des premières observations (Figure 3).

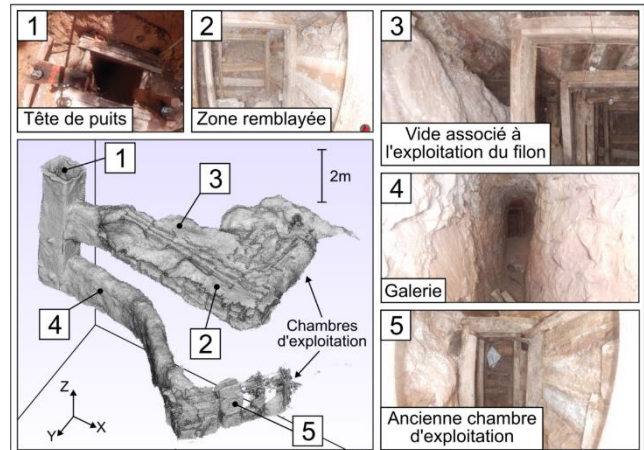


Figure 3. Inspection des ouvrages souterrains par drone: couplage entre l'acquisition de données visuelles et de données LiDAR.

Dans les puits, les zones boisées et les entrées de galeries sont recensées. Sur les parois des galeries, l'attention est portée sur l'identification du soutènement et sur la présence de marqueurs structuraux (plans de fractures, schistosité, filonnets et filons). Vient ensuite la comparaison entre les ouvrages, pour en extraire des caractéristiques communes et montrer la diversité des travaux d'exploitation, généralement simples mais très soignés. Sur le site de Changement, nous avons plus spécifiquement étudié les marqueurs d'instabilité géotechnique (déformation du boisage, rejeu de fractures, etc.) ainsi que le déplacement de volumes de minerai ou de stérile, du fait de l'activité des garimpeiros.

Les levés LiDAR de surface ont été utilisés comme support pour le géoréférencement des ouvrages scannés par le drone et ont été exploités pour produire des MNT locaux d'une résolution de 20 cm (Figure 1.b). La portion du nuage associée à l'ouvrage est filtrée puis sous-échantillonnée en amont de la phase de traitement. Il est ensuite possible de mesurer des distances dans l'environnement de traitement et de déduire les dimensions des ouvrages (profondeur des puits, hauteur, largeur et longueur des galeries). Cette méthode s'applique également à l'estimation des dimensions du boisage (taille et espacement des cadres). Le calcul d'enveloppes de Poisson (modèles maillés « étanches »), à partir des nuages de points de chaque ouvrage, permet d'estimer leur volume de vide.

Pour les ouvrages ayant été inspectés à plusieurs reprises sur le site de Changement, une estimation des volumes excavés et remblayés a été réalisée (Figure 4). La résolution des nuages de points permet l'identification d'excroissance dans les chambres d'exploitation, correspondant à l'exploitation des filons identifiés par la visualisation des images. Il est donc possible dans certains cas de faire une étude structurale indirecte et d'estimer l'orientation des filons (voir Figure 7).

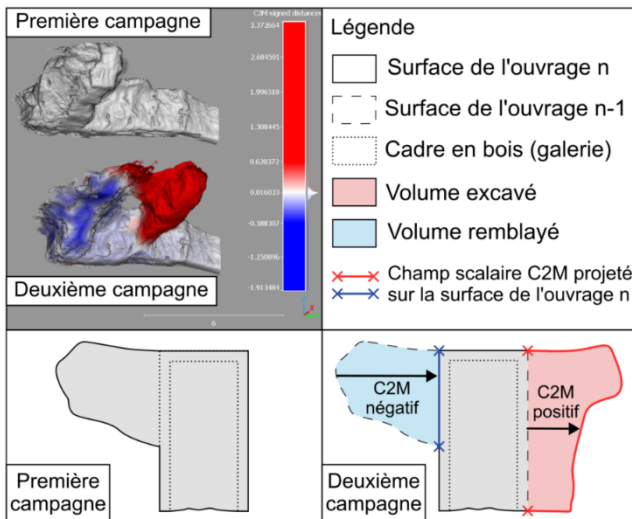


Figure 4. Méthode d'estimation des volumes de matériel rocheux excavé et remblayé entre deux campagnes d'acquisition (C2M : distance entre un nuage de points et une surface maillée).

5 CARACTÉRISATION DES TECHNIQUES D'ORPAILLAGE

5.1 En Côte d'Ivoire, caractérisation du mode de travail des orpailleurs à l'échelle du site

Sur le permis de Tanda, les sites d'orpillage s'organisent autour des villages en chaînes de traitement aurifère autonomes (Figure 5), depuis les sites d'extraction vers les sites de traitement, impliquant le transport du minerai avec des tricycles motorisés. La nature du minerai conditionne le niveau de mécanisation et les techniques d'exploitation

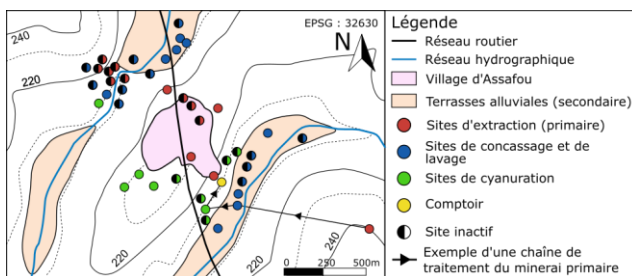


Figure 5. Cartographie des sites d'orpillage autour du village d'Assafou et organisation en chaînes de traitement.

associées. L'accès à l'eau est un prérequis pour l'installation des sites de concassage et de lavage (traitement du minerai par voie humide ; Figure 5).

5.2 En Guyane, caractérisation du mode opératoire d'exploitation

En comparaison avec le site de Changement, les ouvrages du site d'Eau Claire présentent des puits plus profonds ($23.8 \pm 5.3m$ contre $10.4 \pm 5.5m$), avec une section carrée d'environ $1.1 \pm 0.1m$ de côté. Les puits donnent accès à une ou plusieurs galeries horizontales, de section rectangulaire ($1.7 \pm 0.3m$ en hauteur par $0.7 \pm 0.1m$ en largeur). La longueur est variable, et les galeries sont parfois étagées sur plusieurs niveaux guidés par la géométrie des filons. L'altitude des têtes de puits est variable, dépendamment de la topographie, tandis que les galeries sont souvent creusées à la même altitude ($47.2 \pm 2.5m$ pour Changement, $202 \pm 4.3m$ pour Eau-Claire). Celles-ci débouchent parfois sur des chambres d'exploitation où le minerai est extrait. Les chambres ont des géométries uniques et plusieurs galeries présentent des ramifications conduisant à des fronts de taille, des zones de remblai ou plus rarement à des bures (puits internes ne débouchant pas à la surface et reliant deux niveaux de galeries).

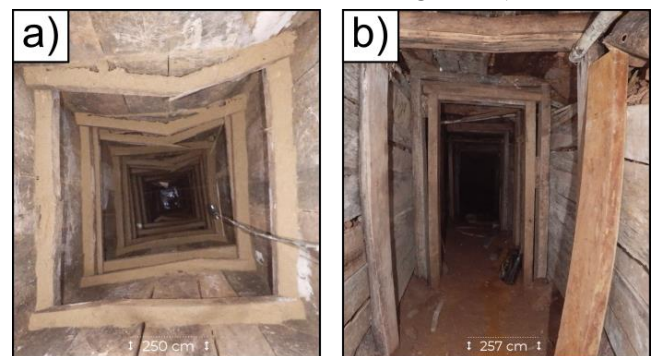


Figure 6. Photographies par drone montrant en a) la déformation des cadres dans un ancien puits et en b) les travaux de reprise des orpailleurs (doublage d'un cadre dans une galerie).

Les puits peuvent être partiellement voire totalement boisés, avec un coffrage (cadres ; Figure 6.a) et un garnissage (planches ; Figure 6.b). Pour les galeries, le boisage est localisé préférentiellement au niveau des zones exploitées (anciennes et actuelles). La section des cadres en bois utilisés dans les puits est standardisée ($6 \times 8cm$), avec un espacement de $0.6 \pm 0.2m$. Il en va de même pour les cadres des galeries ($10 \times 25cm$), espacés de $1.1 \pm 0.1m$. Dans les galeries, le garnissage au niveau du chapeau est courant tandis qu'il n'est pas systématique au niveau des montants, selon le grade d'altération des terrains traversés (les allotérites sont moins compétentes que les isaltérites ; Figure 1.d). Les nuages de points

montrent qu'il existe des vides en arrière des planches, suggérant la présence de cavités partiellement remblayées. Les données LiDAR couplées aux observations visuelles nous permettent de préciser la nature des vides identifiés, en définissant trois catégories :

- Hors profils involontaires ;
- Vides associés à des chambres d'exploitation non remblayées ;
- Vides résiduels associés au remblayage partiel.

Sur les sites étudiés, plusieurs ouvrages présentent des travaux de rénovation comme des coffrages au niveau des têtes de puits (Figure 6.a) ou une reprise des cadres dans les galeries (Figure 6.b). Les bois dégradés dans certains ouvrages sont souvent accompagnés d'une déformation voire une rupture des cadres (Figure 6.a). L'analyse conjointe des nuages de points et des données vidéo a également permis d'estimer le pendage des filons minéralisés, visibles en puits et en galerie (Figure 7.a). Sur le site de Changement, la mise en correspondance des plans structuraux entre les puits et les galeries adjacentes montre qu'il s'agit vraisemblablement d'une structure minéralisée commune, reconstituée sur l'ensemble du gisement (Figure 7.b). Cette reconstruction n'est réalisable qu'en dehors des sections de galeries présentant un garnissage masquant le matériel rocheux.

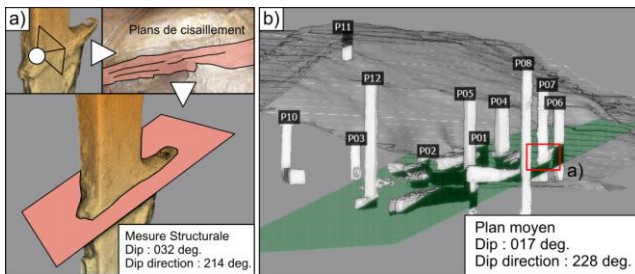


Figure 7. a) Estimation de l'orientation d'une structure au sein d'un ouvrage, b) Relation spatiale entre la géométrie des ouvrages et l'orientation de la structure filonienne du site de Changement, pendant vers le SW.

5.3 Estimation du volume des ouvrages

5.3.1 Résultats par campagne

L'estimation du volume par cubage du maillage de Poisson a été appliquée à l'ensemble des ouvrages de Changement et d'Eau-Claire. Les volumes de vide sont très hétérogènes, traduisant la singularité de chaque ouvrage (profondeur du puits, accessibilité des galeries lors des inspections, nombre de galeries, de chambres, de ramifications). A partir de ces résultats, il est donc possible d'estimer le volume moyen des différents ouvrages, soit $30m^3$ pour le site de Changement et $50m^3$ pour le site d'Eau-Claire, ainsi

que le volume total de vides souterrains par site (Tableau 1).

Tableau 1. Estimation du volume total de vide souterrain exploré pour trois sites orpaillés.

Site	V puits (m3)	V galeries (m3)	V total (m3)
Changement	194.6	224.7	419.3
Eau Claire #01	549.2	135.3	684.5
Eau Claire #02	175.5	138.2	313.7

5.3.2 Étude comparative des volumes de vide sur le site de Changement

Dans le cadre du projet CASOr, trois campagnes d'acquisition ont été réalisées sur le site de Changement, permettant une analyse du développement des ouvrages au cours du temps (Tableau 2). Quatre ouvrages ont ainsi pu être réinspectés à 10 jours et 1 an d'intervalle. La comparaison des nuages de points issus des campagnes successives a permis d'estimer le volume de roche excavée et remblayée. On y illustre une optimisation systématique de l'extraction du minerai, avec le recyclage du stérile utilisé comme remblai dans les anciennes chambres d'exploitation et les galeries improductives.

Tableau 2. Etude comparative des volumes excavés et remblayés pour les ouvrages du site de Changement.

Campagne	Volume (m3)	P01	P05	P11	P12
C01	Total	35.3	51.2	4.4	26.6
C02	Total	33.8	53.7	12.9	45.9
C02	Excavé	7.5	12	8.5	19.0
C02	Remblayé	9.0	9.5	0.0	0.0
C03	Total	X	45.6	55.0	24.7
C03	Excavé	X	11.3	42.1	0.0
C03	Remblayé	X	19.3	0.0	21.2

* Campagnes : C01 (2023-10-07), C02 (2023-10-17), C03 (2024-04-04)

6 DISCUSSIONS

6.1 Enseignements tirés de l'analyse des ouvrages souterrains en Guyane

L'étude des ouvrages souterrains en Guyane nous apporte des éléments supplémentaires de compréhension des techniques d'exploitation. Les inspections par drone renseignent sur la nature et le mode opératoire d'exploitation des différents gîtes tout en permettant de conduire des caractérisations géotechniques indirectes. On note en particulier que les petites galeries boisées sont presque toujours stables à court terme (quelques mois) même si le terrain est géotechniquement médiocre. En revanche, elles se dégradent en peu d'années (écaillage des parois, cloches d'éboulement au toit) si un boisage

n'est pas rapidement mis en place au plus près du terrain pour éviter sa décompression.

6.2 Perspectives

En Guyane, l'alimentation de la base de données par des inspections complémentaires sur de nouveaux sites d'orpaillage pourra apporter des éléments supplémentaires de compréhension des techniques d'exploitation en souterrain. Nous soulignons également l'intérêt de pouvoir appliquer cette méthode sur d'autres territoires, en particulier dans des zones où l'activité artisanale est fortement développée, notamment en Afrique de l'Ouest et où des études comparatives à la lumière des caractéristiques communes observées pourraient être réalisées. Au-delà de l'exploitation aurifère, des mesures LiDAR de surface et de sub-surface pourraient être déployées sur d'autres substances exploitées artisanalement (W, Sn, Nb-Ta, etc) et/ou sur d'anciens sites miniers non accessibles en l'état et dont l'approche proposée ici pourrait permettre de réévaluer leur potentiel et de caractériser l'état des ouvrages souterrains. De manière générale, la fusion des deux modalités d'acquisition (images et LiDAR) augmenterait encore davantage leur valeur informative.

7 CONCLUSION

L'utilisation d'outils donnant accès à des données spatialisées de résolution inframétrique offre une nouvelle approche dans la caractérisation des sites d'orpaillage illégaux. En Guyane, l'exploitation des scans 3D en surface et en souterrain, couplant l'interprétation conjointe des enregistrements vidéo et LiDAR, ont permis une compréhension intégrée des modalités d'exploitation et des techniques de soutènement. La compartimentation des ouvrages témoigne d'un savoir-faire et d'une logique d'optimisation pour l'extraction du minerai. A l'échelle du site, en particulier sur Changement, la géométrie des ouvrages a montré une parfaite cohérence avec l'expression de la minéralisation en profondeur. En Côte d'Ivoire, l'exploitation des données de surveillance aide à comprendre les dynamiques de l'orpaillage en surface, avec des sites spécialisés et structurés en chaînes de production.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leurs remerciements à la DGALN pour le financement du projet CASOr, ainsi qu'à l'EMOPI et aux Forces Armées de Guyane pour leurs contributions dans le cadre de ce projet. Ils

remercient également MM. Philippe Kister et Laurent Alegre (Endeavour Mining) pour leur contribution au volet de l'étude concernant la Côte d'Ivoire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chevillard M., Yart S., Masson F., Dewez T., Rivera L., Linares S. & Collignon M (2023). CASOr – Compte-rendu de mission de l'intervention sur le site d'orpaillage illégal de Changement. Rapport BRGM/RP-73164-FR.
- Dewez T.J.B., Linares S., Yart S., Masson F., Collignon M., Rivera L., Bedeau C. & Chevillard M (2024). Mapping gold mines under the French Guiana rainforest: return of experience with different mobile lidar systems, in: EGU General Assembly Conference Abstracts. Presented at the EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, pp. EGU24-15904. hal-04508900
- Fookes, P. G. (1997). Geology for engineers: the geological model, prediction and performance. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30(4), 293-424.
- Masurel Q., Eglinger A., Thébaud N. *et al.* (2022). Paleoproterozoic gold events in the southern West African Craton: review and synopsis. *Miner Deposita* 57, 513–537. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01052-5>
- Milési J.P., Feybesse J.L., Tegyey M., Calvez J.Y., Lagny P., Ledru P., Dommanget A., Ouedraogo M.F., Marcoux E., Prost A., Vinchon C., Sylvain J.P. & Johan V (1989). Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. Leurs relations avec l'évolution lithostructurale au Paléoprotérozoïque. *Chronique de la recherche minière*, 497, p.3-98.
- Milési J.P., Egal E., Ledru P., Vernhet Y., Thieblemont D., Cocherie A., Tegyey M., Martel-Jantin B., Lagny P & Lerouge C (1995). Les minéralisations du Nord de la Guyane française dans leur cadre géologique. *Chronique de la recherche minière*, 518, 58 p.
- Milési J.P. & Picot J.C. (1995) – L'or en Guyane Française : contexte et potentiel géologiques. Rapport final. BRGM/RR-38517-FR, 31 p.
- Taubira C. (2000). L'or en Guyane : éclats et artifices, [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.vie-publique.fr/rapport/24531-lor-en-guyane-eclats-et-artifices>, consulté le : 19/11/2025.
- Théveniaut H., Billa M., Cassard D., Delor C. & Maldan F (2011). Le plateau des Guyanes et son potentiel minier. *Géosciences*, 14, pp.60-67. hal-00662117