



Master 2 Santé publique – Parcours METEORES

Promotion : **2022-2023**

Date du Jury : **Septembre 2023**

Analyse globale des expositions des orpailleurs et des populations vivant à proximité.

Discussion autour d'un protocole d'évaluation des effets sanitaires

Perry LUMONO KIOTAMWINI

Référente professionnelle : Michele LEGEAS

Référente pédagogique : Pauline ROUSSEAU-GUEUTIN

Remerciements

Je remercie Michèle LEGEAS, référente professionnelle pour son encadrement et confiance qu'elle m'a témoignée.

Je remercie le personnel de l'EHESP, en particulier Pauline ROUSSEAU-GUEUTIN, référente pédagogique, Laurence HOUARI, Aliénor VIVION et Anne ROCHER et les enseignants chercheurs du parcours METEORES.

Je remercie l'Open Society Foundation de m'avoir redonné l'opportunité de poursuivre ce master en santé publique.

Je remercie Xavier CAHN de m'avoir aidé pour la relecture de ce travail.

Sommaire

Introduction	1
I. ANALYSE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE L'ORPAILLAGE, EMISSIONS ET CONDITIONS DE VIE	7
I.1 L'EXTRACTION DE L'OR ARTISANAL ET LES EMISSIONS ASSOCIEES 	7
I.2 LE PRETRAITEMENT DE L'OR ARTISANAL ET LES EMISSIONS ASSOCIEES	13
I.3 CONDITIONS PRECAIRES DE VIE ET EXPOSITION AUX AGENTS BIOLOGIQUE	16
II. SCHEMA CONCEPTUEL DES EXPOSITIONS ET RISQUES SANITAIRES.....	19
II.1 INVENTAIRE DES MOLECULES/AGENTS, SCHEMA DE TRANSFERT ET EFFETS SANITAIRES	20
II.2 ANALYSE DES DIFFERENTES VOIES D'EXPOSITION AUX SUBSTANCES DANGEREUSES	37
II.3 SCHEMA CONCEPTUEL DES EXPOSITIONS	40
II.4 SYNTHESE DU CHAPITRE	41
III. DISCUSSION AUTOUR D'UN PROTOCOLE PRENANT EN COMPTE LES EFFETS SANITAIRES GLOBAUX	45
III.1 PLAIDOYER D'UNE ETUDE SANITAIRE PRENANT COMPTE LA MULTI- EXPOSITION	45
III.2 DEMARCHES DE LA REALISATION DE CETTE ETUDE	46
Limites	56
Conclusion	57
Bibliographie	61
Liste des annexes	I

Liste des sigles utilisés

ACFAS	Association Canadienne-Française pour l'Avancement des Sciences
AFSSA	Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
AFSSET	Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
EHESP	Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique
EMA	Exploitation Minière Artisanal
EPA	Environmental Protection Agency
EQRS	Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires
ETM	Elément-Trace Métallique
INERIS	Institut National de l'Environnement et des Risques
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
MPOC	Maladie Pulmonaire Obstructive Chronique
MRNF	Ministère Des Richesses Naturelles Et Des Forêts De l'Ontario
NTA	Acide Nitrotriacétique
OMS ou WHO	Organisation Mondiale de la Santé
ONUDI	Organisation des Nations unies pour le Développement Industriel
PIB	Produit Intérieur Brut
PNUE ou UNEP	Programme des Nations Unis pour l'Environnement
PwC	PricewaterhouseCoopers
RDC	République Démocratique du Congo
TSH	Thyroid-Stimulating Hormone
VLEP	Valeur limite d'exposition professionnelle
VTR	Valeur Toxicologique de Référence
WWF	World Wide Fund for Nature
2IE	Institut International de l'Ingénierie, de l'Eau et de l'Environnement

Liste des figures et tableaux

Figures

Figure 1 : Photo d'une mine artisanale de Tiébélé au Burkina Faso	10
Figure 2 : Cycle biogéochimique du Hg en relation avec les activités d'orpaillage en Guyane....	21
Figure 3 : Distribution et des composés de l'Arsenic	23
Figure 4 : Distribution du cyanure et interactions	28
Figure 5 : Distribution des acides et interactions	31
Figure 6 : schéma conceptuel des expositions.....	41

Tableaux

Tableau 1 : Substances émises et matériels utilisées pour l'orpaillage des roches excavées....	15
Tableau 2 : Substances émises et matériels utilisées pour l'orpaillage des rivières	16
Tableau 3 : Toxicités des composés du mercure	22
Tableau 4 : Toxicités des composés de l'Arsenic	24
Tableau 5 : Toxicité du cyanure et ses composés	30
Tableau 6 : Substances émises, complexes formés et effets sanitaires connus	43
Tableau 7 : Avantages et inconvénients de trois méthodes d'évaluation sanitaire	55

Introduction

0.1 CONTEXTE

Les premières exploitations connues et décrites de l'or se passent au néolithique, en Egypte. Elles sont essentiellement très rudimentaires. Il faut attendre jusqu'en 1901 et la ruée vers l'or pour voir se développer les prémices des techniques modernes de l'extraction du précieux métal (London, 2012).

Au fil des années et avec la rareté, les techniques d'exploitation des mines d'or ont pu bénéficier des avancées chimiques et technologiques. C'est ainsi que l'exploitation aurifère est passée des techniques dites "traditionnelles" aux pratiques plus sophistiquées et industrielles (Ouédraogo, 2020).

Cette évolution technologique a permis d'augmenter la productivité de l'or et de soutenir les économies de plusieurs pays dans le monde.

En 2012, selon les études publiées par le cabinet PwC, « *l'industrie aurifère aurait généré directement plus de 210 milliards de dollars dans le monde, une contribution à peu près comparable au PIB de l'Irlande, de la République tchèque ou de Pékin* » (PwC, 2012).

L'exploitation aurifère crée également de nombreux emplois. Dans le cadre artisanal, elle peut aussi représenter une excellente opportunité de création des richesses pour les communautés rurales (Artisanal Gold Council, 2014).

Malheureusement, cette exploitation serait aussi associée à des impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine.

En effet, de l'extraction au traitement de l'or, les éventuels effets sur la santé des travailleurs, mais également la population vivant à proximité de ces activités se sont avérés néfastes comme le montrent des nombreuses études.

Cette affirmation est particulièrement encore plus réelle dans le cas d'une exploitation artisanale où par ailleurs des normes élémentaires de santé et sécurité ne sont pas respectées (Artisanal Gold Council, 2014 ; Bohbot, 2017).

Un rapport de WWF France de 2018 sur l'orpaillage illégal en Guyane révèle que « *sur la base d'une production illégale estimée à 10 tonnes d'or, de l'ordre de 13 tonnes de mercure seraient annuellement déversées dans les cours d'eau guyanais. Cette contamination a de graves*

conséquences sanitaires pour les populations de l'intérieur du fait de la bioaccumulation du méthylmercure le long des chaînes alimentaires » (WWF, 2018).

Une étude réalisée en 2015, montre que les populations locales du Haut-Maroni (proche à l'activité de l'orpaillage), particulièrement des femmes enceintes et des enfants, avaient des concentrations en mercure quatre fois plus élevées que chez les populations du littoral (WWF, 2018).

Au Burkina Faso, quatrième producteur africain d'or, une étude transversale en 2018 sur un échantillon de cinquante (50) personnes ayant séjourné dans différents sites aurifères artisanaux de Ouagadougou pendant au moins 3 mois, a révélé que l'anémie a été notée chez quarante-six (46) d'entre eux, l'insuffisance rénale était chronique chez quarante-cinq (45). L'hémodialyse a été détectée chez quarante-trois (43) patients. Trente-deux (32) patients sont décédés. La période de l'étude allait du 1^{er} février 2013 au 31 mars 2018 (Sanou et al., 2019).

Un autre auteur, Bohbot, en 2017, mentionne des fumées à Ouagadougou qui « empoisonnent les orpailleurs, mais aussi leurs familles vivant à proximité des lieux de travail » (Bohbot, 2017).

Outre le mercure cité précédemment, le cyanure, de plus en plus utilisé dans l'orpaillage, représente également un danger sanitaire. Un rapport du Ministère de l'Environnement et Développement Durable burkinabé, datant de 2013, atteste ceci : « *bien qu'il permette en effet le traitement d'une plus grande quantité de minerai... le cyanure constitue toutefois un poison particulièrement dangereux, il est volatil et très nocif pour la santé. Il pollue d'importantes quantités d'eau et de surfaces de sols lors de son utilisation sur les sites d'orpaillage* » (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, MEDD Burkina Faso, 2013).

Si les expositions au mercure et au cyanure sont citées dans plusieurs travaux scientifiques comme les principaux composés toxiques pour la santé humaine à prendre en compte du fait de leur utilisation en grande quantité et dans presque tous les sites d'orpaillage du monde, il existe bien d'autres substances qui entrent en jeu et sont associées à cette pratique.

Est avérée l'utilisation de plus en plus massive d'explosifs dangereux à Misisi en République Démocratique du Congo (Nkuba et al., 2021), d'acides sulfuriques ou nitriques, de copeaux de zinc, d'huiles moteur usagées et de détergents au Burkina Faso (Kahitouo, 2012) ou encore des rejets d'hydrocarbures et de plomb en mer, en Guyane, etc. On compte à ce jour des milliers des substances chimiques et toxiques associées aux activités de l'orpaillage artisanal.

Les conclusions des travaux d'Ugo LAPOINTE, écologiste québécois et porte-parole de la coalition Meilleure Mine, présentées au Congrès de l'ACFAS-2006 de l'Université McGill, Montréal, le 18 mai 2006, affiche un rapport accablant. Au Québec, l'ensemble des quelque

cinquante (50) mines qui produisent des métaux et des matériaux industriels, tels que l'or, le cuivre, le fer et l'amiante, génèrent près de 100 millions de tonnes de rejets de métaux chaque année. L'exploitation de l'or est championne, car ayant des teneurs les plus faibles de toute l'industrie extractive, il ramène le plus de rejets. Ce rapport cite également d'énormes quantités de rejets de CO₂, jusqu'à 22 000 litres d'eau utilisés/tonnes d'or produite, un drainage acide et une contamination au cyanure (Lapointe, 2006).

Ces chiffres sont corroborés par cet exemple du Niger où après analyse des eaux usées de l'orpaillage du site de Komabangou, il a été trouvé des concentrations de l'ordre de 24,29 mg/l en As, 83,22 mg/l en Hg, 3,88 mg/l en Pb et 7859,00 mg/l en Zn et dans les eaux de surface. Des valeurs qui démontrent une contamination par les activités d'orpaillage qui dépassent largement les valeurs limites fixées des rejets d'eaux par les autorités nigériennes ou encore par l'OMS. Elles rendent complexe le traitement des eaux pour leur utilisation comme eau de boisson (Abdou Amadou, 2020).

0.2 CADRAGE DU SUJET

L'exploitation aurifère peut-être soit artisanale, appelée aussi l'orpaillage, soit industrielle. Le présent travail sera axé sur l'orpaillage. Ce choix a été motivé par plusieurs aspects :

- Premièrement, la part des exploitations artisanales de l'or n'est pas négligeable et peut atteindre les $\frac{3}{4}$ de la production totale de l'or dans certaines régions, d'après les estimations de la banque mondiale (König, 2019).
- Deuxièmement, celle-ci emploie généralement plus des personnes que l'exploitation industrielle. En 2012, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) a estimé le nombre d'orpailleurs entre 10 et 15 millions, répartis dans plus de 70 pays. Environ 3 millions sont des femmes et des enfants (Artisanal Gold Council, 2015).
- Enfin, Les populations et les orpailleurs sont très exposés dans les exploitations artisanales : D'une part parce que ces techniques restent encore rudimentaires et ne respectent habituellement pas les nouvelles pratiques environnementales et réglementaires, tandis que l'exploitation industrielle de l'or cherche, elle, tant bien que mal à se tourner vers des techniques dites "vertes". D'autre part à cause de la faible proximité des habitations des populations par rapport à ces activités aurifères.

Se focalisant sur l'orpaillage, la revue de la littérature a permis d'identifier deux cas d'orpaillage :

- ✓ Dans le premier, l'or est extrait à partir des roches. C'est le cas par exemple au Burkina

Faso où « l'or ne se trouve pas sous forme de pépite, mais aggloméré aux roches (généralement du quartz). Cette particularité géologique nécessite plusieurs procédés fastidieux et polluants pour dissocier l'or de la pierre » (Bohbot, 2017).

- ✓ Dans le second, les activités de recherche d'or se déroulent dans des alluvions. Le cas des chercheurs d'or en Amazonie et en Guyane où la pratique la plus courante de l'orpaillage reste la quête des pépites dans des rivières.

Bien que ce travail se soit plus basé sur des études recueillies dans des cas d'orpaillage des roches excavées, les deux cas d'exploitation ont été analysés. Il s'est appuyé sur nombreux cas de sites d'orpaillage dans le monde afin d'avoir plus de complémentarité, c'est-à-dire proposer un outil large d'analyse et de diagnostic des différentes expositions.

0.3 OBJECTIFS

Ce travail se propose de fournir des éléments de réponses scientifiquement valides et des recommandations pour des populations particulièrement vulnérables et très sensibles socialement face à ces activités.

Par les analyses toutes les expositions, l'intérêt de ce travail est de montrer les limites des études sanitaires réalisées dans le contexte d'orpaillage et présenter un protocole d'une étude qui prend en compte les effets globaux (y compris les facteurs aggravants).

Ainsi les objectifs de ce travail sont de :

- ✓ Décrire les différentes étapes de l'extraction de l'or à partir des roches encaissantes ;
- ✓ Lister toutes les émissions des substances pouvant y être associées (des sources aux cibles en intégrant les transferts et les modifications pouvant intervenir) et leurs effets potentiels sur la santé ;
- ✓ Définir les types/profils des populations pouvant être exposées ;
- ✓ Proposer, à partir de ces constats, des éléments de réflexion sur les études qui pourraient être menées dans de tels contextes (activités informelles) afin de préciser/mesurer les effets sanitaires néfastes pouvant être attendus.

0.4 MATERIEL ET METHODOLOGIE

En l'absence d'un déplacement physique sur des sites d'orpaillage à la suite des moyens financiers et organisationnels, ce travail s'est appuyé sur :

a) La recherche documentaire

La revue de la littérature s'est faite aussi bien sur des articles scientifiques que par des reportages, des rapports, articles de journaux.

Les **premières recherches** sur internet ont été réalisées sur des sites scientifiques comme google scholar, scinapse, semantic scholar, cairn, persée, scribbr avec les mots clés comme : «santé», « health », « risque sanitaire », « health risk », « orpillage », « artisanal », « gold mining », « exploitation artisanale de l'or », « or » et « environnement » ainsi que des termes synonymes. Ils ont été rechercher et croiser par d'opérateurs comme "et", "ou", "virgule" et "guillemets" avec des mots clés comme « exploitation artisanale de l'or », « exploitation minière artisanale » ...

À la suite de **ces premières recherches**, le constat qui pouvait être établi est que la majorité des travaux scientifiques rencontrés met en avant sur les risques sanitaires et environnementaux liés à l'utilisation **de mercure ou du cyanure** et évoquaient brièvement les autres substances chimiques qui entrent en jeu dans ses activités sans y accorder une grande attention sanitaire.

En analysant ces études deux hypothèses ont été dégagées :

- ✓ Soit ces substances, n'étant pas utilisées en si grande quantité, avaient un impact moindre pour la santé humaine ;
- ✓ Soit ces études se sont focalisées essentiellement sur les additifs que sont le mercure et cyanure, de ce fait les autres substances associées provenant notamment de l'excavation des roches étaient tout simplement négligées.

Les deux hypothèses prises en compte afin d'éviter les biais, ce qui à réorienter **la seconde série de recherches**, sur les différentes techniques et processus artisanaux d'obtention de l'or utilisés. Le but étant de recenser l'ensemble des substances pouvant entrer en ligne de compte et d'avoir un aperçu sur les quantités qui pouvaient être libérées dans la nature.

Dans cette démarche, toute substance (pas seulement les produits chimiques utilisés comme additifs) en lien avec ces activités et qui pouvait potentiellement être toxique en contact avec l'homme a été considérée.

Ainsi, des mots clés tels que « technique d'exploitation artisanal de l'or », « géologie de l'or », « formation de l'or », « technique d'exploitation artisanale de l'or », « orpillage des roches excavées » et leurs synonymes en français et en anglais ont été recherchés et croisés.

Grâce à cette analyse étape par étape, des différentes techniques utilisées dans l'orpillage, il a été dressé l'inventaire des différentes substances à risques sanitaires potentiels liées ces activités.

b) **Elaboration du schéma conceptuel de l'exposition**

Chaque substance identifiée a été analysée à son tour en recherchant des mots tels que « schéma de transfert des molécules », « toxicité », « bioaccumulation », « biodisponibilité », « effets sanitaires » ...

L'identification de leurs sources, schéma et voies de transfert, des interactions ou éventuelles transformation ou complexation au cours de ces transferts, ainsi que toutes les voies de contact entre les populations et ces agents dangereux (modalités de contact, fréquence, intensité, durée) a permis de dresser le schéma conceptuel des expositions pour différentes populations (plus ou moins sensibles, plus ou moins exposées).

Ainsi, la recherche bibliographique est allée au-delà des études axées sur l'orpaillage pour s'élargir aux études générales des molécules et agents préoccupants pour la santé humaine.

c) Elaboration de propositions d'études à partir de l'analyse du contexte local et des protocoles utilisés dans la recherche

Une réflexion a été menée sur les différentes méthodes qui pourraient être utilisées pour estimer l'état de santé d'une population. Elle s'est intéressée aux limites et aux avantages de chacune de ces méthodes pour le contexte d'orpaillage pour proposer une meilleure approche.

Ainsi, subdivisé en trois parties, ce travail se compose comme suit :

- ✓ Analyse des différentes techniques de l'orpaillage, émissions et conditions de vie ;
- ✓ Schéma conceptuel des expositions et risque sanitaire ;
- ✓ Discussion autour d'une étude sanitaire prenant en compte les effets globaux.

I. ANALYSE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE L'ORPAILLAGE, EMISSIONS ET CONDITIONS DE VIE

Le tableau que peut parfois dépeindre l'imaginaire collectif sur l'exploitation artisanale de l'or, avec des hommes et des femmes piochant ou balançant des tamis dans des rivières, ressemble de plus en plus à un passé lointain.

S'il est vrai que la pioche et la batée restent utilisées, aujourd'hui l'extraction de l'or, même de manière artisanale, regorge de techniques de plus en plus sophistiquées mobilisant presque l'ensemble des éléments du tableau périodique de Mendeleïev.

Cependant, le monde de l'orpaillage ne forme pas un groupe homogène. Certains exploitants exercent avec les moyens les plus modestes et d'autres disposent des machines qui se rapprochent d'équipements industriels.

Parfois, entre le lieu d'extraction de la roche jusqu'au prétraitement de l'or par des produits chimiques, il faut compter des milliers de kilomètres ainsi que plusieurs intermédiaires.

Pour mieux analyser les expositions et les substances dangereuses liées à l'exploitation artisanale d'un gisement d'or, il est donc utile de comprendre le processus lié à celui-ci.

D'une manière générale, une fois le gisement d'or connu, l'orpaillage artisanal se fait principalement en deux étapes : l'extraction et le prétraitement de l'or.

I.1 L'EXTRACTION DE L'OR ARTISANAL ET LES EMISSIONS ASSOCIEES

C'est grâce à l'activité géo et hydrothermale, c'est-à-dire la circulation d'eau chaude chargée des minerais dissous, que l'or dans un gisement est toujours associée simultanément à d'autres métaux tels que l'arsenic, l'argent, le cuivre, l'étain, le tungstène, le plomb, le mercure, le fer ainsi qu'à d'autres minéraux que sont : le quartz, la magnétite, l'ilménite, les oxydes de Fe (II, III), la pyrite, la chalcopryrite, l'arsénopyrite, les carbonates et les sulfates, les sulfures etc (Bruni & Hatert, 2017 ; Abdou Amadou, 2020).

L'or n'est généralement pas en grande quantité dans ses associations avec d'autres minéraux. Aurore STEPHANT, Ingénieure géologue minier spécialisée dans les risques environnementaux et sanitaires, estime, dans une interview sur la page youtube de Thinkerview, que la moyenne pour les 400 gisements exploités dans le monde (artisansaux et industrielles) en 2015 était de **0,15 g d'or /tonne**¹

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=xx3PsG2mr-Y>.

Le rapport du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec de 2004 « *au Québec, les teneurs moyennes des gisements d'or se situent entre 3 et 4 grammes d'or par tonnes de minerai extraits* » (Lapointe, 2006).

L'exploitation artisanale ne disposant pas des moyens de récupération d'autres métaux, ce qui amène à une conséquence directe de rejets d'abondante quantité des déchets.

Ces déchets composés essentiellement des métaux lourds, jouera également un rôle direct sur le coût d'une possible **réhabilitation**.

Les études de Kabore en 2014 expliquent ceci : « *Les gisements d'or de faible teneur, comme ceux généralement exploités au Burkina Faso, nécessitent le déplacement d'énormes quantités de déblais, difficiles à gérer après le traitement et coûteux à réhabiliter* » (Kabore, 2014).

La réhabilitation est par ailleurs rare dans le cas d'exploitation artisanale (Abdou Amadou, 2020).

A cette quantité de rejet s'ajoute les roches qui entourent le gisement et qui doivent être excavées pour se rendre au minerai. À cet égard, la méthode d'extraction utilisée exerce également une influence directe sur la quantité des rejets produits (Lapointe, 2006).

Ainsi, selon la géologie d'une région, les techniques d'extraction de l'or dépendent des deux cas d'exploitations artisanales ci-dessus :

- ✓ L'exploitation artisanale d'or provenant de roches excavées (gisement à affleurement ou en profondeur) ;
- ✓ L'exploitation artisanale d'or par recherche de pépites dans les sédiments des rivières.

a) Extraction de l'or provenant des roches excavées : matériels et substances

Après l'exploration, la première étape pour obtenir de l'or dans l'orpaillage par excavation consiste à **creuser le sol** (généralement 10 mètres de profondeur) jusqu'à rencontrer la roche encaissante de l'or ou le filon.

Une fois passée l'étape de creuser du sable et que les orpailleurs rencontrent les formations rocheuses, les matériels d'extraction utilisés changent et passent **des pelles à des marteaux piqueurs, à des burins ou encore des explosifs/dynamites** quand la roche devient de plus en plus dure.

L'utilisation des **explosifs** est interdite pour de telles activités artisanales dans la plupart des lois et réglementations. Lorsqu'elle est autorisée, elle est encadrée par plusieurs précautions.

Pour autant ceci n'est vrai qu'en théorie. En réalité, il n'existe pas une mine artisanale sans utilisation d'explosifs.

Les dynamites utilisées sont souvent de mauvaise qualité apportant danger et traumatismes (Chatterjee et al., 2017; Juhasz & Naidu, 2007).

En République Démocratique du Congo, par exemple, un témoignage d'un orpailleur recueilli explicite cette situation : « *ce que nous appelons bikwanga (une contrefaçon), nous les tenons entre nos mains sans porter aucun équipement. C'est du poison que nous touchons. L'autre risque concerne les cartouches que nous utilisons. Il y a des cartouches de très mauvaise qualité que nous appelons pirates. On utilise un stick mais, par malchance, ça fait exploser la cartouche. Il y a quelques gens qui ont fait ce travail et qui sont aujourd'hui des handicapés* » (Nkuba et al., 2021).

Au mois de février 2022, les ondes de RFI relayaient qu'une forte explosion s'était produite sur la place du marché du site d'orpaillage de Gomgom Biro au Burkina Faso provoquant « *une soixantaine des morts, plusieurs dizaines de blessés et d'énormes dégâts matériels. Selon les premiers témoignages, émanant des sites d'informations burkinabais, l'explosion est partie des galeries du site d'orpaillage avant de toucher le marché où une forte quantité d'explosifs était exposée. L'incendie s'est tout de suite propagé sur le marché avant de toucher les produits chimiques qui y étaient* ».

Il est difficile de connaître la composition exacte de ces explosifs contrefaits. Pour autant il s'agit de la principalement de la **nitroglycérine** dans la plupart des cas, une substance utilisée par ailleurs en médecine à petite dose pour certaines affections cardiaques.

Toutefois s'il existe la possibilité d'un risque d'inhalation de l'**acide nitrique et sulfurique** pour les orpailleurs, substances toxiques à l'état gazeux émanant de ces explosifs, l'autre grande préoccupation sanitaire est la quantité mais surtout la **composition chimique des poussières** que ces explosions engendrent.

Cette poussière sera constituée de **silice et d'éléments traces métalliques** en se référant au processus de la formation du gisement d'or rappelé précédemment.

Après cette étape, les orpailleurs doivent généralement faire des tests pour séparer les déblais d'or des autres blocs dites "**stériles**" avant de poursuivre leurs opérations.

Ce test se fait soit par la densité (dit de la cruche d'eau) qui consiste à réduire en poussière une infime quantité de débris et les grains d'or devront couler, à l'aide d'acides dont l'**acide chlorhydrique ou nitrique** en fonction des impuretés liées à l'or. La même procédure sera reprise en prétraitement de l'or, mais avec des quantités plus grandes.

Le test déterminera la quantité de déblais et débris "à jeter". Généralement, à cause du pourcentage de l'association de l'or avec d'autres métaux, c'est 99,9% de la roche qui est jetée dans l'exploitation artisanale comme évoquées précédemment.

Les débris amenés à l'extérieur du puits par des **seaux et cordes** sont **sélectionnés** (entre ceux qui contiennent l'or et ceux qui n'en contiennent pas). Les débris sélectionnés sont ensuite **concassés** soit par des machines concasseurs, soit manuellement à l'aide de **marteaux** pour avoir des petits grains. Ces derniers seront ensuite **broyés** par des **moulins** afin d'avoir de la **farine** qui sera tamisée et traitée plus tard par des produits chimiques pour purification.

Le concassage et le broyage sont assurés par des machines (moulins, meules, moteurs) alimentés par des **groupes électrogènes** qui utilisent d'énormes quantités **d'hydrocarbures et d'huiles** pour les moteurs, mais aussi beaucoup de ressources en eau pour le refroidissement.

Souvent, **plusieurs machines concasseurs et broyeurs se relaient** les unes après les autres, chacune avec une **dimension de grains de sortie bien définie**. Les quantités de carburants et d'huiles utilisées sont proportionnellement élevées (très important) par rapport à la quantité d'or qui sera récoltée. La combustion du carburant ne pourra donc pas être négligée.



Fig 1 : Photo d'une mine artisanale de Tiébélé au Burkina Faso à la phase de concassage et broyage. Image 2019 source : journal "le point Afrique" (https://www.lepoint.fr/afrique/burkina-dans-la-mine-d-or-artisanale-de-tiebele-01-11-2019-2344658_3826.php)

Dans le cas des **roches moins dures**, qui **affleurent en surface** ou des débris d'or laissés par érosion en bas des montagnes et enfouies dans le sable, le couple d'opération **concassage-broyage** se fait généralement à l'aide de **pompes hydrauliques à haute pression**. Cela se fait de la manière suivante : « *Les exploitations sur flat (sur terre) utilisent deux pompes. La première puise de l'eau et la restitue à des lances haute pression appelées lances monitor, identiques à celles utilisées dans la lutte contre les incendies. Les ouvriers guident le jet d'eau vers la couche de graviers minéralisés et la liquéfient. Les boues rejoignent alors une fosse, où la seconde pompe*

les aspire vers la table, constituée d'une caisse suivie de trois plans inclinés, recouverts de moquettes, où l'or reste piégé. » (Orru, 1998).

Les grains ou la farine résultante finiront par être récoltés dans une moquette et renvoyée dans un bassin d'eau. Viendra après, l'utilisation des **batées** pour tamisage du mélange afin de ne garder que les pépites d'or avant amalgamation ou purification. La **boue résultante** peut repasser une dernière fois à la batée pour optimiser la production. Ensuite, elle finira par être rejetée dans l'environnement, où elle ruissellera et s'infiltrera dans le sol ou carrément versée dans un cours d'eau ou rivière, donnant souvent lieu à une coloration jaunâtre à cette dernière.

Dans cet environnement, outre les matériels précités, il y a également : « *des motopompes pour l'évacuation de l'eau souterraine, de systèmes de ventilation, de poulies pour descendre les creuseurs et remonter le minerai comme on en trouverait au Soudan ou au Burkina Faso* » (Sawadogo & Dat, 2021).

L'ensemble de ces matériels, tournant jusqu'à l'atteinte des objectifs, amènera à s'interroger d'une possible exposition au bruit, des vibrations du corps et membres supérieures ainsi que des mouvements répétitifs.

Ces activités régénèrent aussi en grandes quantités de déchets plastiques dont les bassines, bidons à eau et essence, seaux, cordes, bâches, mais aussi les autres déchets ménagers, les torches à piles, bois, sacs, etc. Ces déchets sont soit abandonnées, soit brûlés. Ce qui peut générer une situation encore plus déplorable du point de vue de la pollution environnementale et sanitaire.

Des galeries artisanales...

Il arrive bien de fois que les orpailleurs suivent l'or en creusant des **galeries** dans le sol jusqu'à parfois 100 mètres de distance et de profondeur.

En Guyane, on compte jusqu'à 150 sites souterrains artisanaux d'après un rapport de l'Assemblée nationale de la République française (Assemblée Nationale de la France, 2021).

La profondeur à partir de laquelle commence **le soutènement** est fonction de la résistance du sol. Ce sont souvent des **bois et des fils de fer** qui servent de soutènements.

L'utilisation du bois par les orpailleurs accentue également la pression sur les ressources ligneuses, L'orpaillage participe activement donc à la déforestation (Bohbot, 2017).

Sur le site de Sangoulanti au Burkina Faso, il commence en moyenne à 5 mètres. On utilise en moyenne 10 à 15 bois pour réaliser un mètre de soutènement. « *On creuse entre 25 et 80 mètres, le but ultime ? Atteindre les 100 mètres. En effet, plus on descend, et plus l'or est facile à saisir* », explique Hamed OUOSSALE, patron de deux puits et d'une vingtaine de mineurs à Tiébélé au

Burkina Faso au journal le point Afrique ².

Cette technique génère des centaines de mètres cubes de gravats, un sol en "gruyère" et difficilement réhabilitable après la fin de l'exploitation minière (Bohbot, 2017).

Assez risquée du point de vue sécurité, les galeries sollicitent, selon les enquêtes recueillis par Franceinfo, souvent des enfants à cause de leur petite taille qui leur permet de se glisser dans la moindre infractuosités³. Ce media rapporte qu'à la suite de l'effondrement du terrain qu'ils creusaient, 15 mineurs sont morts le 8 mai 2021 en Guinée.

Ces effondrements sont plus fréquents lors de la saison des pluies, car l'infiltration des eaux tend à diminuer la cohésion des roches déjà dégradées, et donc affaibli leur résistance au poids.

b) **L'extraction de l'or provenant des sédiments de rivières : matériels et substances**

Avant l'exploitation souterraine, l'exploitation artisanale concernait exclusivement les rivières aurifères. Cette pratique reste encore répandue à cause de certaines contraintes techniques et moyens disponibles.

En Guyane par exemple, l'épaisse forêt rend difficile le développement d'autres techniques d'orpaillage. Rarement documentés et moins rentables dans le cas Africain, les exemples de cette pratique selon Radio France International sont à trouver dans des rivières du Madagascar, du Niger, de la République Démocratique du Congo...

Les gisements alluvionnaires constituent donc l'or que l'on trouve dans les sédiments (sable et gravier) des lits de rivières peu profondes.

En effet, la nature effectuant son travail, les montagnes s'érodent sous l'action de l'eau et du vent, et le bloc contenant de l'or se réduit en petits morceaux qui sont emportés par les rivières. L'or étant un métal lourd, va se déposer naturellement dans le sable à des endroits bien précis des rivières appelés "placers".

Ainsi, comparativement aux techniques précédentes, la phase d'extraction est beaucoup plus simple. **L'eau s'étant déjà occupée du travail de concassage et du broyage de la roche** pour laisser sous les rivières des paillettes (morceau d'or plat qui mesure moins d'un centimètre), des pépites (un morceau d'or assez épais pour être tenu entre deux doigts) dans le sable.

Après l'érosion, les grains d'or sont bien et bel accompagné des autres ETM de densité plus ou moins proche et vont se déposer ensemble vers le cours d'eau inférieur.

² https://www.lepoint.fr/afrique/burkina-dans-la-mine-d-or-artisanale-de-tiebele-01-11-2019-2344658_3826.php

³ https://www.francetvinfo.fr/monde/afrique/economie-africaine/en-guinee-la-fievre-de-l-or-provoque-de-plus-en-plus-d-accidents-mortels_4621025.html

L'orpailleur va se retrouver à manipuler dans sa batée, du sable qui contient les éléments-trace métalliques dont le plus souvent sont : le **Fe, Pb, Mg, Zn, As** et des traces de **Cd, Ni, V, Ti**, etc.

Le sable va donc être ramassé à l'aide de techniques et instruments suivants :

- ✓ **La technique du lavage à la batée** : la batée est un instrument plongé dans une rivière en réalisant une série de mouvements giratoires de façon à récupérer les paillettes ou pépites d'or.
- ✓ **La rampe de lavage ou le sluice** : il est moins fastidieux et plus productif que la batée. Le sluice est une grande gouttière, vanne ou encore une écluse inclinée, fabriquée en bois ou en acier, revêtu d'une moquette/tapis ou de tasseaux permettant de découvrir de l'or dans des rivières aurifères.

L'orpailleur installe une rampe légèrement en pente au-dessus d'un placer (sable alluvial) assez riche dans le sens du courant. Les orpailleurs placent une quantité importante de sable en amont qui sera entraînée dans la rampe avec le courant. Le tri se fera alors naturellement dans les traverses ou sur les tapis, les particules se placeront plus ou moins loin en fonction de leur masse et l'or pourra donc être séparé du sable.

- ✓ **Les dragues suceuses** : héritières des dragues à godets, ils « *sont assimilables aux chantiers fluviaux mécanisés. Elles se présentent sous la forme d'un ponton flottant de faible tirant d'eau, sur lequel est installé le matériel d'exploitation et de traitement. Le système de fonctionnement est le suivant : un tuyau de succion, relié à une pompe à gravier, est maintenu au fond de la rivière et dirigé par un plongeur. Les graviers ainsi aspirés sont remontés sur le ponton et projetés sur une table inclinée sur laquelle sont disposées des moquettes pour la récupération de l'or* » (Orru,1998).

I.2 LE PRETRAITEMENT DE L'OR ARTISANAL ET SUBSTANCES ASSOCIEES

a) L'or provenant des roches excavées

Après la phase d'extraction, l'or obtenu est sous forme de farine pour l'exploitation dans des roches excavées alors qu'il est déjà bien lessivé et sous forme de boue dans l'orpaillage en rivières.

Ainsi, pour se débarrasser des dernières impuretés, les orpailleurs des roches excavées commencent par laver cette farine avec de l'eau et des **détergents** puisqu'elle a été entachée des huiles de moteur. Comme pour l'orpaillage en rivières, ce lavage se fait également sur une rampe de lavage et la présence de détergents facilite un écoulement assez fluide ainsi que l'adhésion des pépites d'or sur le fond en moquette.

La quantité et le type des détergents n'est pas identifiée dans la majorité des études, les travaux de mémoire de Roamba notent que « *la poudre de minerai est versée dans un bac, on y ajoute*

cinq (5) sachets du détergent de marque SABA de 30 g par sac de 50 Kg et de l'eau » (Roamba, 2014).

La répétition de cet exercice étant liée à la quantité infime de l'or qui sera récolté dans un bac (souvent de 20g), il est légitime de s'interroger de l'impact sur le sol et ses ressources du rejet régulier et en quantité de ces tensioactifs (détergents) pendant plusieurs années de la durée de ces activités.

A la suite de cette étape supplémentaire de l'exploitation l'or des roches excavées, le produit est maintenant sous forme de boue et des petits grains pour les deux techniques. Il va suivre dorénavant la même procédure de prétraitement. Ce qui figure dans les paragraphes qui suivent concerne, sauf exception, les deux méthodes d'extraction.

Les grains d'or lessivés sont recueillis sur de la moquette et ensuite mélangés avec de l'eau cette fois-ci non savonneuse, et du **mercure** (manipulé à la main) ce qui permet de former un amalgame avec les grains d'or.

Avec cette technique, les paillettes d'or se collent les unes aux autres puis au mercure, ce qui facilite ensuite son tri et sa séparation avec le sable ou la boue. Ensuite, cet amalgame est brûlé à l'air libre à l'aide d'un chalumeau dans le but d'**évaporer** le mercure et récupérer l'or.

D'après une étude réalisée en RDC par (Bedidjo, 2018) « *le rapport or-mercure est de 1g d'or pour 1,5 g de mercure* ». Alors qu'une des Nations Unis « *parle plutôt de 1g d'or pour 1,3 g de mercure* ». (O'Neill & Telmer, 2017).

Il faut cependant noter que la quantité du mercure « *à utiliser est fonction du type de gisement et de la quantité des minéraux amalgamables. Par exemple, si de l'argent est présent dans le minerai, celui-ci va consommer une quantité supplémentaire à ce qui est nécessaire à amalgamer l'or* » (O'Neill & Telmer, 2017).

Par ailleurs, il est à signaler aussi que ce mercure est importé illégalement dans la majorité de cas. De ce fait il est difficile de savoir s'il contient ou non des impuretés, ni sous quel conditionnement il est proposé.

L'or obtenu n'est pas encore pur, mais spongieux et possède encore certaines impuretés. Il sera vendu aux raffineries plus formelles ou aux comptoirs.

Quant à la boue restante, elle n'est pas directement jetée, mais récupérée par d'autres canaux et subira un autre traitement pour en tirer au maximum les grains encore très fins d'or non récupérés durant les étapes précédentes.

Cet autre traitement s'appelle la **cyanuration ou lixiviation de l'or**. Selon certains orpailleurs, la cyanuration serait beaucoup plus efficace en termes de récupération des grains d'or que l'amalgamation par le mercure, au point que d'autres préfèrent passer directement de la farine à cette technique. Cette dernière est aussi utilisée majoritairement par les grandes industries (Kabore, 2014 ; Kahitouo, 2012).

Les produits utilisés dans cette étape sont le **sel de cyanure, les copeaux de zinc, l'acide nitrique, l'acide sulfurique** ainsi que de **l'eau**.

L'acide sulfurique sera utilisé comme réducteur de l'or sur le zinc, alors que l'acide nitrique permettra la dissolution de la plupart métaux sauf l'or, il servira à nettoyer l'or de ses impuretés comme le zinc, le cuivre, le mercure, l'argent et le fer (Kabore, 2014).

Ainsi la boue résultante également sera riche en Eléments Trace-Métalliques ETM en plus des acides.

L'exploitation artisanale s'arrête à cette étape de prétraitement. L'or est vendu comme tel dans des comptoirs et subira plus tard un traitement pour le purifier davantage chez les industriels

La comparaison entre deux techniques d'orpaillage avec les deux étapes se trouve dans l'annexe n° 1.

Les tableaux N° 1 et 2 résument pour chaque étape d'une exploitation artisanale, les matériels et les produits utilisés et les nuisances, contaminations émises et déchets produits :

Tableau 1 : Orpaillage des roches excavées

Etapes	Matériels et/ou produits utilisés	Résultats (sorties)
Extraction de la roche Fragmentation de la roche (explosion, concassage et broyage) Test de l'or	Dynamites, pelles, burins, marteaux, détecteurs des métaux, concasseurs, broyeurs, moulins, motopompes, groupes électrogènes, bois, HCl, HNO ₃ et H ₂ SO ₄	<ul style="list-style-type: none"> - Débris et poussières riches en ETM - Rejets des hydrocarbures et huiles usées (HAP, COV, CO, Benzène...) - Nuisance sonore - Rejets des blocs (stériles) - Fumées en HNO₃ et H₂SO₄ - Nitrates, Sulfures - Rejets (drainage) acides - pH acide du sol
Amalgamation de l'or	Mercure, eau, détergents, bacs, moquette	<ul style="list-style-type: none"> - Boues riches en ETM - Emissions du Hg - Rejets d'eau contaminés - Rejets et/ou combustion des bois - Rejets ou combustion des plastiques

		<ul style="list-style-type: none"> - Sols riches en matière organique (phosphates,) - Perturbations de l'habitat microbien au sol
Lixiviation de l'or ou Cyanuration	Cyanure, acides nitriques et sulfuriques, Zinc et eau	<ul style="list-style-type: none"> - Fumée en HNO₃ et H₂SO₄ - Nitrates, Sulfures - Rejets (drainage) acides - pH acide du sol - Cyanure dans l'eau, sol

Tableau 2 : Orpaillage des rivières

Etapes	Matériels et/ou produits utilisés	Résultats (sorties)
Ramassage des grains d'or	Batées, pan, suceuses, motopompes, groupes électrogènes	<ul style="list-style-type: none"> - Boues riches en ETM - Rejets des hydrocarbures et huiles usées (HAP, COV, CO, Benzène...) - Nuisance sonore
Test de l'or	HCl, HNO ₃ et H ₂ SO ₄	<ul style="list-style-type: none"> - Rejets des grains en ETM - Fumées en HNO₃ et H₂SO₄ - Nitrates, Sulfures - Rejets (drainage) acides
Amalgamation de l'or	Mercuré, eau, détergents, bacs, moquette	<ul style="list-style-type: none"> - Boues riches en ETM - Emissions du Hg - Rejets d'eau contaminés - Rejets et/ou combustion des bois - Rejets ou combustion des plastiques - Sols riches en matière organique (phosphates,) - Perturbations de l'habitat microbienne
Lixiviation de l'or ou Cyanuration	Cyanure, acides nitriques, sulfuriques, Zinc et eau	<ul style="list-style-type: none"> - Fumée en HNO₃ et H₂SO₄ - Nitrates, Sulfures - Rejets (drainage) acides - pH acide du sol - Cyanure dans l'eau, sol

I.3 CONDITIONS PRECAIRES DE VIE ET EXPOSITION AUX AGENTS BIOLOGIQUE

L'orpaillage modifie durablement l'environnement et affecte considérablement les populations.

L'abandon des trous de mine sans réhabilitation est impropre non seulement à l'agriculture mais aussi au pâturage. Les terrains deviennent ainsi impraticables pour les engins moteurs ou autres moyens de transport et même pour le déplacement des animaux (Abdou Amadou, 2020).

Les conditions de travail sont souvent précaires. L'alimentation est mauvaise et les installations hospitalières ou d'offre des soins sont très éloignées des sites d'orpaillage.

Les données sur les traumatismes ou accidents sont difficilement reportées. Les décès liés aux éboulements, aux chutes ou aux noyades par inondation des galeries sont par exemple très fréquents sur les sites d'orpaillages mais ils ne ressortent que dans le cas d'un accident majeur. Ces données ne sont malheureusement pas cumulées pour donner une photographie sur l'ensemble d'une année par exemple mais bien ponctuellement lors de ce genre de cas (Bohbot, 2017). Toutefois, bien que très en deçà des réalités, entre 2010 et 2016, les services du ministère des mines du Burkina a enregistré plus de 300 victimes, dont plus de 200 morts liés aux éboulements (Alliance pour une mine responsable, 2012)⁴.

Aux accidents, s'ajoutent les nombreuses pathologies vectorielles résultant du climat et habitations précaires tels que : « *le paludisme, la tuberculose, la lèpre, les infections sexuellement transmissibles peuvent aussi être importées par ceux qui travaillent dans ce milieu et représentent une menace sanitaire sur les populations autochtones avoisinantes* » (Edgmann, 2018 ; Shanomae, 2010).

S'ajoute également d'autres mode de vie tels que : le tabagisme, la consommation des drogues pour augmenter l'endurance ...

La violence et les problèmes de sécurité sont récurrents. La découverte d'un gisement attire les populations locales et celles des pays voisins, générant des conflits, ainsi que des groupes armés.

L'ensemble de ces activités d'orpaillage impacte également le fonctionnement microbien du sol conduisant à une perturbation des habitats de cette communauté des microorganismes. Ce qui pourra favoriser indirectement une contamination de l'eau par exemple (Schimann, 2016).

En résumé, cette analyse des techniques d'orpaillage montre plusieurs altérations ou problème de santé qui peuvent résulter sous multiforme :

- ✓ Traumatismes et accidents ;
- ✓ Conditions et mode de vie précaires ;
- ✓ Contact avec substances chimiques dangereuses ;
- ✓ Exposition au bruit et à l'utilisation des appareils vibratoires et mouvements répétitifs ;
- ✓ Maladies vectorielles et exposition microbiologique

⁴ <https://www.responsiblemines.org/fr/2019/12/que-faire-pour-limiter-le-risque-deboulements-dans-la-mine-artisanale-de-filon/>

II. SCHEMA CONCEPTUEL DES EXPOSITIONS ET RISQUES SANITAIRES

L'identification de toutes les étapes des procédés d'orpaillage a permis de recenser les différents agents potentiellement dangereux qui présenteraient un risque pour la santé humaine selon les conditions d'exposition.

D'après Santé publique France, le **risque sanitaire** correspond à la probabilité que survienne un événement nuisible à la santé d'un individu ou d'un groupe d'individus. Son identification et son analyse sont des éléments de détermination de la politique de santé publique.

Outre les substances chimiques, les risques sanitaires susceptibles d'affecter la santé de la population vivant dans un environnement de l'orpaillage peuvent résulter de plusieurs agents et facteurs : les nuisances sonores et vibratoires, les agents infectieux (virus, bacilles, parasites, champignons), le manque de système de soins adaptés, la mauvaise alimentation, des problèmes sécuritaires, des conditions précaires du travail, mode de vie (tabagisme, alcoolisme, prostitution...).

La multiplicité de ces facteurs d'aggravation de problème de santé associé au dépistage d'une molécule dangereuse dans une population donnée peut justifier l'opportunité de la mise en place d'une étude sanitaire.

Plusieurs études sanitaires ont été ainsi réalisées sur l'orpaillage. Ces études, ne prenaient en compte le plus souvent, qu'une ou deux molécules et parfois même sans tenir compte de leurs dérivés ou complexes. Il s'agit du mercure et/ou du cyanure qui sont considérés comme des molécules très dangereuses liées aux activités d'orpaillage.

Cette façon de procéder ne présenterait-elle pas certaines limites, d'autant plus que l'analyse des techniques d'orpaillage a pu démontrer qu'il existerait plus d'une substance ou d'un agent potentiellement dangereux pour l'homme ?

Dans ce chapitre, nous essayons d'analyser les différents agents chimiques et physiques émis, répertoriés dans le chapitre premier, afin de connaître leur devenir dans l'environnement. Sont-ils tous aussi dangereux pour la santé humaine ? Pourquoi certaines des substances ou certains agents sont-ils négligés ? Méritent-ils de faire également partie des préoccupations sanitaires ? Ne faut-il pas élargir le champ de l'étude, pour tenir compte de l'ensemble des agents, substances, facteurs de risque et ne pas se limiter à ces deux molécules ?

La construction de la réponse à ces questions s'articulera par une analyse sur trois points :

1/les sources de la molécule : ce qui permettra d'avoir une idée des quantités libérées,

2/les schémas de transfert et les interactions avec d'autres molécules permettront de mettre en évidence les dérivés et les complexations.

En effet, les différents agents libérés dans l'environnement vont commencer un parcours propre entre le lieu de leur libération, c'est-à-dire le site de l'orpaillage, jusqu'à atteindre les populations.

Ce parcours dépendra des propriétés physico-chimiques de chacun, de l'état de leur libération dans la nature ainsi que des éventuels processus bio-géochimiques qu'elles peuvent subir.

3/ les **toxicités** et **risques sanitaires de ces substances et leurs dérivés** : les éventuelles interactions entre substances peuvent amener à des transformations ainsi qu'à des modifications des toxicités intrinsèques. Cette étape permettra de passer d'une liste large d'agents potentiellement dangereux à une liste plus restreinte d'agents dangereux à conserver dans les études de risques.

Evoqués précédemment, le risque microbiologique et des maladies vectorielles ne sera pas plus détaillé dans ce travail compte tenu du caractère limité dans le temps et l'écriture.

II.1 INVENTAIRE DES MOLECULES/AGENTS, SCHEMA DE TRANSFERT ET EFFETS SANITAIRES

A la suite de l'analyse des techniques d'orpaillage, les éléments sortants (provenant de la roche exploitée ou des additifs ramenés par l'homme) peuvent être classés en différentes familles chimiques et physiques suivantes :

A. Les éléments minéraux :

A.1 Les éléments traces métalliques ;

A.2 Le cyanure ;

A.3 La silice cristalline ;

A.4 Les acides.

B. Les composés organiques :

B.1 Les détergents (tensioactifs) ;

B.2. Les COV (Benzène, toluène, monoxyde de carbone, HAP) ;

B.3 Les autres matières organiques (huiles moteurs, déversement des hydrocarbures, bois...)

C. Les agents physiques :

C.1 Le bruit

C.2 Appareils vibratoires et mouvements répétitifs

A. LES ELEMENTS MINERAUX

A.1 Les Eléments Traces Métalliques : ETM

Les ETM, une fois émis dans la nature, sont permanents. Ils ont la capacité à s'accumuler dans l'environnement ainsi que dans l'organisme soit de manière passive, soit de manière active (bioaccumulation, biomagnification). La bioaccumulation, mais également les mobilités ou encore les interactions avec d'autres éléments pour former des complexes, évoluent en fonction du pH, de l'activité biologique ainsi que de la richesse en matière organique des sols (Barraza et al., 2018).

Le risque sanitaire d'un ETM dépendra à son tour « de sa concentration dans les milieux d'exposition, parfois de sa spéciation chimique plus ou moins toxique, mais aussi de son potentiel à être mobilisé et à pénétrer dans le sang humain, c'est-à-dire la biodisponibilité » (Glorennec et al., 2016).

Bien que cette liste soit non exhaustive, voici au cas par cas les molécules dont les exemples dans les sites d'orpaillage ont été le plus récurrents :

A.1.1 Le Mercure (Hg)

✓ *Rappel de la source dans l'orpaillage, distribution et interactions :*

La libération du Hg lors des activités d'orpaillage a principalement deux sources :

- Soit, il est résultant du lessivage, par l'apport des acides, de la roche encaissante contenant du mercure sous forme de métal et lié à l'or.
- Soit comme additif : il est apporté sous forme liquide pendant les opérations d'amalgamation, dans ce cas, l'amalgame (Hg-Au) formé est ensuite brûlé à l'air libre et la totalité du mercure est libéré sous forme gazeuse (**40%**) et liquide (**60%**) dans le **sol** et l'**eau** par la **boue restante** (Boudou et al., 2006).

Le schéma de transfert des molécules du Hg se présentera d'après la figure suivante :

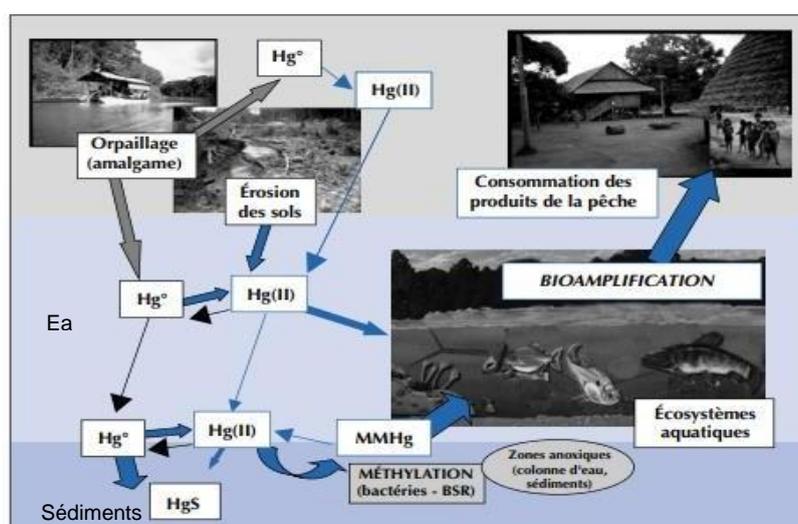


Figure 2 : Cycle biogéochimique du Hg en relation avec les activités d'orpaillage en Guyane BSR : bactéries sulfato-réducteurs, Hg⁺ : mercure élémentaire ; Hg(III) : mercure inorganique oxydé HS : sulfure de mercure MMHg : monométhylmercure

(Source : Boudou et al., 2006)

✓ *Toxicités et risques sanitaires*

Les différentes formes complexes que le Hg formera avec d'autres molécules sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Toxicités des composés du mercure

Substances chimiques	Source	Voie d'exposition	Valeur de référence
Mercure Métallique	US EPA 1995	Inhalation	RfC = $3 \cdot 10^{-4}$ mg/m ³
	ATSDR 1999	Inhalation	MRL = $2 \cdot 10^{-4}$ mg/m ³
Chlorure Mercurique	US EPA 1995	Orale	RfD = $3 \cdot 10^{-4}$ mg/kg/j
	ATSDR 1999	Orale	MRL = $2 \cdot 10^{-3}$ mg/kg/j
Méthylmercure	US EPA 1995	Orale	RfD = 10^{-4} mg/kg/j
	ATSDR 1999	Orale	MRL = $3 \cdot 10^{-4}$ mg/kg/j
	OMS 1972-1989	Orale	DHTP = 3,3 µg/kg
	RIVM 1995	Orale	DJT = $4 \cdot 10^{-4}$ mg/kg/j DJT = $8 \cdot 10^{-5}$ mg/kg/j
Acétate de Phénylmercure Mercure total Mercure Inorganique	US EPA 1996	Orale	RfD = $8 \cdot 10^{-5}$ mg/kg/j
	OMS 1972-1989	Orale	DJT = $6 \cdot 10^{-4}$ mg/kg/j
	RIVM 1995	Orale	DJT = $4 \cdot 10^{-3}$ mg/kg/j

(Source : BRGM, 2003)

Les études sanitaires placent le mercure dans la catégorie des produits très toxiques. Il l'est plus particulièrement sous sa forme élémentaire (vapeur) et sous sa forme méthylée (Counter et Buchanan, 2014 ; Barraza et al., 2018). Ce sont justement ces formes qui résultent de l'utilisation en orpaillage, ce qui explique l'accent mis sur cet élément dans la plupart des études.

Les études ont montré que l'inhalation des vapeurs de mercure peut causer des lésions à la bouche, aux voies respiratoires et aux poumons lors des expositions aiguës. Ces vapeurs sont susceptibles de provoquer la mort par insuffisance respiratoire. L'exposition à long terme de ces vapeurs, même à de faibles concentrations peut provoquer des symptômes analogues à ceux provoqués par le méthylmercure (Counter et Buchanan, 2014 ; Santé Canada, 2008).

Des atteintes pulmonaires, des manifestations digestives telles que le vomissement ou la stomatite ou encore une insuffisance rénale aiguë, une stomato gingivite ainsi une atteinte oculaire ont été également mises en évidence par des études soit à cause de l'inhalation chronique des vapeurs de mercure ou l'ingestion du méthylmercure (Bensefa-Colas et al, 2009).

Neurotoxique et néphrotoxique, le méthylmercure peut provoquer des troubles mentaux. Les premières manifestations cliniques lors de l'exposition chronique au mercure sont peu spécifiques : céphalées, asthénie, troubles de la personnalité et du caractère, troubles de la mémoire et de la concentration, tremblements intentionnels.

À un stade plus avancé, les signes d'encéphalopathie sont plus spécifiques et associent un syndrome cérébelleux complet et une franche altération intellectuelle. Dans les cas graves, le tableau peut se compléter d'hallucinations et de délire, plus rarement d'une atteinte des voies optiques ou d'un

syndrome extrapyramidal. L'atteinte périphérique avec une polyneuropathie sensitivomotrice distale est fréquente pour des taux de mercure urinaire de plusieurs centaines de microgrammes par litre (Bensefa-Colas et al, 2009).

Le mercure est un perturbateur endocrinien avéré. Il est transmis de la mère au fœtus ou à l'enfant par le lait maternel. Il est responsable de dommage du cerveau fœtal en développement (Estaquier et al., 2021). En outre, le mercure métal et ses dérivés inorganiques sont des allergènes à l'origine de dermatites de contact allergiques, d'urticaire, d'érythrodermie ou de purpura.

A.1.2 L'Arsenic (As)

✓ *Rappel de la source dans l'orpaillage, distribution et interaction :*

L'arsenic n'est pas un additif des activités d'orpaillage. Il provient plutôt du filon d'or exploité. « *A l'état naturel, le mariage entre l'arsenic et l'or est très fréquent* » (Verdier, 2021).

Il est ainsi l'élément le plus abondant parmi les ETM en proportion des déchets libérés dans la majorité de cas. A titre d'exemple, « *à la fermeture de la mine de Salsigne en France, on comptait plus de 120 tonnes d'or extraites ainsi plus de 500 000 tonnes de déchets solides contaminés d'arsenic* » (Verdier, 2021).

L'As est libéré dans la nature sous plusieurs formes en même temps : **dans l'air**, il va se retrouver dans les poussières de la roche fragmentée. **Dans le sol**, c'est sous forme de déblais, débris.

Dans l'eau de rivière ou la nappe phréatique, il est sous forme de boue ou en solution par suite de l'action des acides. Le passage de l'arsenic en solution est lié à l'oxydation des matériaux qui le contiennent, « *l'oxydation peut se produire quand les minéraux d'arsénopyrite se retrouvent en contact avec de l'oxygène (celui de l'atmosphère, des eaux de pluie ou des eaux de surface par exemple). Elle peut se produire également en profondeur, lorsque les **eaux souterraines** sont contaminées par des nitrates* » (BRGM, 2017). Déjà évoqué plus haut, l'orpaillage est rempli des nitrates.

Le schéma de transfert peut être illustrer de la manière suivante :

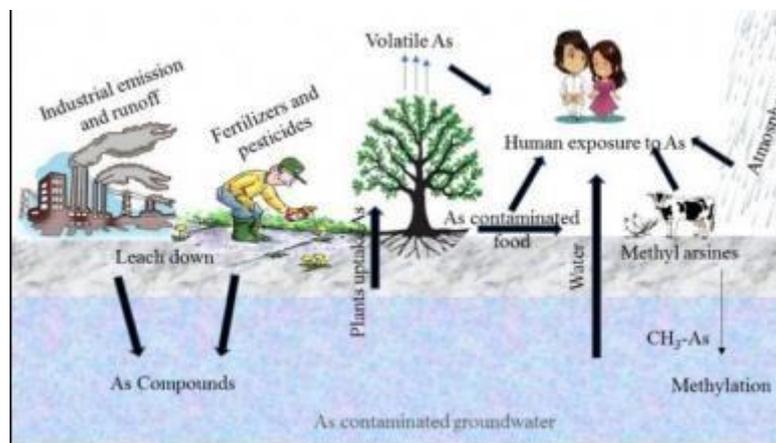


Figure 3 : Distribution et des composés de l'Arsenic (Source : Shahid et al., 2018)

✓ *Toxicités et risques sanitaires*

A l'origine, l'arsenic des gisements d'or sous forme inorganique, est un composé toxique. Il est cancérigène dans le cas d'une exposition chronique même à faible dose (Nzihou et al., 2013 ; Verdier, 2021).

L'arsenic inorganique a également des propriétés neurotoxiques et génotoxiques. Il provoque des maladies cardiovasculaires périphériques, de l'anémie et des dysfonctionnements du système reproducteur (Shaheen et al., 2016 ; Wojciechowska-Mazurek et al., 2008).

« Des études épidémiologiques ont montré que l'exposition chronique à l'arsenic par inhalation est à l'origine des cancers bronchiques primitifs. Alors que l'exposition chronique par ingestion d'eau contaminée est à l'origine de cancers du poumon, de la peau et de la vessie. D'autres études suggèrent l'existence d'une association entre l'exposition à l'arsenic dans l'eau de boisson et le développement de cancers de la prostate, du foie et du rein, mais les données actuellement disponibles ne permettent pas de conclure définitivement sur ces associations » (Centre de Lutte contre le Cancer LEON BERARD, 2022⁵).

Les interactions avec d'autres molécules (notamment les composés organiques et les acides) et les toxicités sont les suivantes :

Tableau 4: Toxicités des composés de l'Arsenic

Composé	Formule	Abréviation	Valence	Toxicité
Arsine Hydrogène arsénié	AsH ₃	-	0	+ 
Monométhylarsine	CH ₃ H ₂ As	MMA	+III	
Diméthylarsine	(CH ₃) ₂ HAs	DMA	+III	
Triméthylarsine	(CH ₃) ₃ As	TMA	+III	
Arsénite Acides arsénieux	H _n AsO ₃ (1 < n < 3)	As(III)	+III	
Arséniate Acides arséniques	H _n AsO ₄ (0 < n < 3)	As(V)	+V	

(Source : BRGM, 2009)

Une forte teneur en matière organique du sol (entre 7,5 et 15 %) entraîne une augmentation de l'As (+III) par conséquent la formation des complexes DMA et MMA du type +III.

La forme organique de l'arsenic a toujours été considérée comme non toxique jusqu'il y a peu. Il s'agissait de l'arsénobétaïne (CH₃)₃AsCH₂CO₂, un oligo-élément qui peut être trouvé dans le poisson.

Les récentes études ont cependant montré que les autres composés méthylés de l'arsenic en particulier le MMA et le DMA à l'état d'oxydation +III, seraient cancérigènes et bien plus toxiques que les formes inorganiques (Styblo et al, 2000).

⁵ <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/informations-generales/etudes-epidemiologiques/>

A.1.3 Le Plomb (Pb)

✓ *Rappel de la source dans l'orpaillage, distribution et interaction des molécules :*

- Le plomb n'est pas un additif de l'orpaillage. Les teneurs élevées en Pb dans les différents sites s'expliqueraient par le fait que les minerais d'or soient également associés aux minerais sulfureux tel que la galène (PbS), principal minerai du Pb. (Ibrahim et al., 2019).
- La provenance par la combustion de l'essence au plomb n'est pas non plus à écarter puisqu'il s'agit des conditions d'exploitation sauvage et qui utilisent probablement des carburants de très mauvaise qualité, à moindre coût dans la plupart des cas.
- Enfin, les habitudes très récurrentes de tabagisme actif et passif dans des sites d'orpaillage, peut être aussi source de plomb (Glorennec et al., 2016).

Plusieurs exemples de Pb dans les différents sites de l'orpaillage, précisent ces points :

- **En Guyane**, une étude appelée "GUYAPLOMB" réalisée entre 2015 et 2016, par Santé Publique France révèle que parmi les facteurs de risque de la plombémie élevée chez les enfants âgés de 1 à 6 ans, ressort le fait de résider le long des fleuves Maroni ou Oyapock et de manger des produits locaux notamment le riz et le couac (une forme de farine de manioc). Ce qui correspond à la proximité entre le lieu d'exposition et les activités d'orpaillage. (Andrieu, 2019).
- **Au Nigeria** en 2010, une épidémie de saturnisme frappa les enfants de l'état de Zamfara à la suite des activités d'orpaillage. Les équipes de Médecins Sans Frontières estiment alors que 400 enfants sont décédés et que des milliers d'autres présentent des niveaux de plomb excessifs et sans précédent dans leur santé (Rapport de la délégation du Bureau de la coordination des affaires humanitaires des Nations Unies, OCHA & PNUE, 2011 ; Médecins sans frontière, 2018).
- **Au Niger** dans le site de Komabangou « *les concentrations en Pb dans les rivières et aux sols près du site de l'orpaillage (site de Banbara Sossoriya) a été trouvé bien supérieur aux rivières et sols en périphérie de ce site et qui a leur tour présentent des teneurs plus élevées que celles des sols hors zone minière (site de Bandjo) suggérant ainsi une pollution au Pb de l'exploitation artisanale de l'or* » (Ibrahim et al., 2019).

Une fois mobilisé, le Pb sera distribué dans l'air, l'eau, la nappe phréatique, le sol ainsi que certains fruits, les végétaux, les viandes et produits de la mer (voir annexe 2).

✓ *Toxicités et risques sanitaires*

Le plomb est une substance toxique qui s'accumule dans l'organisme et a une incidence sur de multiples systèmes organiques.

Également perturbateur endocrinien avéré, ses principaux effets sont neurotoxiques, cancérigènes et perturbateurs des fonctions thyroïdiennes. Le plomb diminue la fertilité, retarde le développement mental, altère le développement du système nerveux, porte atteinte à la maturation sexuelle et peut même être à l'origine de fausses couches (Estaquier et al, 2021 ; Garnier, 2005 ; Glorennec et al., 2006)

Les personnes les plus vulnérables à l'exposition du plomb sont les fœtus dans les femmes enceintes et les jeunes enfants.

Les études ont montré que l'exposition au plomb chez l'enfant peut provoquer, même à des faibles doses, mais sur une longue durée d'exposition, des troubles irréversibles, notamment le trouble de langage, du comportement, troubles des apprentissages, ralentissement de la croissance, difficultés motrices, baisse de l'acuité auditive.

Chez les jeunes enfants, il existe une corrélation négative entre la Pbs d'une part, la taille, le poids et le périmètre thoracique, d'autre part (Garnier, 2005 ; Glorennec et al., 2006 ; Santé publique France⁶).

Les composés organiques du plomb qui peuvent provenir également de la combustion du carburant sont généralement classés reprotoxiques, nocifs par inhalation et dangereux pour l'environnement (Règlement (CE) n° 1272/2008) (INERIS, 2016).

Les antidétonants que sont le plomb tétraéthyle et le plomb tétraméthyle (utilisés dans des exploitations sauvages), sont responsables, par inhalation à cause de leur volatilité, d'une encéphalopathie et de l'atteinte neurologique centrale sont des céphalées, une asthénie, des troubles du sommeil (insomnie, cauchemars), des difficultés mnésiques et de concentration, une irritabilité, une diminution de la libido et des idées dépressives... (Garnier, 2005). Une étude récente a également mis en évidence une liaison entre cancer colorectal et exposition chronique au plomb tétraéthyle (Garnier, 2005).

A.1.4 Le Zinc (Zn), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Cadmium (Cd), le Magnésium (Mn), Manganèse (Mg), Aluminium (Al), le Fer (Fe) ...

✓ *Rappel de la source dans l'orpaillage*

Le **Zn** est utilisé dans l'orpaillage sous forme de copeaux après cyanuration pour capter les particules d'or par oxydoréduction.

Il est généralement présent du fait des fortes doses déversées dans des sites d'orpaillage. Le cas du site de Komabangou au Niger cité plus haut montre aussi qu'en plus de l'utilisation des copeaux de

⁶ <https://www.santepubliquefrance.fr/regions/ocean-indien/documents/bulletin-regional/2023/surveillance-des-plombemies-infantiles-realisees-a-la-reunion-entre-2017-et-2022>

zinc dans l'orpaillage, il y a dans le filon, la présence du minerai de blende (ZnS) associé à l'or (Abdou Amadou, 2020).

En fonction du fond géochimique d'une région, l'action de l'orpaillage peut libérer d'autres ETM dans l'environnement d'orpaillage (l'eau, l'air et le sol) que sont : **Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Mg, Al, Fe** ... (Abdou Amadou, 2020 ; Ibrahim et al., 2019).

✓ *Toxicités et risques sanitaires*

Le **Zn, Cr, Mn, Mg, Al, Fe et le Ni** sont des oligo-éléments et donc essentiels pour le bon fonctionnement du corps humain, notamment leurs implications dans les fonctions métaboliques à faibles doses (Cobbina et al., 2015).

S'ils sont libérés en grandes quantités dans la nature dans certains sites, une exposition chronique peut les rendre toxiques et cancérigènes à des certaines doses élevées (Crichton, 2016) :

- Les études ont montré que l'ingestion des quantités importantes de **zinc Zn** sous forme de poussières peuvent provoquer des problèmes de santé comme des crampes d'estomac, des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie, de très hauts niveaux de zinc peuvent endommager le pancréas et perturber le métabolisme des protéines et provoquer de l'arteriosclérose, une exposition intensive au chlorure de zinc peut provoquer des désordres respiratoires (Plum, 2010 ; Bettayeb, 2014).

- Quant au **cadmium Cd**, il est cancérigène et toxique même à faible dose, outre le fond géologique, il peut également provenir aussi de la fumée de la combustion du carburant. Perturbateur endocrinien, ses effets sont multiples : son inhalation peut causer des problèmes respiratoires, de l'ostéoporose et particulièrement toxique par ingestion pour le pancréas, le foie et les reins⁷.

« Il pénètre dans le corps par l'ingestion d'aliments contaminés (pour les non-fumeurs), et est principalement retenu dans le rein et accumulé dans le corps au cours d'une vie » (Barraza et al., 2018). Il requiert donc une attention particulière.

Le fait de manger des aliments ou de boire de l'eau contenant des taux de cadmium très élevés peut irriter l'estomac et provoquer des vomissements et de la diarrhée.

Aussi, la U.S, Environmental Protection Agency a établi que le cadmium cause probablement le cancer chez les humains, l'exposition chronique par inhalation est associée au cancer du poumon.

- Une relation entre l'exposition au **chrome Cr** et les cancers de l'appareil respiratoire et des reins a été constamment observée, outre, ces propriétés cancérigènes, le chrome cause de sévères diarrhées, des ulcères, et irrite la peau et les yeux. (Emmanuel, 2004).

La présence de **Zn** en grande quantité dans un site d'orpaillage ne fait aucun doute, le **Cd** étant cancérigènes et sans seuil, ils seront classifiés dans la liste des substances dangereuses.

⁷ www.pertubateur-endocrinien.com

Pour les restes des ETM cités dans cette section, n'étant pas sans seuil, leurs toxicités dépendent de leurs abondances dans la roche aurifère (fond géochimique).

A.2 Le Cyanure (CN⁻)

✓ *Rappel de la source dans l'orpaillage, distribution et interactions :*

L'utilisation du cyanure semble prendre plus de l'ampleur dans l'exploitation de l'or (artisanale et industrielle) que le mercure à cause du pourcentage de la récupération de l'or.

Le sel de cyanure est utilisé dans l'orpaillage comme additif avec les acides nitriques et sulfuriques. Il proviendrait également des habitudes ou mode de vie tel que la fumée de la cigarette, fortement consommée dans ce cas.

Le schéma de transfert des molécules va se présenter de la manière suivante :

- Une partie agira avec l'acide nitrique pour produire l'acide cyanhydrique, un gaz volatil.
- Une partie ruissellera dans le sol (bain de cyanuration) et pourra finir dans l'eau de rivière, la nappe phréatique ou encore les bassins à résidus.

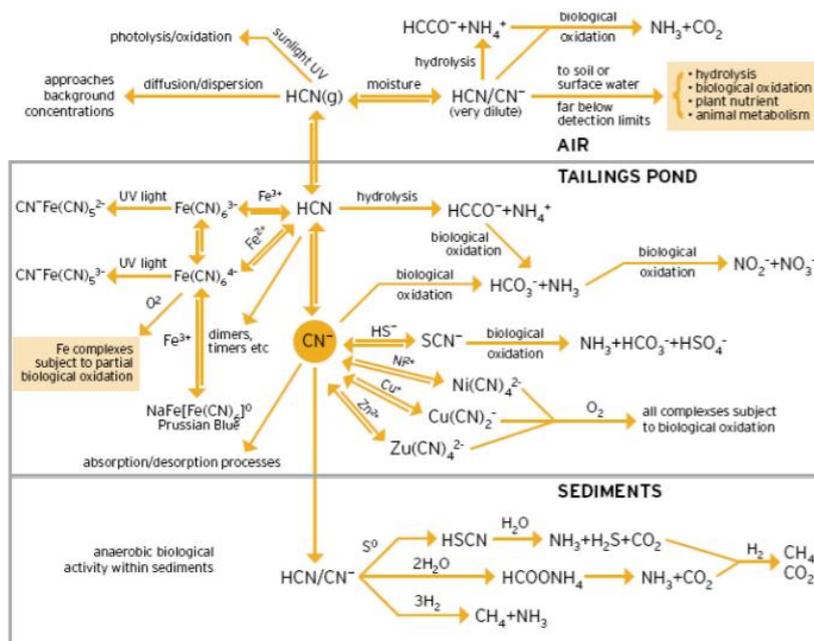


Figure 4 : Distribution du cyanure et interactions (Source : BRGM, 2013)

Les cyanures dans l'atmosphère se présentent essentiellement sous la forme gazeuse HCN.

Dans le sol, le cyanure est sous forme d'ion libre CN⁻ et est décomposé par le soleil et la chaleur en des produits moins toxiques que sont les cyanates et les thiocyanates ; il se dégrade aussi en d'autres composés que sont les nitrites et nitrates. Les cyanures sont modérément mobiles dans les sols, et cette mobilité est d'autant plus faible que le pH est acide. **Dans l'eau**, les cyanures sont particulièrement présents sous la forme HCN, composé hautement soluble. A des pH < 8, la forme cyanure libre est retrouvée à plus de 93 %. Il ne s'accumule pas dans la chair des mammifères,

oiseaux et organismes aquatiques. Sa demi-vie est comprise entre 10 et 24 jours (Puskarczyk, 2006 ; Artisanal Gold Council, 2015 ; BRGM, 2013 ; INERIS, 2011).

✓ *Toxicités et risques sanitaires*

Lorsque les concentrations sont élevées comme cela peut être le cas dans l'orpaillage, le cyanure est très toxique. Il représente un danger pour l'humain s'il atteint les sources d'eau potable et les végétaux (ONU/UNEP, 2006).

Repris par les fiches de l'INRS, l'ATSDR fixe les valeurs limites orales à 50 µg/kg/j pour une exposition sub-chronique et à 15 µg/kg/j pour une exposition chronique pour les cyanures et ses dérivés et une valeur limite à 25 µg/m³/j pour l'inhalation chronique de l'ion cyanure (INERIS, 2011).

Chez l'homme, « *les principaux effets observés lors d'une exposition aux cyanures par inhalation sont respiratoires locaux, des atteintes du système cardiovasculaire, du système hématologique (élévation de l'hémoglobine et du nombre de lymphocytes, basophilie ponctuelle des érythrocytes), du système nerveux (maux de tête, fatigue, modifications des sensations olfactives et gustatives) et de la glande thyroïde (hypertrophie moyenne à modérée de la thyroïde, blocage de l'absorption de l'iode par la thyroïde, augmentation des niveaux de TSH sanguins : thyroid-stimulating hormone)* » (Puskarczyk, 2006 ; INERIS, 2011).

Le CN⁻ formera avec l'acide nitrique, l'acide cyanurique (HCN⁻), un composé très toxique avec effet immédiat. Dans le cas d'une intoxication par le HCN⁻ (gazeux), les taux de concentration atmosphériques supérieurs à 50 ppm respirés pendant plus d'une demi-heure représentent un risque important d'effets néfastes. Des taux de 200 à 400 ppm ou plus peuvent entraîner la mort après une exposition de quelques minutes. À titre indicatif, la dose létale pour le rat est de 484 ppm pour une exposition de cinq minutes d'après les études recueillies par l'INERIS (INERIS, 2011).

Le CN⁻ formera également des complexations avec les autres métaux dont la toxicité dépendra de la facilité à laquelle il peut être dissocié de ce complexe.

Tableau 5 : Toxicité du cyanure et ses composés

Réf.	Désignation	Dénomination analytique réglementaire	Spéciations / composés	Cte d'équilibre	Solubilité g/100mL	Toxicité/poisson LC50 en mg/L
1	Cyanure libre	Cyanure libre	CN ⁻	-	-	~ 0,1
			HCN _g	9,2	9,2	0,05 – 0,18
2	Cyanures composés simples A_ solubles	Cyanure libre	KCN(s)	-	71,6 (25°C)	0,03 – 0,08
			NaCN.2H ₂ O(s)	-	34,2 (15°C)	0,4 – 0,7
			Ca(CN) ₂ (s)	-	-	-
2	Cyanures composés simples B_ Relativement insolubles	Cyanures Aisément libérables <i>terme anglais: WAD (weak acid dissociable)</i>	CuCN(s)	19,5	-	-
			Zn(CN) ₂ (s)	15,9	-	-
			Ni(CN) ₂ (s)	-	9,1x10 ⁻⁴ (15°C)	-
3	Cyanures faiblement complexés / faiblement liés	Cyanures aisément libérables <i>anglais: WAD (weak acid dissociable)</i>	Cd(CN) ₄ ²⁻	17,9	-	-
			Zn(CN) ₄ ²⁻	19,6	-	0,18
4	Complexes cyanurés modérément ou faiblement liés	Cyanures aisément libérables <i>terme anglais: WAD (weak acid dissociable)</i>	Ni(CN) ₄ ²⁻	30,2	-	0,42
			Cu(CN) ₂ ⁻	16,3	-0,26	-
			Cu(CN) ₃ ²⁻	21,6	-	0,71 (24h)
			Cu(CN) ₄ ³⁻	23,1	-	-
			Ag(CN) ₂ ⁻	20,5	-	-
5	Complexes cyanurés fortement liés <i>anglais: SAD (Strong acid dissociable)</i>	Intégrés dans les cyanures totaux	Fe(CN) ₆ ⁴⁻	35,4	-	35,0 (jour) et de 860 à 940 (nuit)
			Fe(CN) ₆ ³⁻	43,6	-	-
			Co(CN) ₆ ⁴⁻ , Au(CN) ₂ ⁻	38,3	-	35,0 (jour) et de 860 à 940 (nuit)
6	Produits de dégradation des cyanures	Thiocyanates	SCN ⁻	-	-	50 – 200
		Cyanates	CNO ⁻	-	-	34 - 54

(BRGM, 2013)

A.3 La Silice Cristalline (SiO₂)

✓ Rappel de la source dans l'orpaillage et Distribution :

La poussière de la silice cristalline provient de la fracturation, du concassage et du broyage de la roche contenant du quartz ainsi que d'autres minerais. Cette poussière peut être inhalée par les orpailleurs et en fonction de la proximité et de la vitesse du vent, elle peut atteindre les populations avoisinantes.

Collée aux orpailleurs, cette poussière peut être inhalée, quoiqu'à moindre mesure, par leurs familles et notamment les enfants, si en rentrant à la maison un contact direct est établi.

✓ Toxicités et risques sanitaires

La silice cristalline est classée comme toxique et cancérigène. Il existe un risque sanitaire particulièrement élevé pour une exposition à des niveaux supérieurs ou équivalents à la Valeur Limite d'Exposition Professionnel sur 8h (VLEP 8h) de 0,1 mg.m⁻³ en France.

Les poussières de silice cristalline peuvent induire une irritation des yeux et des voies respiratoires, des bronchites chroniques et une fibrose pulmonaire irréversible nommée silicose. Cette atteinte pulmonaire grave et invalidante n'apparaît en général qu'après plusieurs années d'exposition et son évolution se poursuit même après cessation de l'exposition.

Elles sont aussi associées à de nombreuses pathologies telles que la tuberculose pulmonaire, le cancer du poumon, les maladies pulmonaires obstructives chroniques (MPOC), certaines maladies auto-immunes et rénales, etc (Cavalin et al., 2013 ; Artisanal Gold Council, 2015, INRS, 2022).

Par ailleurs, la présence des poussières miniers en grande quantité de tous les composés associés pose un problème sanitaire, une étude épidémiologique de mortalité chez les mineurs et salariés des mines et produits chimiques de Salsigne menée par le CIRC et l'INRS a démontré l'existence d'une relation significative entre l'exposition aux poussières de mines d'or et cancers broncho-pulmonaires, mais aussi cancer colorectal, chez les mineurs tout autant que chez les autres ouvriers de l'usine de traitement du minerai (Verdier, 2021 ; INRS, 2022).

A.4 Les Acides

✓ *Rappel de la source dans l'orpaillage, distribution et interaction :*

Parmi les acides qui peuvent se retrouver dans un site d'orpaillage, voici les principaux : l'acide nitrique, HNO_3 , l'acide chlorhydrique HCl , l'acide sulfurique H_2SO_4 . Ils sont apportés comme additifs.

Comme déjà évoqué dans les lignes précédentes, les acides jouent un rôle majeur dans la distribution des ETM. En état liquide, ils vont lixivier la roche en libérant ses éléments constitutifs. Ensuite, ils vont accélérer leurs mobilités dans le sol et enfin augmenter leurs accumulations dans les végétaux et certains organismes tels que les poissons.

En interagissant avec le CN^- , ils forment un complexe, le cyanure d'hydrogène.

Le schéma de transfert peut être représenté selon le graphique suivant :

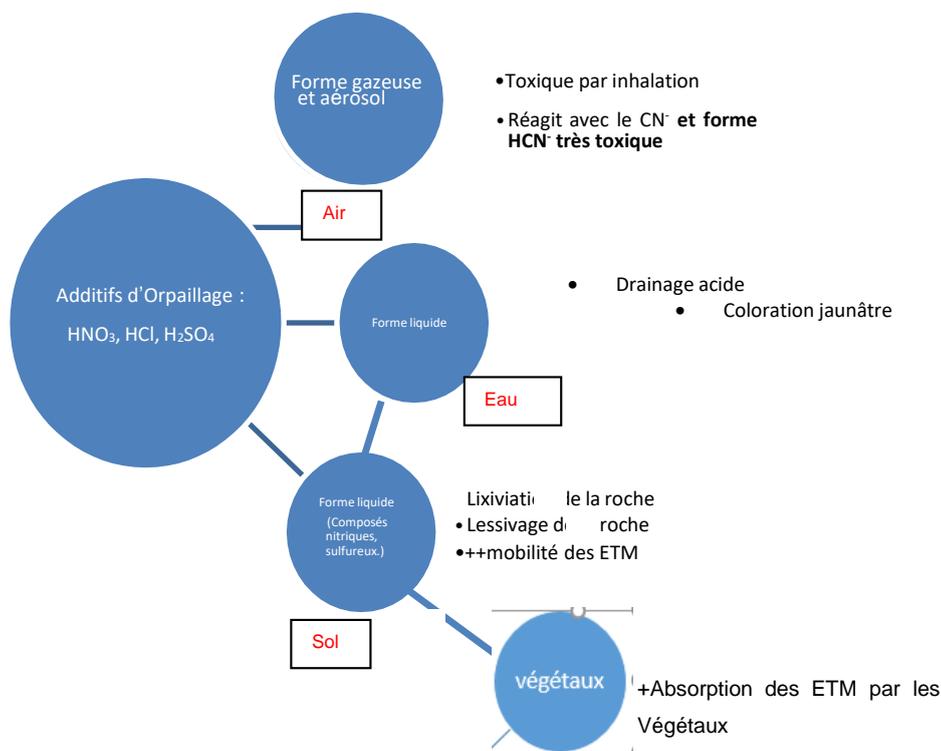


Figure 5 : Distribution des acides et interactions

✓ *Toxicités et risques sanitaires*

En dehors des interactions déjà évoquées, l'acide sulfurique et chlorhydrique provoquent également des brûlures de la peau et graves lésions des yeux, irritent les voies respiratoires (Guidotti, 1976 ; Emani et al, 2009 ; INRS, 2020 ; Ministère du Travail, du Plein emploi et de l'Insertion, 2021).

L'acide nitrique au contact avec la peau peut entraîner des graves brûlures. L'inhalation des vapeurs peut entraîner une détresse respiratoire allant jusqu'à un œdème pulmonaire. En cas d'émission accidentelle (explosion ou incendie) d'acide nitrique, la co-exposition à du nitrate NO_2 liquide n'est pas exclue, ce qui conduira à l'inhalation du NO_2 et HNO_3 liquides sous forme d'aérosol (INERIS, 2020). L'inhalation de NO_2 à des concentrations élevées, peut entraîner une séquence triphasique de bronchospasme aigu, d'œdème pulmonaire retardé et de bronchiolite oblitérante tardive. De faibles concentrations semblent induire une fibrose pulmonaire en cas d'exposition chronique et inhiber les mécanismes de défense pulmonaire, en particulier la fonction des macrophages et la motilité ciliaire. Des études sur des populations animales et humaines suggèrent que le plus grand risque lié à une exposition à long terme à de faibles doses est la réduction de la résistance de l'hôte aux infections virales et bactériennes des voies respiratoires. (Guidotti, 1978 ; Emani et al, 2009).

Une étude expérimentale sur les animaux (souris) réalisé en 1981 et publié en 2013 a montré que la fréquence des métastases ou la facilitation de la propagation des cellules cancéreuses transmises par le sang dans les poumons des animaux est influencé l'inhalation aigu du dioxyde d'azote (NO_2) (Richters et Kuraitis, 2013).

B. LES COMPOSES ORGANIQUES AYANT DES EFFETS TOXIQUES

✓ *Source, distribution et interactions avec d'autres molécules*

Parmi les composés organiques apportés dans l'orpaillage, on peut citer :

- Les détergents ;
- Les produits de la combustion du carburant ;
- Les déversements des hydrocarbures, huiles moteurs, bois et charbon ; la combustion du charbon et l'incinération des déchets.

La distribution de ces composés et les interactions se présentent comme ceci :

- Une fois libérés, ils seront bien évidemment distribués dans divers compartiments environnementaux, tels que **l'air**, **les eaux** souterraines et de surface, les plantes, les sédiments et le **sol**.
- Ils vont permettre une accumulation accrue des ETM dans les végétaux (Barraza et al., 2018).
- Evoqués dans les lignes précédents, Leurs interactions avec les métaux lourds peuvent conduire à des composés organiques beaucoup plus complexes et plus stables dans l'environnement tel que le méthylmercure.

✓ *Toxicités et risques sanitaires*

B.1 Les Détergents (tensioactifs)

L'utilisation des détergents en très grande quantité a des nombreux d'impacts directs sur l'environnement (notamment l'eutrophisation des rivières, la perturbation des organismes aquatiques, la contamination de la nappe phréatique, en apportant des nutriments et des sels minéraux comme les phosphates, les nitrates, l'ammonium, le bore) (Gruau et al., 2004).

Toutes les composantes de détergents ne sont pas biodégradables et finissent par s'accumuler dans les eaux de surface, le sol, et même dans les organismes vivants. Leur utilisation peut amener également à des conséquences sanitaires, illustrées par quelques exemples suivants :

- L'excès des phosphates (composantes de la plupart de détergents encore utilisés) permettra l'accumulation des ETM dans des végétaux (Barraza, 2017).
- Il existe également des substances non biodégradables, présentes dans certains détergents, comme les phosphonates, les polycarboxylates, l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA) et l'acide nitrilotriacétique NTA.

L'EDTA complexe les métaux lourds et peut se fixer dans un organisme. Le NTA est quant à lui une substance cancérigène, une fois rejeté dans un cours d'eau, il se lie aux ETM présents dans la vase, le libère dans l'eau et leur ouvre les portes de notre chaîne alimentaire (Rekab, 2014).

- Certains solvants composants de détergents sont des substances toxiques telles que les paradichlorobenzène, phénol ou phénols halogènes. On retrouve ainsi les alkylphénols, des perturbateurs endocriniens dans des produits comme les détergents, mais aussi comme additifs des carburants. (INRS ; Rekab, 2014, Barraza, 2017 ; Service fédéral belge de santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement, 2016).
- Les conservateurs : certaines lessives contiennent du formaldéhyde, une substance reconnue cancérigène. L'Agence française de la sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, AFSSET, « *fait état d'études épidémiologiques mettant en évidence des niveaux de risque de cancer du nasopharynx associés à des expositions aériennes à long terme variées et correspondant à des secteurs d'activités professionnelles. L'augmentation du risque est associée à une exposition à une répétition de pics d'au moins 5 mg/m³* » (AFSSET, 2008)⁸. Ce risque peut être considéré comme faible dans des activités à ciel ouvert. Toutefois, le formaldéhyde provient également de la fumée du tabac. Son exposition peut devenir inquiétante en fonction des habitudes et comportements.

⁸<https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lafsset-relatifs-%C3%A0-%C3%A0-%C3%A0-%C3%A0-%C3%A0-valuation-des-risques-sanitaires-pour-la-0>

B.2 Les Résidus organiques de combustion du carburant

La plupart des produits de la combustion du carburant sont classés parmi les toxiques, cancérigènes et perturbateurs endocriniens (voir liste des substances en **annexe 3**). Ayant décrit quelques-uns dans les lignes précédentes (dont les métaux...), cette partie ne s'intéresse qu'aux composés organiques et en particulier aux volatils (COV).

En effet, Les COV est une famille de substances définies par leurs caractéristiques analytiques (du carbone et de la volatilité à température donnée).

Ces composés sont également modérément à fortement hydrophobes et sont largement distribués dans divers compartiments environnementaux, tels que l'air, les eaux souterraines, les animaux et les plantes, les sédiments et le sol (Zhang et al., 2022).

Les COV issus de la combustion des carburants sont le CO₂ et le CO, mais aussi les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP (dont le benzène et le toluène), qui seront associés aux effets toxiques.

Les études épidémiologiques, transversales, ont révélé l'existence d'un lien entre des symptômes respiratoires et une exposition à des concentrations plus élevées de COV (Cassette et de Blay, 2008). L'exposition à court terme à des composés volatils peut amener des symptômes tels que des maux de tête, étourdissement, nausée, toux et problème respiratoire, oppression thoracique et irritation des yeux, du nez et de la gorge. L'exposition à long terme peut entraîner des problèmes chroniques plus graves tels que des maladies cardiovasculaires, des maladies cardiopulmonaires, et cancers du poumon (Ostro et al., 2010).

Des études longitudinales, plus récemment, semblent suggérer l'implication d'une exposition aux COV tant dans la modification de la réponse immunitaire lors d'une exposition maternelle pour le fœtus, que dans l'apparition ou dans l'augmentation du risque d'asthme et de symptômes respiratoires (Cassette et de Blay, 2008).

L'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP est également cancérigène.

Seize (16) types de HAP ont été répertoriés comme polluants prioritaires par l'Environmental Protection Agency des États-Unis (US EPA), dont sept s'accumulent inévitablement chez les humains par inhalation d'air, ingestion de nourriture et absorption cutanée (Zhang et al., 2022).

B.3 Les pertes et déversement des hydrocarbures, huile moteur, combustion du charbon, bois et déchets plastiques

Les pertes des hydrocarbures et huiles moteurs renversés sur le sol ainsi l'utilisation de charbon ou de bois en grande quantité pendant l'orpaillage constituent l'autre source de l'enrichissement des composés organiques dans le sol ou l'eau. Ces utilisations s'accompagnent également d'une pollution environnementale.

Du point de vue sanitaire, outre l'augmentation de l'accumulation des métaux dans les végétaux évoqués dans les lignes précédentes, la combustion incomplète du charbon, du bois produira du monoxyde de carbone CO, gaz inodore, toxique et potentiellement mortel par inhalation notamment dans un espace clos.

La combustion des objets plastiques qui libèrera les dioxines, le mercure, phtalates, les biphénols polychlorés... des produits cancérigènes et perturbateurs endocriniens.

S'agissant des activités à l'air libre, une exposition à ses substances gazeuses peut être limitée. Il dépendra toutefois des investigations.

En effet, les engins à moteurs diésel sont normalement positionnés à l'extérieur des galeries. Toutefois, le fait qu'il s'agissent des exploitations sauvages sans aucun règle dont la logique dépend de l'urgence, une tentative à les positionner dans un fond des galeries n'est pas à écarter.

Aussi, la possibilité qu'ils soient positionnés dans des espaces clos voir dans des habitations à la tombée de la nuit, existe belle et bien. Cette possibilité est renforcée par la présence des pluies ou la crainte des voleurs.

C. LES AGENTS PHYSIQUES

C.1 L'exposition au bruit

D'après les études repris par l'INRS, pour une journée de travail (8 heures), l'ouïe est en danger à partir de 80 dB(A). L'exposition inférieure à 135 dB doit être de courte durée. Toute exposition supérieure à 135 dB, même de très courte durée, est dangereuse et non réglementaire (INRS, 2022). L'exploitation artisanale de l'or a besoin des groupes électrogènes, des motopompes, des concasseurs, des moulins, des meules, les engins de déplacement (motocyclique)...

A titre d'exemple, les fourchettes de puissances acoustiques observées sur quelques matériels courants sont celles-ci :

- ✓ Cribles 103 - 120 dB
- ✓ Concasseurs 97 - 122 dB
- ✓ Broyeurs à barres 105 - 118 dB
- ✓ Drague suceuse 104 - 112 dB
- ✓ Groupe électrogène (essence ou diesel) 120 - 130 dB
- ✓ Motopompe 95 dB

(Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers, 2000⁹ ; Fabrication Aéraulique et Acoustique F2A¹⁰).

Bien que les niveaux sonores ne s'additionnent pas, mais suivent une logique logarithmique (BRUITPARIF, 2019), l'ensemble de ces matériels génère des puissances sonores bien supérieures

⁹ <https://www.unicem.fr/wp-content/uploads/bruit-carrieres-1-approche-pratique.pdf>

¹⁰ https://www.f2a.fr/wp-content/uploads/2018/08/Groupes_Electroge%CC%80nes.pdf

à 135 dB.

Les orpailleurs, mais également la population environnante, ne portent pas d'équipements de protection anti-bruit et sont donc soumis à une telle puissance sonore de façon répétitive.

Tenant compte de la durée minimum d'une vingtaine d'années pour une activité d'orpaillage, une exposition prolongée aux bruits pour des orpailleurs ou des habitants au périphérique de ces activités peut causer :

- ✓ La fatigue auditive (sifflement, bourdonnements),
- ✓ La surdité,
- ✓ Des troubles du sommeil,
- ✓ Des difficultés cognitives des enfants,
- ✓ Des risques des maladies cardio-vasculaires, hypertension.
- ✓ Des stress et obstruction du vaisseau sanguin.

(Muzet, 2006 ; Walker, 2015; Bureau régional Europe de l'Organisation Mondiale de la Santé, 2018 ; INRS, n.d.).

C.2 Les appareils vibratoires et mouvements répétitifs

Pour les vibrations transmises aux membres supérieurs, **les articles R. 4443-1 et R.4443-2** du Code du travail français fixent deux (2) valeurs seuils d'exposition journalière (pour 8 heures de travail quotidiennes) : au-delà de 2,5 m/s² de mesures de protections doivent être prises afin de réduire au minimum l'exposition et le seuil de 5m/s² d'exposition journalière ne doit jamais être dépassée.¹¹

La conduite des engins et/ou les appareils vibratoires, évoqués dans la partie précédente, se fait sans gants appropriés ou autre protection.

Elle constituerait donc une source d'exposition physique supplémentaire amenant des problèmes sanitaires suivantes :

- L'utilisation d'appareils portatifs vibrante ou percutante peut provoquer des lésions au niveau de la main, du poignet, du coude, voire l'épaule et même la colonne cervicale, maux de dos.
- Les vibrations, mais également les mouvements répétitifs sont impliqués dans le déclenchement ou l'aggravation des troubles musculosquelettiques (TMS) avec plusieurs conséquences : altération de la sensibilité et de la dextérité, réduction de la force manuelle, douleurs, fourmillement, doigt blanc (syndrome de Raynaud), arthrose précoce, altération osseuse...(Tisserand et al., 1971 ; Imbernon, 2008 ; INRS, 2023).

¹¹ INRS : <https://www.inrs.fr/risques/vibration-membres-superieurs/reglementation.html>
Perry LUMONO - Mémoire de l'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique – 2023

Pour résumer cette partie, il est évident que chacun des milieux, à savoir l'air, l'eau, le sol, va être source d'exposition. Les particules libérées vont prendre plusieurs états (solide, liquide et gazeux) :

- Connus pour comme étant des toxiques et cancérigènes, mais aussi perturbateurs endocriniens avérés par leurs propriétés intrinsèques, la plupart des Eléments-trace métalliques, ETM (métaux lourds) que sont pour Hg, Pb, As, Cd, vont être libérés par **l'orpaillage** dans tous les états de la matière et à concentrations être assez élevée. Ils sont libérés par la somme des sources que sont les additifs apportés, l'excavation et la lixiviation de la roche.
- Ces ETM vont circuler et interagir avec d'autres éléments additifs ou retrouvés dans cet environnement d'orpaillage que sont principalement les acides et les matières organiques, mais également les agents biologiques.
- Les interactions donneront lieu à d'autres composés complexes parfois bien plus toxique que le composé élémentaire dont peut citer le méthyl mercure MMHg, le dimethylarsine DMA et le monométhylarsine MMA.
- S'ensuivra une augmentation de la mobilité ainsi qu'une accumulation accrue dans les végétaux et organismes marins à la suite de ces mêmes interactions.
- Les acides, additifs de l'orpaillage, seront eux-mêmes toxiques à l'état gazeux à la suite des opérations de brulage.
- S'ajoutera pareillement l'inhalation répétée des produits toxiques, cancérigènes et perturbateurs endocriniens de la combustion du carburant, du bois et des plastiques, et l'acide cyanurique, l'ingestion du cyanure, de la silice cristalline, l'exposition au bruit et aux vibrations ainsi que l'exposition vectorielle et microbiologique.

La liste des substances dangereuses pour la santé liée à l'orpaillage peut donc s'allonger comme ceci : **Hg, MeHg, Pb, As, MMA, DMA, Cd, Ni, Zn, Al, Mn, Cu, Co, SiO₂, CN⁻, HNO₃, H₂SO₄, HCl, HCN⁻, COV (CO, HAP, ...)** en ajoutant des facteurs physiques tel que le **bruit, les vibrations des membres du corps et des mouvements répétitifs**.

La présence du **EDTA, NTA, formaldéhyde, dioxines, phtalates, alkylphénols ou bisphénols polychlorés** est également à signaler même si une exposition significative dépendra des investigations sur terrain.

II.2 ANALYSE DES DIFFERENTES VOIES D'EXPOSITION AUX SUBSTANCES DANGEREUSES

Le schéma de transfert des molécules a montré qu'en plus des substances ajoutées lors des process, les populations sont également exposées à celles venant de la géologie ainsi que des complexations qui se forment par interactions.

Cette exposition est conditionnée par les habitudes et comportements liés au travail et au quotidien des populations.

L'ensemble des voies de contact entre les populations et ces substances/agents dangereux seront les suivantes :

Voie d'inhalation

L'inhalation concernera les particules gazeuses et les poussières très fines.

- ✓ L'une des particularités de l'orpaillage est de brûler des produits chimiques à chaque étape de traitement ; parmi les substances qui feront partie des **émissions gazeuses**, on peut citer : le **Hg, HNO₃, H₂SO₄, HCl, HCN**, ainsi que la liste non exhaustive des **COV** et probablement les **phtalates, le formaldéhyde, les dioxines, les alkyphénols** et les métaux lourds (**As, Pb, Cd...**) provenant de la fumée du tabac.
- ✓ L'inhalation des **poussières** pénètre plus ou moins profondément dans le système respiratoire et s'y dépose en amenant une surcharge pulmonaire. Elle est fonction de la taille et de la masse des particules qui les constituent (INRS, 2022) et de la distance entre la source et les cibles. Pour rappel, afin d'obtenir les pépites d'or, l'orpaillage a besoin des concasseurs et broyeurs de plusieurs dimensions qui se relayaient pour produire de la farine et préparer au pré-traitement chimique. La poussière inhalée contiendra principalement des ETM dont on peut citer (selon la géologie) les molécules du **Pb, As, Cd, Ni, Zn, Al, Mn, Cu, Co, SiO₂, etc.**

Ainsi :

- L'orpaillage sera exposé directement à l'inhalation des poussières et des formes gazeuses, des substances qui s'absorbent beaucoup plus rapidement et facilement que les formes solides ou liquides. Cette inhalation produira des effets, allant de l'aigu au chronique.
- Quant aux autres populations environnantes, l'intensité de l'exposition dépendra de la vitesse et la direction du vent, de la distance entre le site et le lieu d'habitation ainsi que des propriétés des polluants telles que la volatilité et la densité ou encore la granulométrie des poussières.

Voie d'ingestion

- ✓ Une partie de la **poussière** des ETM (avec des dimensions supérieures à celles inhalées) sera ingérée par les orpailleurs et la population, en fonction de la proximité et/ou des conditions météorologiques.

Les poussières déposées sur les habits d'orpailleurs peuvent aussi, lors de leur retour à domicile, être ingérées par leurs familles et notamment les enfants.

Les enfants vivant autour de l'activité ingéreront également de la poussière par leur comportement main-bouche plus intense (Glorennec et al, 2012).

- ✓ **L'ingestion par l'eau** : si la contamination de l'eau (de surface ou souterraine) a été établie tout au long de ce travail, son ingestion est liée à ses usages et aux traitements avant consommation.

Il est à priori fort probable qu'au vu des conditions de vie des sites d'orpaillage et des populations avoisinantes que ces toxiques finissent par être ingérées en consommant l'eau.

La liste des ETM qui peuvent être ingérées par l'eau sera composé de : **Hg, CN⁻, As, MMA, DMA, EDTA, NTA, Pb, As, SiO₂, Cd, Ni, Zn, Al, Mn, Cu, Co, HCl, HNO₃, H₂SO₄...**

- ✓ **L'ingestion des aliments** : en dehors du **Cd**, la plupart des ETM ont généralement tendance à s'accumuler dans les racines mais à remonter plus difficilement dans la partie supérieure des végétaux (Barraza, 2017).

Une attention plus particulière devra donc être portée sur la consommation des produits à racine tels que le manioc, le riz, les patates douces qui contiendront les quantités accumulées des métaux excédentaires par la suite du pH acide et la présence des matières organiques. (Castro et al., 2015 ; Kumar et al., 2016 ; Mulware, 2013).

Pour autant, les fruits et la partie supérieure des végétaux ne doivent pas être négligés, car les ETM vont être absorbés par transfert foliaire après dépôt atmosphérique des poussières sur la surface des feuilles (Gajbhiye et al., 2016 ; Shahid et al., 2018). Ce transfert foliaire est pris en compte du fait des concentrations élevées de poussières de métaux dans l'air lors de l'orpaillage, sachant que très peu d'ETM passent à l'état gazeux (Smolders, 2001).

A noter que dans certaines régions, par manque de temps et d'eau potable, ce qui peut être le cas de l'orpaillage, les fruits sont mangés sans être lavés.

Le **CN⁻** peut être également ingéré par les fruits à noyaux tels que les amandes, les abricots ou encore les légumes ou dans les racines de manioc (voir les modes traditionnels de préparation et de cuisson pour ce cas).

L'ingestion par l'alimentation des produits de la **chasse** et les **poissons** sont également à

prendre en compte notamment pour le **MeHg** qui va être ingéré via la consommation des poissons locaux.

L'ingestion par l'eau et par des aliments (végétaux et fruits) des toxines concernera l'ensemble de la population (y compris les orpailleurs).

Voie cutanéomuqueuse

L'orpailleur utilise ses mains pour manipuler les produits et les mélanges chimiques. Un contact cutané est donc établi tout au long de sa carrière professionnelle.

Aussi, l'eau étant une denrée rare sur les sites, l'orpailleur, les enfants et la population en général sont souvent amenés à utiliser des rivières à proximité pour se laver (toilette corporelle), faire la lessive ou même la vaisselle dans certains cas.

La recommandation l'OMS en ce qui concerne la voie cutanéomuqueuse est celle-ci : « *bien que le contact cutané ne représente généralement qu'un faible pourcentage dans l'évaluation des risques, cette voie est pertinente dans certaines conditions, en particulier pour les jeunes enfants...où nager et se baigner dans des eaux contaminées ainsi que jouer à l'extérieur sont des activités courantes* » (OMS, 2014).

Sachant qu'il s'agit de molécules qui sont cancérogènes (sans seuil), il serait judicieux de tenir également compte de cette voie.

II.3 SCHEMA CONCEPTUEL DES EXPOSITIONS

La multitude de voies d'exposition associées aux multiples sources de substances montrent que les doses des substances toxiques absorbées (inhalées + ingérées + cutanées) devraient être assez élevées lors de ces activités artisanales.

Il existe donc une forte probabilité de l'apparition des risques sanitaire énumérés chez les populations liées à l'exposition de ces substances.

Le schéma conceptuel des expositions se présente de la manière que voici :

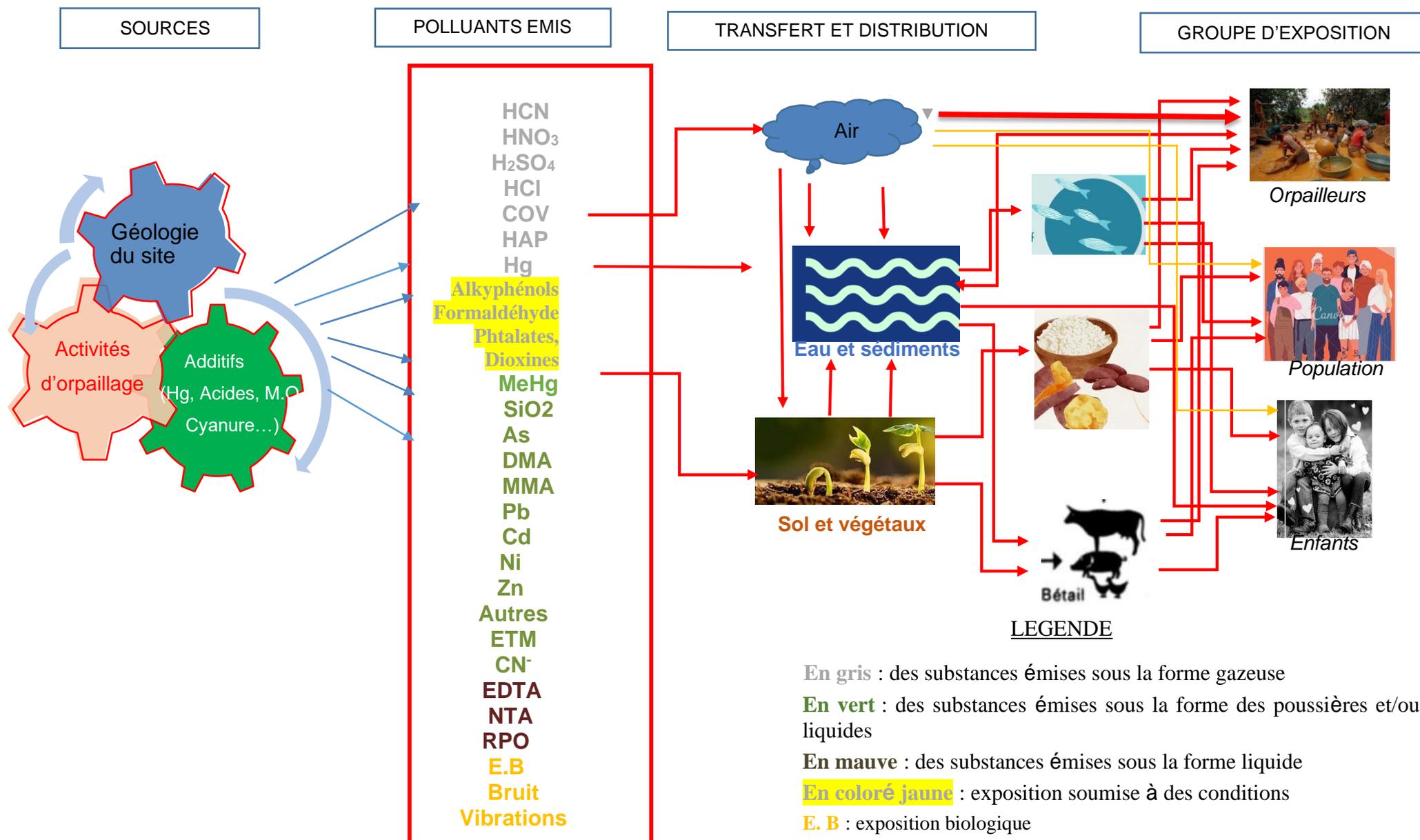


Figure 6 : Schéma conceptuel des expositions

II.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE

Tout compte fait, Il apparaît clairement que les risques sanitaires liés aux activités d'orpaillage pourront être attendus pour l'ensemble des groupes de populations (orpailleurs, enfants et les restes de la population).

Les effets sur la santé de cette multi-exposition pourront être à la fois **aigus** et **chroniques** en même temps.

La gravité de ces effets dépendra non seulement de la forme chimique dans laquelle chaque élément se trouve (élémentaire, inorganique ou organique), de la voie d'exposition (inhalation, ingestion ou contact cutané), de la fréquence et de l'intensité de cette d'exposition, mais aussi du cumul des atteintes potentielles.

Par rapport aux les expositions aiguës, les formes gazeuses qui sont généralement absorbées plus facilement et rapidement que les autres formes peuvent, de ce fait, être plus nocives.

Certains effets aigus sur la santé tels que les problèmes d'étouffement, crampes d'estomac...peuvent disparaître à l'arrêt de l'exposition.

Concernant les expositions chroniques, la plupart des effets à seuil ou sans seuil vont se manifester bien plus tard et pourront être graves, cancérigènes et irréversibles selon la molécule et les doses.

Les perturbateurs endocriniens également présents dans cet environnement pourront amener à des malformations des générations futures.

La manifestation non immédiate des problèmes de santé peut conduire un bon nombre des politiques et populations à minimiser cette problématique sanitaire.

Pour autant, les populations seront encore plus vulnérables, d'autant plus, il faudrait associer ces risques chimiques aux facteurs aggravants tels que les conditions de précarité évoquée précédemment.

Avec une forte probabilité d'apparition, les effets néfastes sur la santé des orpailleurs et des populations environnantes peuvent être résumés dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Substances émises, complexes formés et effets sanitaires connus

Substances	Effets sanitaires connus
Hg, MeHg	Perturbateur endocrinien avéré, cancérigène : neurotoxique, néphrotoxique, troubles mentaux, dommage du cerveau fœtal en développement, lésions à la bouche, aux voies respiratoires et aux poumons, mort par insuffisance respiratoire
Pb	<p>Perturbateur endocrinien avéré, neurotoxiques, cancérogènes et perturbateurs des fonctions thyroïdiennes. Diminue la fertilité, retarde le développement mental, altère le développement du système nerveux, porte atteinte à la maturation sexuelle et peut même être à l'origine de fausses couches ...</p> <p>Chez les enfants (0-6ans) : des troubles irréversibles notamment le trouble de langage, du comportement, troubles des apprentissages, ralentissement de la croissance, difficultés motrices, baisse de l'acuité auditive...</p>
As inorganique DMA, MMA	<p>Neurotoxique et génotoxique, provoque des maladies cardiovasculaires périphériques, de l'anémie et des dysfonctionnements du système reproducteur</p> <p>Toxique et cancérigène</p>
Zn	<p>Crampes d'estomac ; irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie ;</p> <p>De très hauts niveaux de zinc peuvent endommager le pancréas et perturber le métabolisme des protéines et provoquer de l'artériosclérose ;</p> <p>Une exposition intensive au chlorure de zinc peut provoquer des désordres respiratoires</p>
Cd,	Perturbateur endocrinien, cancérigène, pouvant causer des problèmes respiratoires, de l'ostéoporose et particulièrement toxique pour le pancréas, le foie et les reins, Cancer du poumon...
Cr	Les cancers de l'appareil respiratoire et des reins ; provoque de sévères diarrhée, des ulcères, et irrite la peau et les yeux.
SiO ₂	Irritation des yeux et des voies respiratoires, bronchites chroniques et une fibrose pulmonaire irréversible nommée silicose, cancer broncho-pulmonaire, certaines maladies auto-immunes et rénales, les maladies pulmonaires obstructives chroniques (MPOC), cancer colorectal

HCN	Effets respiratoires locaux, des atteintes du système cardiovasculaire, du système hématologique (élévation de l'hémoglobine et du nombre de lymphocytes, basophilie ponctuelle des érythrocytes), du système nerveux (maux de tête, fatigue, modifications des sensations olfactives et gustatives) et de la glande thyroïde (hypertrophie moyenne à modérée de la thyroïde, blocage de l'absorption de l'iode par la thyroïde, augmentation des niveaux de TSH sanguins, la mort.
COV (Benzène, toluène, monoxyde de carbone, HAP)	Maux de tête, étourdissement, nausée, toux et problème respiratoire, oppression thoracique et irritation des yeux, du nez et de la gorge. Maladies cardiovasculaires, des maladies cardiopulmonaires, et cancers du poumon Modification de la réponse immunitaire lors d'une exposition maternelle, que dans l'apparition ou dans l'augmentation du risque d'asthme et de symptômes respiratoires Perturbateurs endocriniens suspectés, cancérigènes.
EDTA, NTA, Alkyphénols, Formaldéhyde Phalates, dioxines	Cancérigènes, perturbateurs endocriniens
HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , HCl	Brûlure de peau, irritation des yeux, détresse respiratoire, œdème pulmonaire
Bruit ; Vibrations du corps et mouvements répétitifs	Fatigue auditive (sifflement, bourdonnements), la surdité, des troubles du sommeil, des difficultés cognitives des enfants, des risques des maladies cardiovasculaires, hypertension. Des stress et obstruction du vaisseau sanguin. TMS, perte de sensibilité, maux de dos

Au vu de la faisabilité de telles études et par manque de capacité, il est également possible que ces maladies ne soient ni diagnostiquées, ni signalées dans des registres dans des régions d'orpillage.

La partie suivante discutera sur l'opportunité et le choix d'une étude sanitaire globale des expositions dans ce contexte.

III. DISCUSSION AUTOUR D'UNE ETUDE SANITAIRE PRENANT EN COMPTE LES EFFETS GLOBAUX DE L'ORPAILLAGE

III.1 PLAIDOYER D'UNE ETUDE SANITAIRE PRENANT COMPTE LA MULTI-EXPOSITION

La multiplicité des agents dangereux pour la santé humaine évoquées dans ce travail et les facteurs aggravants montrent que l'orpailage s'inscrit dans un contexte de multi-exposition.

Une étude sanitaire des expositions liées à l'orpailage devrait être guidée de plusieurs paramètres.

Si les contraintes et difficultés liées aux problèmes sécuritaires ou au caractère illégal jouent un rôle majeur dans les protocoles, les études sanitaires réalisées dans le contexte de l'orpailage et citées dans ce travail, mettent en évidence quelques molécules sans établir des valeurs réelles d'imprégnation de l'exposition des populations.

Ces études sont descriptives et concernent un échantillon très réduit de personnes, ce qui ne permet pas d'établir des liens de causalité. Les mesures de l'exposition physique liée aux bruits et aux vibrations sont inexistantes.

Un effort est fait en Guyane avec la réalisation de plusieurs études des mesures biologiques et épidémiologiques par Santé Publique France à la suite des pressions des associations. Dans le cas des sites africains, les études sanitaires réalisées sont rares et souvent moins rigoureuses. Les liens entre l'exposition et les décès des orpailleurs de Ouagadougou, étude citée au début de ce travail par exemple, n'ont pas été établis selon un protocole rigoureux (Sanou et al., 2019).

Aussi, les études dans le cas d'orpailage sont souvent réactives et non proactives. Elles interviennent pour donner suite à l'urgence d'une situation sanitaire ou de demande de la population et sont dictées par des moyens à mobiliser ainsi que par des conditions politiques, juridiques, techniques.

En agissant dans l'urgence, cette réponse est généralement orientée à trouver la solution à un cas de contamination d'une molécule sans toutefois conduire à un élargissement de l'étude à d'autres expositions tout aussi dangereuses pour la santé.

Au vu des expositions identifiées, des hypothèses solides sur le fait que les doses absorbées soient sans doute élevées (car les mêmes molécules se retrouvent dans plusieurs états physiques), un projet d'étude sanitaire ne devrait attendre aucune revendication ou urgence sanitaire pour être mise en place.

Également, les quelques données de dépistages ou de mesures des molécules dangereuses ainsi que des conditions précaires de vie des populations, qui augmenteraient leur vulnérabilité, devrait également justifier l'opportunité de mettre en place ce projet d'étude sanitaire.

Par ailleurs, proposer un protocole d'évaluation des expositions en se focalisant sur une ou deux substances chimiques comme cela a souvent été le cas, présenterait encore les mêmes limites.

Le schéma conceptuel élaboré dans ce travail (figure 8) et le tableau des effets sanitaires (tableau 6) montrent qu'une meilleure étude sanitaire pourrait, dans ce contexte, être plus globale en prenant en compte l'ensemble des expositions décrites précédemment.

Elle devrait prendre en compte les effets sanitaires non seulement des expositions chimiques, mais aussi physiques ainsi que les facteurs aggravants.

III.2 DEMARCHES DE LA REALISATION DE CETTE ETUDE

III.2.1 Identification de la zone d'étude

Une étude de la zone à investiger se fait généralement suite à l'observation ou la perception d'impacts environnementaux ou sanitaires, réels ou supposés, dans un territoire donné liés à :

- La proximité des sources émettrices de pollution, c'est-à-dire aux activités d'orpaillage ;
- Les milieux vecteurs de l'exposition à proximité (les courbes de l'eau de surface, puits souterrains, sols, plantations, direction du vent, données météorologiques...)
- Le signalement de pathologies en excès (vérifiées ou supposées) ;
- La qualité de l'environnement ou des plaintes au sujet de nuisances récurrentes (odeurs, poussières, bruit, vibrations...)
- L'expression d'une préoccupation partagée pour la santé des habitants.
- Etc

Afin d'évaluer le degré d'imprégnation par rapport aux autres territoires et d'établir une relation aux sources, une autre zone à proximité de la première pourra être désignée pour comparer les données récoltées ou mesurées.

III.2.2. La prise en compte du contexte local, socio-économique et culturelle

La mise en place d'une étude sanitaire ou d'une approche systémique « *est une démarche complexe et suppose une adhésion et une appropriation de l'ensemble des parties prenantes* » (Roue-le Gall et Legeas, 2014).

L'adhésion des populations à une étude dépend souvent de la prise en compte des paramètres socio-économique et culturels d'une région donnée.

Outre le fond géochimique, le registre des techniques utilisés par les artisans, une étude sanitaire dans le contexte d'orpaillage devrait également prendre en compte ces paramètres.

L'orpaillage en Guyane est réalisé en majorité par les immigrants brésiliens, d'où son caractère très illégal, alors que l'orpaillage en Afrique est réalisé par les populations locales en majorité. Cette activité se fait fréquemment avec l'accord, plus ou moins dissimulé, des autorités publiques et administratives. La perception des risques sanitaires n'est donc pas la même suivant une région ou un autre.

Ainsi, à la vulnérabilité liée aux conditions sociales, il faudrait ajouter à cette démarche, la perception des risques qui jouerait un rôle important dans l'adhésion des populations à une étude.

En effet, la perception des risques par les populations environnantes, (qui pourrait conduire à exercer une pression pour la réalisation des études sanitaires plus poussées), peut être ici influencée par des raisons économiques. Entre 80 à 100 millions de personnes dans le monde dépendent indirectement de l'exploitation minière artisanale comme moyen de subsistance, d'après le rapport d'Artisanal Gold Council, 2015).

De ce fait, les décès ne sont pas toujours signalés dans les registres et les causes non élucidées. A signaler également que ces populations n'ont que peu ou pas d'accès à des centres de santé qui pourraient aider à évaluer l'ampleur des problèmes.

Il est d'autant plus difficile, dans ce contexte de multiplicité de facteurs d'expositions d'expliquer aux populations, un lien direct entre un polluant chimique et un effet sur la santé.

Avoir plusieurs facteurs amenant des problèmes sanitaires pourrait également conduire à une sélection des risques dictée par les raisons économiques.

Ces différents facteurs de confusion liés à l'aspect socio-culturel ou encore à l'état de connaissance d'une population ne doivent pas être négliger dans l'élaboration d'une communication efficace.

La prise en compte de ces caractéristiques socio-économiques et culturelles devrait permettre également à identifier les groupes les plus vulnérables.

En résumé, outre le fond géochimique et les techniques utilisées, les deux paramètres qui permettront de faire un meilleur choix du protocole d'étude sanitaire sont :

- Contexte et caractéristique des sites d'orpaillage,
- Identification des groupes vulnérables en fonction du contexte.

2. 1.1 Cas de l'orpaillage en Afrique

a) Contexte et caractéristiques des sites d'orpaillage en Afrique

L'Afrique est concernée par de nombreux sites d'orpaillage qui sont répartis dans de nombreux pays dont les plus significatifs sont : le Ghana, l'Afrique du Sud, le Soudan, le Burkina Faso, le Niger, le Mali, la Côte d'Ivoire, le Tchad, le Sénégal, la Guinée, la Mauritanie, la République Démocratique du Congo...

La plupart des études sur l'orpaillage sont d'ordre socio-économique. La volonté de définir une réelle politique de santé publique en réponse à cette problématique par les autorités publiques et sanitaires semblent parfois submergée par les intérêts économiques (Bohbot, 2017).

Les sujets sanitaires sont plutôt pris en charge dans la majorité des cas par quelques organismes internationaux tels qu'Artisanal Gold Council, Programme Nation Unis pour l'Environnement (PNUE) et autres associations ou agences pour le développement. Ces organismes travaillent avec des instituts de recherche de la place.

Nous avons pu relever quelques caractéristiques communes aux différents sites d'orpaillage en Afrique qui devraient être prises en compte pour une étude d'évaluation des expositions :

- La majorité des sites emploie des femmes et des enfants qui commenceraient dès l'âge de 6 ans, d'après un rapport accablant de Human Rights Watch en 2011 et de l'agence Ecofin en 2018 ;
- Les habitations et les activités sont souvent à proximité immédiate de ces différents sites. A titre d'exemple, on peut citer le cas d'une école au Burkina Faso qui a été construite en plein site d'orpaillage pour permettre aux enfants de combiner orpaillage et scolarisation. (Ouedraogo & Ouedraogo, 2019) ;
- Certains sites d'orpaillage ne sont pas primaires, mais secondaires et spontanés, c'est-à-dire qu'il existe en plus de site d'exploitation de gisement d'or, des sites de traitement des "stériles" (des déchets achetés aux sites primaires de gisement d'or) dans le but d'essayer encore d'extraire les fines particules d'or restant. Cette pratique utilise en très grande quantité les produits chimiques et amène des contaminations supplémentaires notamment sur le trajet. C'est le cas du site de Poura au Burkina Faso.
- Autre élément à prendre en compte : l'exode régulier des populations locales. Les études d'imprégnation des molécules dans la population peuvent être complexes et partielles dans ce cas.

b) Identification des groupes vulnérables

En se référant au schéma conceptuel des expositions, les différents groupes vulnérables sont les suivants : les personnes pratiquant l'orpaillage (travailleurs : dont les enfants et les femmes, y compris enceintes), les enfants vivant à proximité ou sur le site (y compris les fœtus dans les ventres des femmes enceintes) ainsi que le reste de la population avoisinante.

Deux conclusions peuvent donc ressortir :

- D'une part, les personnes travaillant à l'orpaillage sont celles qui seront exposées à des doses plus importantes de contaminants (notamment les substances gazeuses) et aux nuisances par rapport aux autres groupes de la population.

- D'autre part, les effets sanitaires seront plus dévastateurs chez les fœtus et les enfants (0 - 6ans). Ceci à cause des facteurs tels que le poids corporel, la surface cutanée ou inhalation (au regard de la valeur toxicologique de référence, la dose absorbée sera bien plus importante par autres groupes), de la vulnérabilité de leur organisme pendant les phases de développement et des voies particulières d'exposition supplémentaires dont l'ingestion du sol.

Le contexte de l'orpaillage africain rappelé plus haut peut conduire à dégager un groupe extrêmement vulnérable, car il combine les deux conclusions, à savoir : **les enfant-orpailleurs**.

Si l'ensemble des différents groupes est très exposé et devra être pris en considération, ce groupe devrait être prioritaire en fonction des moyens disponible.

L'ordre final décroissant de vulnérabilité peut donc être celui-ci :

- ✓ Les enfant-orpailleurs et femmes enceinte-orpailleurs (en s'intéressant particulièrement aux fœtus) ;
- ✓ Les autres enfants et femmes enceintes vivant à proximité du site,
- ✓ Les orpailleurs adultes,
- ✓ Les restes de la population.

III.2.2 Choix de la méthodologie des mesures de l'exposition

Malgré quelques caractéristiques évoquées plus haut, proposer une étude détaillée d'évaluation des expositions demande plus d'investigation sur le terrain.

Un questionnaire pour des enquêtes plus poussées a été élaboré durant ce stage et se trouve en **annexe 4** de ce travail. Il a été envoyé le 25/03/2022 à l'institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2IE du Burkina Faso.

En réponse, un compilé des travaux de recherche et revue de presse tournant essentiellement autour du mercure et cyanure et des conditions socio-économiques nous a été envoyé le 12/04/2022 sans une réelle réponse à notre questionnaire. Les données/enquêtes sur l'alimentation, les modes du travail, la consommation et traitement d'eau, les quantités exactes, pour ne citer que cela, étaient absentes. Les discussions n'ont pas pu continuer à la suite de l'absence d'accord entre l'EHESP et le 2IE.

En revanche, une discussion peut être faite, dans un tel contexte, sur les différentes études sanitaires suivantes :

- ✓ Les évaluations des expositions par mesure indirecte,
- ✓ Les évaluations des expositions par mesure directe (mesures biologiques) ;
- ✓ Les études épidémiologiques et/ou surveillance épidémiologiques.

2.2.1/ Les mesures indirectes dans le contexte d'orpillage

Un protocole de l'évaluation des expositions peut être établi avec des mesures indirectes, c'est-à-dire en planifiant des mesures de concentrations et de calcul de doses absorbées (ingérées, inhalées et cutanées) sur la base de scénarios et de modèle multimédia.

Dans le cas de cette poly-exposition, de multiples mesures des concentrations de plusieurs contaminants peuvent se faire dans l'eau, l'air, le sol ainsi que pour des aliments le plus à risque.

La fréquence de ces mesures dépendra de l'accumulation et de la disponibilité des substances dans ces milieux et surtout de la disponibilité en ressources humaines et financières pour réaliser les prélèvements et les analyses de laboratoire.

Bien que détaillé dans le schéma conceptuel (figure 6), un résumé de substances à mesurer dans différents milieux ainsi que la fréquence de ces mesures se trouve également dans l'**annexe 5**.

Il est également nécessaire de prêter attention à la durée de l'exposition ainsi qu'à la spécificité de certains groupes d'expositions. Ceci dépendra des tâches de chacun pour les orpailleurs et des habitudes pour le reste de la population. Bien que peu probable, suivant des enquêtes passées, les équivalents de matrices taches/ expositions pourraient exister.

Une exposition différentielle peut ressortir au sein d'un même groupe. Le cas de la non-homogénéité des doses inhalées par les orpailleurs par exemple.

Toutefois, en dehors des quelques ouvriers dits "spécialistes" ayant des tâches bien spécifiques, les orpailleurs peuvent s'échanger les rôles et les tâches. De ce fait, tenant compte de l'ensemble de la durée des activités, il est également possible de poser les hypothèses d'une exposition homogène.

Ces hypothèses ne peuvent être posées et vérifiées que lors des investigations sur le terrain.

Les mesures de concentrations dans les milieux peuvent servir à modéliser l'exposition, dès lors que les substances prioritaires ont été définies, par voie d'exposition et que des hypothèses raisonnables peuvent être posées concernant les fréquences, intensité, durée de l'exposition considérée. La base de l'Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires EQRS étant justement de poser des hypothèses, sous forme de scénarios.

Les **autres produits dérivés** peuvent être mesurés directement ou alors, il est possible de poser des hypothèses sur leurs formations en se basant le pH et la quantité de la matière organique. Sur base des quantités précises, une **hiérarchisation et choix des molécules** à mesurer peut-être, ainsi, faites.

Il serait possible de sélectionner également les substances par groupes d'effets (cancers respiratoires par exemple).

En dehors de poser des hypothèses et des scénarios, les autres points forts de cette méthode d'évaluation seraient de délimiter le périmètre de l'exposition, connaître la distribution de chacune des voies d'exposition afin de faire des recommandations sur certaines pratiques. Par les poids corporels et des habitudes de chaque groupe de la population, des déductions sur les doses ingérées sur chacun des groupes de population peuvent être faite facilement sans passer par d'autres mesures d'où l'intérêt de cet approche semi-quantitative.

Par ailleurs, la multiplication des mesures des substances dangereuses, c'est-à-dire à plusieurs reprises, dans plusieurs milieux, parfois de façon permanente et avec des capteurs sur le lieu pour certaines aux propriétés volatiles, demanderait un dispositif important et les biais de mesures peuvent apparaitre. Les capacités à doser les concentrations sur les aliments/végétaux des laboratoires régionales, les problèmes sécuritaires, d'aménagement des routes, mais aussi les capacités de laboratoire peuvent être des contraintes difficilement surmontables.

De plus, pour des sites qui ne sont plus en activité ou dont les techniques d'extraction ont changé, il est possible que certains toxiques à faible disponibilité/accumulation dans l'environnement, mais qui s'accumulent aisément dans l'organisme humain pose un problème.

Aussi, les hypothèses solides posées par les analyses dans ce travail montrent clairement que les doses absorbées seront sans doute élevées, il y a lieu de se poser la question de l'intérêt de dépenser des moyens pour faire des mesures qui ne feront que confirmer cela, notamment pour des substances sans seuil.

Enfin, la plus grosse limite réside dans le fait que ces EQRS sont le plus souvent faites substance par substance (même s'il existe quelques modèles multi-exposition) et qu'il est donc très difficile de comprendre les effets globaux dans l'organisme humaine.

2.2.2/ Les mesures directes (biologiques et biomarqueurs)

Il s'agira de déterminer les doses internes par des mesures biologiques de l'un ou de l'ensemble des groupes de vulnérabilité identifiés en fonction de moyens disponibles.

Selon l'INRS, cette méthode est recommandée particulièrement pour évaluer l'exposition : à des substances ayant des effets cumulatifs, particulièrement les ETM, à des produits peu volatils ou encore des agents à bonne pénétration cutanée, ainsi que pour des situations auxquelles des mesures de concentration dans l'air sont difficilement réalisables (INRS, 2022).

Ces conditions correspondent au contexte de l'orpillage et à ses contaminants décrits dans ce travail.

Les substances mesurées pourraient être celles supposées s'accumuler dans l'organisme avec effet chronique, cancérigène et irréversible : le mercure, l'arsenic, le plomb, le cadmium, le nickel ainsi que les COV et les acides inhalés.

La liste des milieux des quelques substances et biomarqueurs à considérer peut-être consulter sur le site de l'Institut De Recherche Expérimentale Et Clinique, Université Catholique de Louvain¹².

Comme pour les mesures directes, les évaluateurs peuvent choisir de mesurer, soit, l'ensemble de ces substances afin de ne pas passer à côté d'une exposition, soit désigner quelles sont les substances prioritaires qui seraient à rechercher pour un groupe ou sous-groupe en s'appuyant sur une exposition différentielle. La prise en compte de cette exposition différentielle devra également s'appuyer également sur des investigations sur terrain.

Les points forts de cette évaluation seraient l'estimation de manière plus précise, pour chaque molécule, l'exposition totale et de la dose interne en prenant en compte l'ensemble des voies, la simplification des multiples mesures de concentrations en différents lieux géographiques, la distribution du niveau de l'imprégnation des populations à risque, ainsi que de présenter un lien direct entre l'exposition et une pathologie (études épidémiologiques). (Bonvallot, 2021).

Les mesures biologiques peuvent également donner lieu à certaines contraintes qu'il faut résoudre :

- Le manque d'adhésion à cette étude sans une campagne de communication efficace concernant des mesures sur certaines matrices biologiques telles que les cheveux, le lait et les ongles pourraient être mal perçus par des populations (africaine notamment).
- L'éloignement des installations hospitalières et cliniques conduisant à une faible consultation de ces populations malades.
- Les capacités de laboratoire pour le dosage des matrices biologiques pour tous les agents chimiques.
- Il faut par ailleurs des données sur des populations "non exposées" pour pouvoir discuter des résultats.
- Comparer cette évaluation à l'ensemble de la population exposée et non exposée demanderait également des mesures supplémentaires et coûts élevés.

Par ailleurs, le cas des substances/agents éliminées dans l'organisme, mais dont les effets aigus auront affaibli l'organisme, l'absence des biomarqueurs connus pour certaines substances chimiques, la non prise en compte de l'exposition physique dont les biomarqueurs n'existent pas et des effets aggravants ainsi que le fait de prendre en compte molécule par molécule seront les points faibles de cette méthode à une étude globale.

¹² https://www.toxi.ucl.ac.be/biological_monitoring/list.html

2.2.3/ Les études épidémiologiques et surveillance épidémiologique

Les études épidémiologiques sont définies par l'Institut National du Cancer comme étant une étude des rapports entre une maladie et divers facteurs (mode de vie, particularités individuelles, exposition à un produit toxique, etc.) qui peuvent influencer sur la fréquence ou l'évolution de cette maladie (INC, 2022)¹³.

Les études épidémiologiques seront importantes dans ce contexte, car ils orienteront l'élaboration de programme de prise en charge c'est-à-dire l'offre de soins spécifique.

Ainsi peuvent être envisagé, selon les réalités (données, moyens financiers) sur terrain, les approches épidémiologiques suivantes :

Les études cas-témoins auront pour avantage de mettre rapidement en évidence les différences entre une population malade et une population saine. Le point faible sera de masquer les facteurs aggravants (en dehors des expositions), la pathologie devrait être également présente ce qui peut être complexe avec les perturbateurs endocriniens que l'on retrouvera dans l'orpillage. Toutefois, quelle que soit l'étude épidémiologique envisagée, ces perturbateurs endocriniens constitueront le point faible.

Les études transversales qui donneront une photographie de l'état de santé générale, mais ne s'intéresseront ni aux comportements des individus ni à leurs expositions dans le temps.

Les études prospectives apporteront des informations de grande qualité, car sur plusieurs années. Les difficultés liées à celle-ci seront justement d'être à long terme alors qu'il s'agit des sites pour la plupart déjà en activité depuis quelques années, les populations sont sans doute déjà malades. Il n'y a donc aucune raison d'attendre. L'autre problème est la perte des vues de population à cause de l'exode rurale bien intense dans ces régions d'orpillage.

Les études longitudinales rétrospectives sembleraient être un choix plus avantageux dans ce contexte, car il détermine les liens de causalité tout en prenant en compte les facteurs liés à l'apparition des maladies et agents physiques.

La liste des effets ou pathologies à diagnostiquer se trouve dans le chapitre deux, tableau 6.

Par ailleurs, la fiabilité des informations sur l'historique des expositions demandera une bonne mémoire. C'est qui peut être une faiblesse.

La question du coût financier, de la capacité à diagnostiquer les différentes maladies et autres dans la région de l'étude seront des contraintes également à prendre en compte.

¹³ <https://www.e-cancer.fr/Dictionnaire/E/etude-epidemiologique>

Pour finir cette partie, bien qu'il soit complexe de faire le choix d'une étude sans plus d'investigations sur terrain, au vu des faiblesses, forces et contraintes des unes et des autres, **les études épidémiologiques rétrospectives** apparaissent comme la solution convenable pour une étude sanitaire globale.

Cependant, un protocole d'étude **hybride** (c'est-à-dire coupler avec des mesures directes/indirectes) semble être un meilleur choix dans le but de combler les faiblesses évoquées ci-haut.

Sachant que la finalité de cette étude sanitaire serait de faire des recommandations sur la mise en place des programmes de prise en charge pour réduire les expositions. La solution pour pallier aux difficultés devrait être pensés dès l'amont.

Ainsi :

- ✓ Concernant la fiabilité des informations, ceci peut être surmontable, car non seulement certains sites sont encore activité, mais les pratiques de plusieurs années ne s'oublent pas facilement.
- ✓ Concernant le complément des mesures directes ou indirectes, il existe sans doute des données notamment sur le mercure et autres molécules par les laboratoires locaux. Ce dernier aspect constitue un avantage en termes de réduction de coût.
- ✓ Concernant le coût financier et d'autres contraintes telle que la capacité à diagnostiquer les maladies, ils pourraient être levés par la recherche et la mise en place de partenariats avec des organismes, laboratoires ou instituts de recherche internationaux.

Voici en résumé un tableau récapitulatif des points forts et faibles de ces 3 méthodes :

Tableau 7 : Avantages et inconvénients de trois méthodes d'évaluation sanitaire

Protocole	Points forts	Points faibles	Contraintes à prendre en compte
Mesures environnementales (air, eau, sol, aliments...)	Délimite le périmètre de la pollution et donc secondairement de l'exposition Prend en compte chacune des voies d'exposition séparément. Quelques	Absence de degré d'imprégnation Quid des substances biodégradables ?	Capacité des laboratoires à doser des aliments et les sédiments Difficulté pour accéder à certains sites : problème de sécurité et

	<p>concentrations de certaines molécules déjà mesurées par des instituts de recherche (notamment le 2IE) ;</p> <p>Préparer les études épidémiologiques</p>	<p>Multiplication des mesures pour chaque substance</p> <p>Facteurs aggravants non prise en compte</p> <p>Biais de mesures</p>	<p>aménagement des routes</p> <p>Fréquence des mesures qui requiert des dispositifs importants.</p>
<p>Mesures biologiques</p>	<p>Prend en compte toutes les voies d'exposition ;</p> <p>Connaissance de la dose interne totale ;</p> <p>Degré de l'imprégnation aux polluants dans l'organisme et aux différents groupes ;</p> <p>Mieux connaître l'exposome molécule par molécule ;</p> <p>Prend en compte des différences physiologiques des individus et les facteurs associés aux comportements et aux activités de chacun ;</p> <p>Préparer au mieux les études épidémiologiques</p>	<p>Non distinction de différentes voies d'exposition ;</p> <p>Exposome (prise en compte de dose accumulée même en dehors du contexte de l'orpaillage)</p> <p>Agents physiques non prise en compte</p> <p>Facteurs aggravants non prise en compte</p> <p>Quid des substance/agents déjà éliminés mais ayant affaiblis l'organisme ?</p> <p>Biais de mesures</p>	<p>Perception de la population sur la récolte des données (prise de sang, des cheveux...) ;</p> <p>Démographie et mouvements de population ;</p> <p>Capacité des laboratoires ;</p> <p>Biomarqueurs de certains contaminants non connus ;</p> <p>Dispositifs importants de mesure (donnée de population non exposée)</p> <p>Coûts financiers</p>
<p>Etudes épidémiologiques</p>	<p>Lien direct entre la pathologie à l'exposition ;</p> <p>Agents physiques pris</p>	<p>Pathologie déjà connue et présente (cas-témoins)</p>	<p>Capacité de diagnostic des maladies</p>

	<p>en compte ; Facteurs d'apparition pris en compte ; Mieux connaître les effets globaux ; Définir le programme de prise en charge approprié.</p>	<p>Long terme (études longitudinale prospective) Les perturbateurs endocriniens qui ne causent pas un type des maladies spécifiques</p>	<p>Exode rurale (études prospectives) Coût financier et dispositif important</p>
--	---	---	---

LIMITES DE CE TRAVAIL

Ce travail met en exergue, au travers de nombreux exemples de l'orpaillage dans le monde pour traduire au mieux les différentes expositions des populations, une liste impressionnante des dangers (chimiques, physiques) associées des populations concernées. Cette liste est un atout pour l'évaluateur sanitaire qui s'intéresse à l'orpaillage. Elle montre les limites des études s'intéressant à une ou deux molécules.

Toutefois, elle n'est pas exhaustive. Pour une étude spécifique sur un site donné, elle peut légèrement se restreindre ou au contraire s'allonger avec l'ajout d'autres substances. Ceci par la prise en compte du fond géologique, des quantités précises sur ce site, des habitudes de la population, techniques particulières ou innovatrices et du fond géochimique d'une région.

Ces éléments manquent du fait de ne pas faire des investigations sur terrain faute de moyens financiers et organisationnels.

Aussi bien qu'évoquant l'exposition biologique (vectorielle et microbiologique), ce travail ne traite pas les effets ou pathologies pouvant y résulter, compte tenu du caractère limité en écriture.

Conclusion

Au terme de notre travail, nous pouvons affirmer par des **analyses effectuées** que les risques sanitaires auxquels sont exposées les populations vivant à proximité de l'orpaillage vont au-delà de la simple question du mercure et du cyanure.

En plus de ces deux substances, **les analyses de techniques d'orpaillage et des schémas de transfert des molécules** ont montré que ces activités libèrent, dans l'environnement, plusieurs autres contaminants dangereux, toxiques, cancérigènes et perturbateurs endocriniens. Ces contaminants sont libérés dans tous les états : gazeux, liquide et solide.

La liste des expositions reprise dans **le schéma conceptuel** contient : les éléments minéraux que sont les ETM, le cyanure, la silice et les acides, les éléments organiques que sont les COV, EDTA, phtalates, les dioxines ainsi que des agents physiques tels que le bruit, les mouvements répétitifs, la vibration du corps et des membres supérieurs.

Concernant les éléments chimiques, ils sont soit des additifs, soit proviennent de la composition de la roche aurifère à la suite de l'excavation et de la lixiviation.

Les interactions entre ces différentes substances notamment entre les ETM avec les acides et les matières organiques conduisent à des effets tels que :

- ✓ L'augmentation de la vitesse de la mobilité dans le sol des ETM,
- ✓ L'accumulation accrue des ETM dans des végétaux ou dans des organismes marins,
- ✓ La formation de complexes encore plus toxiques tels que le méthylmercure ou le DMA, MMA, acide cyanurique...

Tenant compte de ces interactions dans l'environnement et des quantités libérées dans tous les états de la matière (gazeuse, poussière, déchet, débris, boue, liquide), **l'analyse des voies d'exposition** a démontré que c'est l'ensemble de la population (et non seulement les orpailleurs) qui sera exposé.

L'exposition des populations concernera, pour les substances chimiques, **l'ensemble des voies**: ingestion, cutanéomuqueuse, inhalation. Les doses absorbées de ces toxines devraient être élevées. Les effets seront probablement à la fois aigus et chroniques en même temps.

La présence des expositions physiques et biologiques en plus des chimiques, ainsi que des facteurs aggravants (tabagisme, alimentation précaire, drogue, installation sanitaire éloignée, manque des soins...) contribueront probablement à rendre cette situation sanitaire encore plus dégradée. Elle rendra également toutes les études possibles encore plus difficiles (facteurs de confusion, biais divers).

Les enfants sont ceux qui souffrent le plus de telles expositions, compte tenu de leur vulnérabilité et de comportement « main-bouche » intense.

Un protocole d'évaluation devra les placer en priorité, quelle que soit la région du monde et plus particulièrement en Afrique où ils peuvent devenir orpailleurs dès l'âge de 6 ans.

Plusieurs études sanitaires existent et ont été reprises dans ce travail. Toutefois, la majorité d'entre elles présenterait, au-delà des contraintes sécuritaires, certaines limites **à la lumière des analyses** qui ont été faites dans cette étude :

- ✓ Elles s'intéressent plus au mercure et au cyanure qu'à d'autres molécules ;
- ✓ Elles ne prennent pas en compte les expositions physiques ;
- ✓ Elles sont souvent descriptives et concernent un échantillon très réduit ;
- ✓ Elles s'intéressent plus aux orpailleurs qu'au reste de la population environnante ; ceci est particulièrement vrai dans les études de sites africains ;
- ✓ Elles ne prennent pas en compte les facteurs aggravants, les habitudes et comportements des populations ;
- ✓ Elles ne proposent pas une évaluation précise et globale (quantitative ou qualitative) des risques sanitaires ;
- ✓ Elles sont souvent réactives et non proactives.

Au vu de ces limites, la discussion menée dans ce travail a abouti à suggérer l'élaboration d'un protocole d'étude qui prendra en compte **les effets sanitaires globaux** (agents physiques et facteurs aggravants compris).

La discussion sur les études sanitaires, à savoir environnementale, biologique et épidémiologique, a permis de conclure qu'une approche **hybride** pourrait être un meilleur choix de la méthodologie à envisager.

En effet, cette étude pourra reposer sur une approche **épidémiologique rétrospective** tout en comblant ses faiblesses par des **mesures biologiques et/ou environnementales** nécessaires. Dans certaines régions, certaines de ces mesures peuvent déjà exister, ce qui représenterait un avantage de réduction du coût financier.

L'élaboration de ce protocole devrait s'appuyer sur une démarche fondée sur les paramètres socio-culturels, le fond géochimique d'une région, les contraintes sécuritaires, les habitudes et comportements des populations, la capacité à diagnostiquer les maladies évoquées dans ce travail ainsi que les moyens sanitaires et financiers.

Ces difficultés pourront être résolues par la recherche et la mise en place de partenariat avec des organismes, laboratoires et instituts régionaux et internationaux.

Par ailleurs, au vu des multiples expositions et molécules que présente le contexte d'orpaillage, ceci peut également constituer une excellente opportunité de faire les études scientifiques sur les effets globaux. Ces études permettront de faire avancer l'état de connaissance sur l'exposome concernant notamment les interrogations suivantes :

- ✓ Comment réagirait un organe ciblé par plusieurs contaminants ? Les effets se multiplient-ils ou s'additionnent-ils ? entrent-ils en compétition ?
- ✓ Pour un même effet toxique, cancérigènes ou endocriniens, quelle dose faudrait-il prendre en compte pour calculer le risque ? les doses de substances, s'additionnent-elles, se multiplient-elles ou, se soustraient-elles... ?

Bibliographie

- Abdou Amadou, S. (2020). Evaluation des impacts de l'exploitation artisanale de l'or sur le site d'orpaillage de Komabangou (Liptako, NIGER). 81.
- Andrieu, A. (2019). Imprégnation par le plomb des enfants de 1 à 6 ans en Guyane, 2015-2016 / blood lead level in 1-6 years old children, in french guiana, 2015-2016. 9.
- Artisanal Gold Council. (2014). Problèmes de santé liés à l'orpaillage et à l'exploitation minière artisanale Formation pour professionnels de la santé. www.artisanalgold.org
- Artisanal Gold Council. (2015). La santé dans l'orpaillage et l'exploitation minière artisanale: Un manuel pour instructeurs | Global Mercury Partnership. <https://www.unep.org/globalmercurypartnership/resources/guidance/la-sante-dans-lorpaillage-et-l-exploitation-mini-ere-artisanale-un-manuel-pour>
- Assemblée Nationale de la France. (2021). Commission d'enquête sur la lutte contre l'orpaillage illégal en Guyane—Assemblée nationale. [https://www2.assemblee-nationale.fr/15/autres-commissions/commissions-d-enquete-de-la-xv-eme-legislature/commission-d-enquete-sur-la-lutte-contre-l-orpaillage-illegal-en-guyane/\(block\)/87273](https://www2.assemblee-nationale.fr/15/autres-commissions/commissions-d-enquete-de-la-xv-eme-legislature/commission-d-enquete-sur-la-lutte-contre-l-orpaillage-illegal-en-guyane/(block)/87273)
- Barraza, F., Maurice, L., Uzu, G., Becerra, S., López, F., Ochoa-Herrera, V., Ruales, J., & Schreck, E. (2018). Distribution, contents and health risk assessment of metal(loid)s in small-scale farms in the Ecuadorian Amazon: An insight into impacts of oil activities. *Science of The Total Environment*, 622–623, 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.246>
- Bedidjo, A. (2018). Etude sur l'orpaillage et l'utilisation du mercure dans l'exploitation minière artisanale en Ituri. <https://congominer.org/reports/2011-etude-sur-l-orpaillage-et-l-utilisation-du-mercure-dans-l-exploitation-mini-ere-artisanale-en-ituri>
- Bettayeb, M. (2014). Le plomb et santé humaine. Mémoire de Master en Hydraulique Urbaine, Biskra : Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.
- Bernstein, D. I. (2012). Diesel Exhaust Exposure, Wheezing and Sneezing. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, 4(4), 178–183. <https://doi.org/10.4168/aa.2012.4.4.178>
- Bohbot, J. (2017). L'orpaillage au Burkina Faso: Une aubaine économique pour les populations, aux conséquences sociales et environnementales mal maîtrisées. *EchoGéo*, 42, Article 42. <https://doi.org/10.4000/echogeo.15150>
- Bonvallot, N. (2021). Mesure biologique de l'exposition.
- Boudou, A., Maury-Brachet, R., Durrieu, G., Coquery, M., & Dauta, C. (2006). Chercheurs d'or et contamination par le mercure des systèmes aquatiques continentaux de Guyane – Risques à l'égard des populations humaines. *Hydroécologie Appliquée*, 15, 1–18. <https://doi.org/10.1051/hydro:2006007>
- BRGM. (2003). Le mercure et ses composés Comportement dans les sols, les eaux et les boues de sédiments. <https://docplayer.fr/15436744-Le-mercure-et-ses-composes-comportement-dans-les-sols-les-eaux-et-les-boues-de-sediments.html>
- BRGM. (2013). Utilisation de la cyanuration dans l'industrie aurifère en Guyane. Impacts potentiels sur l'environnement et recommandations. Rapport final. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-30798-brgm-utilisation-cyanurisation-mine-or.pdf>

- BRGM, B. (2017). Identification de l'origine de l'arsenic dans les eaux usées à Saint-Sébastien-sur-Loire (44).
- Bruni, Y., & Hatert, F. (2017). Étude minéralogique de l'or et de ses minéraux accompagnateurs sur le pourtour du massif cambro-ordovicien de Serpont, Belgique. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*. <https://doi.org/10.25518/0037-9565.7243>
- Cavalin, C., Rosental, P.-A., & Vincent, M. (2013). Risques liés à la silice cristalline : Avérés ou non encore connus ? Doutes et recherche de preuves sur des maladies professionnelles et environnementales. *Environnement, Risques & Santé*, 12(4), 352-358. <https://doi.org/10.1684/ers.2013.0629>
- Casset, A., & de Blay, F. (2008). Effets sur la santé des composés organiques volatils de l'habitat. *Revue des Maladies Respiratoires*, 25(4), 475-485. [https://doi.org/10.1016/S0761-8425\(08\)71587-0](https://doi.org/10.1016/S0761-8425(08)71587-0)
- Castro, A. V., de Almeida, A.-A. F., Pirovani, C. P., Reis, G. S. M., Almeida, N. M., & Mangabeira, P. A. O. (2015). Morphological, biochemical, molecular and ultrastructural changes induced by Cd toxicity in seedlings of *Theobroma cacao* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 115, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.003>
- Chatterjee, S., Deb, U., Datta, S., Walther, C., & Gupta, D. K. (2017). Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizing bioremediation. *Chemosphere*, 184, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.008>
- Cobbina, S. J., Chen, Y., Zhou, Z., Wu, X., Feng, W., Wang, W., Mao, G., Xu, H., Zhang, Z., Wu, X., & Yang, L. (2015). Low concentration toxic metal mixture interactions: Effects on essential and non-essential metals in brain, liver, and kidneys of mice on sub-chronic exposure. *Chemosphere*, 132, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.013>
- Crichton, R. R. (2016). Metal Toxicity – An Introduction. In *Metal Chelation in Medicine* (pp. 1–23). <https://doi.org/10.1039/9781782623892-00001>
- Emmanuel, E. (2004). Evaluation des risques sanitaires et écotoxicologiques liés aux effluents hospitaliers. *Environnement et Société*. Insa, Lyon. <https://doi.org/10/document>
- EPA. (2012). Health Assessment Document For Diesel Engine Exhaust. <https://web.archive.org/web/20140910195337/http://www.epa.gov/ttnatw01/dieselfinal.pdf>
- Estaquier, J., Blanc, É., & Coumoul, X. (2021). Que sait-on de l'action des perturbateurs endocriniens sur le système immunitaire ? *La Revue du Praticien Médecine Générale*, 71(7), 729-734.
- Gall, A. R. L., & Legeas, M. (2014). De nouvelles obligations réglementaires en France en matière d'évaluation environnementale : Une opportunité à saisir pour promouvoir une approche systémique de la santé ? *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 19*, Article Hors-série 19. <https://doi.org/10.4000/vertigo.14960>
- Garnier, R. (2005). Toxicité du plomb et de ses dérivés. *EMC - Toxicologie-Pathologie*, 2(2), 67-88. <https://doi.org/10.1016/j.emctp.2004.10.004>
- Gajbhiye, T., Pandey, S. K., Kim, K.-H., Szulejko, J. E., & Prasad, S. (2016). Airborne foliar transfer of PM bound heavy metals in *Cassia siamea*: A less common route of heavy metal accumulation. *Science of The Total Environment*, 573, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.099>

- Glorennec, P., Ledrans, M., & Fabres, B. (2006). Déclenchement d'un dépistage systématique du saturnisme infantile autour des sites industriels. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, 54(2), 117-125. [https://doi.org/10.1016/S0398-7620\(06\)76705-0](https://doi.org/10.1016/S0398-7620(06)76705-0)
- Glorennec, P., Lucas, J.-P., Mercat, A.-C., Roudot, A.-C., & Le Bot, B. (2016). Environmental and dietary exposure of young children to inorganic trace elements. *Environment International*, 97, 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.009>
- Guidotti, T. L. (1978). The higher oxides of nitrogen: Inhalation toxicology. *Environmental Research*, 15(3), 443-472. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(78\)90125-1](https://doi.org/10.1016/0013-9351(78)90125-1)
- Ibrahim, O. Z., Dan-Badjo, A. T., Guero, Y., Idi, F. M. M., Feidt, C., Sterckeman, T., & Echevarria, G. (2019). Distribution spatiale des éléments traces métalliques dans lessols de la zone aurifère de Komabangou au Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(1), 557–573. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i1.43>
- Imbernon, E. (2008). Quelle place pour les risques professionnels dans la santé publique ? *Santé Publique*, 20(hs), 9-17. <https://doi.org/10.3917/spub.080.0009>
- INERIS. (2011). Cyanures et dérivés.
- INERIS. (2020). Acide nitrique. <https://substances.ineris.fr/fr/substance/cas/7697-37-2/2>
- INRS. (n.d.). Bruit. Ce qu'il faut retenir—Risques. Retrieved 31 August 2022, from <https://www.inrs.fr/risques/bruit/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- INRS. (2020). Acide sulfurique (FT 30). Généralités—Fiche toxicologique—INRS. https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_30
- INRS. (2022a). Arsenic et composés minéraux (FT 192). Généralités—Fiche toxicologique—INRS. https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_192
- INRS. (2022b). Silice cristalline. Silice cristalline et santé au travail—Risques. <https://www.inrs.fr/risques/silice-cristalline/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- Juhasz, A. L., & Naidu, R. (2007). Explosives: Fate, Dynamics, and Ecological Impact in Terrestrial and Marine Environments. In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (pp. 163–215). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-69163-3_6
- Kabore, K. (2014). L'exploitation Artisanale De L'or a Poura: Enjeux Et Perspectives. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2997
- Kahitouo, H. (2012). Réalisation d'un diagnostic environnemental pour l'amélioration de la performance environnementale de l'orpaillage au Burkina Faso: Cas du site de Kampti.
- König, C. (2019). Les gisements de l'or et son extraction. *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-or-magie-alchimistes-686/page/3/>
- Kumar, R., Mishra, R. K., Mishra, V., Qidwai, A., Pandey, A., Shukla, S. K., Pandey, M., Pathak, A., & Dikshit, A. (2016). Chapter 13—Detoxification and Tolerance of Heavy Metals in Plants. In P. Ahmad (Ed.), *Plant Metal Interaction* (pp. 335–359). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00013-8>
- Lapointe, H. (2006). Enjeux environnementaux associés aux mines aurifères: Le Nord du Québec et du Canada—Centre interdisciplinaire de recherche en développement international et société (CIRDIS) | UQAM. https://ceim.uqam.ca/db/spip.php?page=article-cirdis&id_article=2828
- London, J. (2012). *La Ruée vers l'or—Histoires du Grand Nord* (Bartillat). <https://www.editions-bartillat.fr/fiche-livre.php?Clef=340>

- Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD) Burkina Faso. (2013). Coût de l'inaction de la gestion des produits chimiques dans le secteur minier et agricole. https://www.researchgate.net/profile/David-Maradan/publication/312453454_Cout_de_l'inaction_de_la_gestion_des_produits_chimiques_dans_le_secteur_minier_et_agricole/links/595236dbaca272a343db3341/Cout-de-linaction-de-la-gestion-des-produits-chimiques-dans-le-secteur-minier-et-agricole.pdf
- Ministère du Travail, du Plein emploi et de l'Insertion. (2021). Acide chlorhydrique ou Chlorure d'hydrogène—Ministère du Travail, du Plein emploi et de l'Insertion. <https://travail-emploi.gouv.fr/sante-au-travail/prevention-des-risques-pour-la-sante-au-travail/autres-dangers-et-risques/article/acide-chlorhydrique-ou-chlorure-d-hydrogene>
- Mulware, S. J. (2013). Trace elements and carcinogenicity: A subject in review. *3 Biotech*, 3(2), 85–96. <https://doi.org/10.1007/s13205-012-0072-6>
- Muzet, A. (2006). Bruit et sommeil : Répercussions sur la santé. *médecine/sciences*, 22(11), Article 11. <https://doi.org/10.1051/medsci/20062211973>
- Nkuba, B., Zahinda Mugisho, F., & Muhanzi Aganze, G. (2021). Technologies (ir)responsables dans l'orpaillage: Quels risques pour l'environnement et la santé? Cas de Kamituga et Misisi, RDC. In *IOB Working Papers (2021.06; IOB Working Papers)*. Universiteit Antwerpen, Institute of Development Policy (IOB). <https://ideas.repec.org/p/iob/wpaper/2021.06.html>
- Nzihou, J. F., Bouda, M., Hamidou, S., & Diarra, J. (2013). Arsenic in Drinking Water Toxicological Risk Assessment in the North Region of Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 05(08), 46-52. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.58A007>
- OCHA, & PNUE. (2011, January 7). Rapport sur la pollution aiguë au plomb au Nigéria. ONU Info. <https://news.un.org/fr/story/2011/01/205832-Ionu-rend-son-rapport-sur-la-pollution-aigue-au-plomb-au-nigeria>
- O'Neill, J., & Telmer, K. (2017). Estimating Mercury Use and Documenting Practices in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM)-Methods and Tools Version 1.0. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=SGo7bD4AAAAJ&citation_for_view=SGo7bD4AAAAJ:4MWp96NkSFoC
- ONUDI. (2006). Manual for Training Artisanal and Small-Scale Gold Miners. Planet GOLD. <https://www.planetgold.org/manual-training-artisanal-and-small-scale-gold-miners>
- Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de l'Europe. (2018). Lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement dans la Région européenne: Lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement dans la Région européenne (WHO/EURO:2018-3287-43046-60258). Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de l'Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/343937>
- Orru, J.-F. (1998). L'activité aurifère dans la commune de Maripasoula, impact écologique et humain. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 40(1), 147–166. <https://doi.org/10.3406/jatba.1998.3666>
- Ostro, B., Lipsett, M., Reynolds, P., Goldberg, D., Hertz, A., Garcia, C., Henderson, K. D., & Bernstein, L. (2010). Long-Term Exposure to Constituents of Fine Particulate Air Pollution and Mortality: Results from the California Teachers Study. *Environmental Health Perspectives*, 118(3), 363-369. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901181>
- Ouédraogo, A. (2020). Les détentrices de hangars de traitement de l'or face à la technique de cyanuration (sud-ouest du Burkina Faso). *Journal des africanistes*, 90–1, 168–187. <https://doi.org/10.4000/africanistes.9528>

- Ouedraogo, I., & Ouedraogo, O. (2019). Proximité géographique entre école et site d'orpaillage : Un facteur perturbateur de la scolarisation. *Lettres, Sciences sociales et humaines*, 35(2). https://revuesciencetechniqueburkina.org/index.php/lettres_sciences_sociales_et_hum/article/view/342
- Plum, L. M., Rink, L., & Haase, H. (2010). The Essential Toxin: Impact of Zinc on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/ijerph7041342>
- Puskarczyk, E. (2006). *Aspects toxicocinétiques, toxicodynamiques et thérapeutiques actuels de l'intoxication aiguë à l'ion cyanure* (p. non renseigné) [Other, UHP - Université Henri Poincaré]. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01732373>
- PwC. (2012). The direct economic impact of gold. World Gold Council. <https://www.gold.org/goldhub/research/direct-economic-impact-gold>
- Roamba, N. (2014). Risques environnementaux et sanitaires sur les sites d'orpaillage au Burkina Faso : Cycle de vie des principaux polluants et perceptions de l'orpaillage (Cas du site de Zougnaçagmligne dans la Commune rurale de Bouroum, Région Centre-Nord) (101 p.). Mémoire de Master en Eau et Assainissement, Ouagadougou : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso
- Raaschou-Nielsen, O., Andersen, Z. J., Beelen, R., Samoli, E., Stafoggia, M., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M. J., Brunekreef, B., Xun, W. W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Sommar, J., Forsberg, B., Modig, L., Oudin, A., Oftedal, B., Schwarze, P. E., ... Hoek, G. (2013). Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: Prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *The Lancet Oncology*, 14(9), 813–822. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(13\)70279-1](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(13)70279-1)
- Rekab, K. (2014). Étude de la dégradation de molécules organiques complexant des radionucléides par l'utilisation de Procédés d'Oxydation Avancée [These de doctorat, Lyon 1]. <http://www.theses.fr/2014LYO10172>
- Richters, A., & Kuraitis, K. (1981). Inhalation of NO₂ and Blood Borne Cancer Cell Spread to the Lungs. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 36(1), 36-39. <https://doi.org/10.1080/00039896.1981.10667604>
- Sanou, G., Nitiéma, I. J., Sanon, M., Lengani, H. A., & Coulibaly, G. (2019). Insuffisance rénale chez les patients orpailleurs au Centre Hospitalier Universitaire Yalgado Ouedraogo (Ouagadougou–Burkina Faso). *Néphrologie & Thérapeutique*, 15(5), 374–375. <https://doi.org/10.1016/j.nephro.2019.07.271>
- Sawadogo, E., & Da†, D. E. C. (2021). Enjeux de la mutation des techniques artisanales sur la formalisation de l'exploitation de l'or au Burkina Faso. *EchoGéo*, 58, Article 58. <https://doi.org/10.4000/echogeo.22710>
- Schimann, H. M. (2005). *Impacts de perturbations liées à l'orpaillage sur l'évolution des communautés et fonctionnalités microbiennes d'un sol* [Phdthesis, ENGREF (AgroParisTech)]. <https://pastel.hal.science/pastel-00001435>
- Service fédéral Santé publique, Sécurité de la chaîne alimentaire et environnement. (2016, January 12). Qu'est-ce qu'un détergent ? SPF Santé publique. <https://www.health.belgium.be/fr/quest-ce-quun-detergent>
- Shaheen, N., Irfan, N. Md., Khan, I. N., Islam, S., Islam, Md. S., & Ahmed, Md. K. (2016). Presence of heavy metals in fruits and vegetables: Health risk implications in Bangladesh. *Chemosphere*, 152, 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.060>

- Shahid, M., Dumat, C., Khan Niazi, N., Khalid, S., & Natasha. (2018). Global scale arsenic pollution: Increase the scientific knowledge to reduce human exposure. *Vertigo - LaRevue Électronique En Sciences de l'environnement*, Hors-série 31, Article Hors-série 31. <https://doi.org/10.4000/vertigo.21331>
- Smith, M. (2012, June 12). WHO: Diesel Exhaust Causes Lung Cancer. <https://www.medpagetoday.com/hematologyoncology/othercancers/33226>
- Smolders, E. (2001). Cadmium uptake by plants. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 14(2), 177–183.
- Styblo, M., Del Razo, L. M., Vega, L., Germolec, D. R., LeCluyse, E. L., Hamilton, G. A., Reed, W., Wang, C., Cullen, W. R., & Thomas, D. J. (2000). Comparative toxicity of trivalent and pentavalent inorganic and methylated arsenicals in rat and human cells. *Archives of Toxicology*, 74(6), 289-299. <https://doi.org/10.1007/s002040000134>
- Tisserand, M., Guérin, F., & Berthoz, A. (1971). Évaluation Des Vibrations En Sidérurgie. *Le Travail Humain*, 34(1), 99-109.
- Verdier, L. (2021). Sols pollués. Dunod 2021. <https://www.dunod.com/sciences-techniques/sols-pollues-menaces-sur-populations-et-biodiversite>
- Walker, É. (2015). Exposition au bruit, gêne sonore, plainte et mobilisation habitante : de la cohabitation à l'appropriation de l'espace-temps nocturne festif. Étude de cas des centres-villes de Caen et Rennes. *Norois*, 234(1), 7-28. <https://doi.org/10.4000/norois.5456>
- Wojciechowska-Mazurek, M., Starska, K., Brulińska-Ostrowska, E., Plewa, M., Biernat, U., & Karłowski, K. (2008). [Monitoring of contamination of foodstuffs with elements noxious to human health. Part I. Wheat cereal products, vegetable products, confectionery and products for infants and children (2004 year)]. *Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny*, 59(3), 251–266.
- WWF. (2018). Rapport_Lutte contre l'orpaillage illegal en Guyane : Orientations pour une efficacité renforcée. https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2018-06/180613_Rapport_Lutte_orpaillage_illegal_Guyane.pdf
- Zhang, X., Wang, X., Zhao, X., Tang, Z., Zhao, T., Teng, M., Liang, W., Wang, J., & Niu, L. (2022). Using deterministic and probabilistic approaches to assess the human health risk assessment of 7 polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129811. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129811>

Autres sites web consultés

<https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales/arsenic/> dernière consultation le 31/08/2023

<https://www.perturbateur-endocrinien.com/liste-perturbateurs-endocriniens/> dernière consultation le 31/08/2023

<https://www.loretlargent.info/vera-valor-2/clean-extraction-a-la-decouverte-de-lor-vert-et-de-la-vera-valor/9503/> dernière consultation le 31/09/2022

https://lexpansion.lexpress.fr/actualites/1/actualite-economique/l-or-a-apporte-210-milliards-de-dollars-au-pib-mondial-en-2012_1468108.html dernière consultation le 31/09/2022

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-or-magie-alchimistes-686/page/3/> dernière consultation le 31/09/2022

<https://sites.google.com/site/maiourinature/a-classer---choisir---commenter> dernière consultation le 31/09/2022

<https://www.unicem.fr/wp-content/uploads/bruit-carrieres-1-approche-pratique.pdf> dernière consultation le 31/09/2022

https://www.f2a.fr/wp-content/uploads/2018/08/Groupes_Electroge%CC%80nes.pdf dernière consultation le 31/09/2022

<https://www.test-achats.be/maison-energie/produits-de-nettoyage/dossier/les-lessives-et-leur-impact-sur-l-environnement> dernière consultation le 31/09/2022

<https://www.agenceecofin.com/hebdop2/1910-61006-l-orpaillage-en-afrique-de-l-ouest-des-milliards-de-dollars-incontrolables> dernière consultation le 31/09/2022

Vidéos et Reportages

Thinkerview <https://www.youtube.com/watch?v=xx3PsG2mr-Y> dernière consultation le 25/08/2023

Liste des annexes

Annexe 1 : schéma de comparaison entre deux techniques d'orpaillage avec les deux étapes

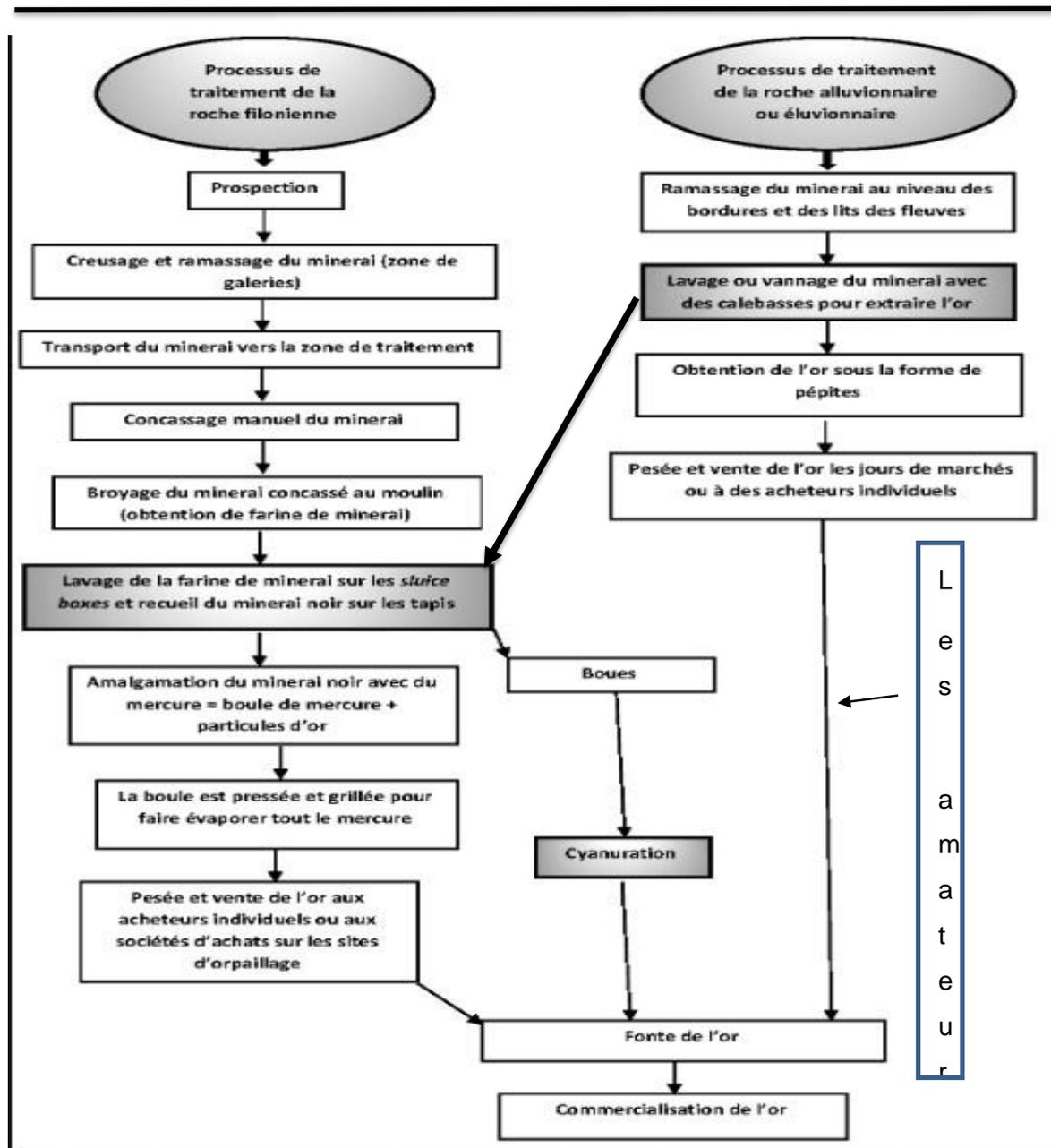
Annexe 2 : Schéma de distribution du Plomb dans l'environnement

Annexe 3 : Eléments sortants de la combustion du carburant (diesel)

Annexe 4 : Liste des données/enquêtes sollicitées au 2IE

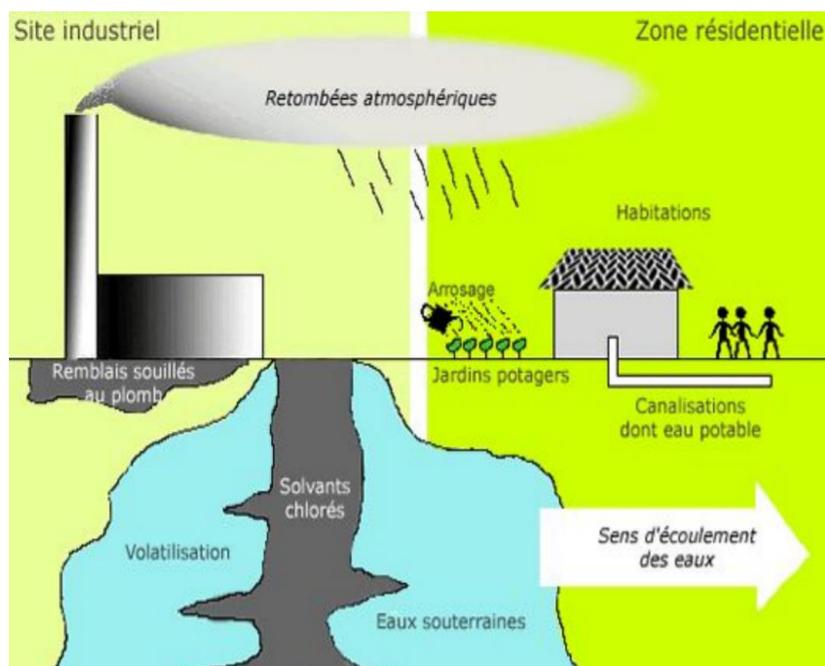
Annexe 5 : Tableau de mesures des concentrations des quelques substances chimiques dans différents milieux environnementaux.

ANNEXE 1 : Comparaison entre 2 techniques d'orpaillage



(Source : Ouédraogo, 2020)

ANNEXE 2 : Schéma de distribution du Plomb dans l'environnement



(Source : Araujo, 2010)

ANNEXE 3 : Eléments sortants de la combustion du carburant (diesel)

Contaminant chimique dans les gaz d'échappement	Remarques
Acéaldéhyde	Liste des cancérogènes du groupe 2B du CIRC
Acroléine	Liste des cancérogènes du groupe 3 du CIRC
Aniline	Liste des cancérogènes du groupe 3 du CIRC
Arsenic	Liste des cancérogènes du groupe 1 du CIRC, Perturbateur endocrinien
Benzène	Liste des cancérogènes du groupe 1 du CIRC
Biphényle	Toxicité moyenne
Phtalate de bis(2-éthylhexyle)	Perturbateur endocrinien
Buta-1,3-diène	Liste des cancérogènes du groupe 2A du CIRC
Cadmium	Liste des cancérogènes du groupe 1 du CIRC, Perturbateur endocrinien
Chlorine	Sous-produit de l'injection d'Urée
Chlorobenzène	Toxicité faible à modérée ²¹
Crésol ^{note 1}	
Phtalate de dibutyle	Perturbateur endocrinien ^[réf. nécessaire]

1,8-Dinitropyrene	Hautement cancérogène ^{22,23}
Éthylbenzène	
Méthanal	Liste des cancérogènes du groupe 1 du CIRC
Plomb inorganique	Perturbateur endocrinien
Méthanol	
Butanone	
Naphtalène	Liste des cancérogènes du groupe 2B du CIRC
Nickel	Liste des cancérogènes du groupe 2B du CIRC
3-Nitrobenzanthrone (3-NBA)	Hautement cancérogène
4-nitrobiphenyl	Irritant, dommages sur les nerfs/le foie/les reins ²⁶
Phénol	
Phosphore	
Pyrène	
Benzo(e)pyrène	
Benzopyrène	Liste des cancérogènes du groupe 1 du CIRC
Fluoranthène ¹	Liste des cancérogènes du groupe 3 du CIRC
Propionaldéhyde	
Styrène	Liste des cancérogènes du groupe 2B du CIRC
Toluène	Liste des cancérogènes du groupe 3 du CIRC
Xylène	Liste des cancérogènes du groupe 3 du CIRC
3-Nitrobenzanthrone (3-NBA)	Hautement cancérogène
4-nitrobiphenyl	Irritant, dommages sur les nerfs/le foie/les reins ²⁶
Phénol	

ANNEXE 4 : Liste des données/enquêtes sollicitées au 2IE

NOTE POUR LE 2IE

Ce document est un complément de la note de cadrage et présente les **premiers** éléments/données pour lesquels nous sollicitons un soutien du 2IE afin de :

- Vous permettre de comprendre la démarche d'évaluation des expositions et de commencer à vous l'approprier ;
- Nous permettre d'accéder à des données, ou des travaux scientifiques qui seraient déjà disponibles de votre part ;
- Nous permettre d'identifier et de faciliter des contacts avec les partenaires locaux (orpailleurs, associations, institutions gouvernementales etc.) qui pourront y répondre.

L'analyse des expositions débute avec ce qui est appelé un schéma conceptuel d'exposition, il vise à identifier tous les agents dangereux potentiels, leurs voies de transfert et leurs éventuellement transformation au cours de ces transferts, et toutes les voies de contact entre les populations et ces agents dangereux qui en résultent (modalités de contact, fréquence, intensité, durée). Une fois ces expositions listées, les plus importantes peuvent ensuite donner lieu à une estimation des risques qui en résultent, à partir de l'identification des VTRs et des personnes les plus sensibles/exposées.

D'où la liste imposante d'informations et de données qui sont nécessaires et que nous vous présentons ci-dessous.

Les informations sur le contexte géologique, géographique et exploitation aurifère

- La localisation des sites habitables par rapport aux activités d'orpaillage (document d'urbanisme) ; mais également les habitations non règlementées par l'urbanisme
- La démographie (surtout les femmes « enceintes », les enfants) sur le site et dans le village ;
- Les techniques d'extraction et du traitement utilisés sur ces sites (l'ensemble des substances utilisées de l'extraction au traitement)
- La carte géologique (avec quels minerais de roche l'or est associé) et hydrographique de la région ;
- Les données météorologiques (climat, direction du vent, etc.)
- Les informations sur la gestion des rejets ou des déchets ;
- La fréquence, la quantité (en tonnes) de la production de l'or ou de l'utilisation des substances chimiques. ;
- Le nombre des sites d'orpaillage dans le village ; l'historique des premières exploitations

- Etc.

Note 1 : Dans cette démarche d'analyse globale de l'exposition, il nous faut non seulement considérer les produits chimiques utilisés mais toute substance toxique en contact avec l'homme pouvant résulter soit des poussières (broyage ou bombardement des roches) ou de la manipulation des produits chimiques.

A titre d'exemple, La poussière de silice cristalline, résultante du broyage des quartz ou autres minerais, est associée à de nombreuses pathologies : la silicose, la tuberculose pulmonaire, le cancer du poumon, les maladies pulmonaires obstructives chroniques (MPOC), certaines maladies auto-immunes et rénales.

Les informations sur les comportements des habitants à proximité des activités et des orpailleurs

- Les habitudes alimentaires (consommation des produits locaux, volailles, poissons etc quantité/semaine) ? Comment s'organise l'agriculture, la pêche, l'élevage, la chasse etc dans le village ?
- Données sur les poids corporels notamment les enfants ;
- L'eau potable consommée d'où provient-elle ?
- Des baignades ? (Si oui combien de temps en général)
- Des vaisselles ou des lessives dans les eaux ?
- Forages d'eau, puits ?
- Traitement et analyse de l'eau (dans le cas d'un traitement non adapté, on peut facilement envisager une exposition aux polluants par ingestion)
- Le Temps passé dans des sites d'orpaillage pour le groupe d'orpailleurs
- Présence éventuels d'autres sources de contamination ?
- La tenue des orpailleurs (casque, masque, directement lavés, apporter à la maison et exposition des enfants ?)
- Les accidents aux sites
- Quelles tâches effectuez-vous avec le mercure (amalgamation, essorage, transport, manipulation du mercure, brûlage, etc)
- Etc.

Note 2: pour cette section, la méthode souhaitée est celle des entretiens à distance et/ ou d'une enquête récente.

Les informations antérieures sur des études en lien avec la santé de la population et des orpailleurs

- Dépistage aux substances dangereuses utilisées ou associées dans l'orpaillage ? (Hydrargyrisme=intoxication au Hg, saturnisme=Pb, Silicose=SiO₂, au CN, As, Zn, Cu, autres maladies respiratoires etc...), enquête épidémiologique, maladies signalées ou suspicions liées à ces activités ?
- A-t-on des mesures (prélèvements) de concentrations des certaines substances (si oui pour quels milieux et quels protocoles), des échantillons comparatifs pour les sites non contaminés existe ils ?
- Etc.

Toute information supplémentaire jugée utile à ce travail sera la bienvenue.

Perry Kiotamwini LUMONO

ANNEXE 5 : Tableau de mesures des concentrations des quelques substances chimiques dans milieux environnementaux

Substances	Milieux	Observations (Fréquence)
Hg	Air	Substance volatile donc mesurer dans l'air pendant l'activité pour la proportion inhalée
MeHg	Eau, sol, aliments (poissons), sédiments	Faire des mesures après la tâche.
As, DMA, MMA	Eau, sol, air et aliments	Faire des mesures pendant et après la tâche.
Pb	Eau, sol, air, aliments (chasse, les fruits)	Faire des mesures pendant et après la tâche.
Cd	Eau, sol, air, et aliments (végétaux)	Mesurer pendant et après la tâche.
HCN	Air	Substance volatile donc mesurer de l'air pendant l'activité pour la proportion inhalée
CN	Eau, aliments(fruits), sol	Des mesures peuvent être faite après la tâche.
COV (CO, Benzène, Toluène) Formadehyle, Alkyphénols, Phlalates, dioxines	Air, eau	Substance volatile donc mesurer de l'air pendant l'activité pour la proportion inhalée
EDTA, NTA	Eau	Mesurer pendant et après la tâche.
HAP	Sol, eau	Mesurer après la tâche.
HNO3	Air, eau	Mesurer pendant et après la tâche.
H2SO4	Air, eau	Mesurer pendant et après la tâche.
HCl	Air, eau	Mesurer après la tâche.
Bruit, Vibrations	Air	Mesure pendant l'activité

LUMONO	Perry	15/09/2023
Master 2 Santé publique – Parcours METEORES		
Promotion 2022-2023		
Analyse globale des expositions des orpailleurs et des populations vivant à proximité.		
Discussion autour d'un protocole d'évaluation des effets sanitaires		
Mots clés : Orpillage – Géologie – Analyse – Exposition – Risques sanitaires – Schéma conceptuel – Effets globaux		
<i>L'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les mémoires : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.</i>		

Abstract:

Artisanal gold mining, otherwise known as "orpillage", considerably and sustainably alters the landscape of these regions by contaminating water, soil, and air.

The aim of this work, which has been taken up by several studies, was to go beyond exposure to mercury and cyanide, or even the chemical exposures associated with this context, and propose a more global study of health effects.

Relying essentially on the combination and complementarity of several scientific studies, the analyses of gold panning techniques and molecule transfer patterns carried out in this study led to the following results:

- The list of health-threatening substances associated with gold panning can be extended as follows: Hg, MeHg, Pb, As, MMA, DMA, Cd, Ni, Zn, Al, Mn, Cu, Co, SiO₂, CN⁻, HNO₃, H₂SO₄, HCl, HCN⁻, COV (CO, HAP, ...) adding physical factors such as noise, vibrations, and repetitive movements.

- The presence of EDTA, NTA, formaldehyde, dioxins, phthalates, alkylphenols or polychlorinated bisphenols should also be noted, although significant exposure will depend on field investigations.

- Vector-borne and microbiological exposure will also be present.

Considering the quantities released in all states of matter (gaseous, dust, waste, debris, sludge, liquid) and interactions in the environment, analysis of exposure routes has shown that it is the entire population (not just gold miners) that will be exposed, and that absorbed doses are likely to be high.

As these elements and agents are recognized as toxic and carcinogenic, and some as endocrine disruptors, the health effects expected in the population will be both acute and chronic at the same time.

A study protocol should also consider data characteristic of the population, such as risk perception or beliefs, habits and behaviors, precarious conditions and lifestyle...

Failure to take all these hazardous agents and population parameters into account would demonstrate the limitations of many health studies.

By examining the various advantages, disadvantages and constraints of health assessment methods, this protocol could be oriented towards retrospective longitudinal epidemiological studies, starting with exposure groups of child orphans, who are particularly vulnerable. Coupled with a few direct or indirect measurements, these studies would represent a better approach to a global health effects approach.

Résumé :

L'exploitation artisanale de l'or, autrement appelée " orpaillage ", modifie considérablement et durablement le paysage des régions en contaminant eau, sol et air.

Repris par plusieurs études, il a été question, dans ce travail, d'aller au-delà des expositions au mercure et cyanure ou même des expositions chimiques liées à ce contexte et de proposer une étude plus globale des effets sanitaires.

S'appuyant essentiellement sur la combinaison et la complémentarité de plusieurs recherches scientifiques, les analyses de techniques d'orpaillage et de schéma de transfert de molécules réalisées dans cette étude ont conduit à des résultats suivants :

- La liste des substances dangereuses pour la santé liée à l'orpaillage peut donc s'allonger comme ceci : **Hg, MeHg, Pb, As, MMA, DMA, Cd, Ni, Zn, Al, Mn, Cu, Co, SiO₂, CN⁻, HNO₃, H₂SO₄, HCl, HCN⁻, COV (CO, HAP, ...)** en ajoutant des facteurs physiques tel que **le bruit, les vibrations et mouvements répétitifs**.
- Les présences du **EDTA, NTA, formaldéhyde, dioxines, phtalates, alkylphénols ou bisphénols polychlorés** sont également à signaler même si une exposition significative dépendra des investigations sur terrain.
- S'ajoutera pareillement l'exposition vectorielle et microbiologique.

Tenant compte des quantités libérées dans tous les états de la matière (gazeuse, poussière, déchet, débris, boue, liquide) et des interactions dans l'environnement, l'analyse des voies d'exposition a démontré que c'est l'ensemble de la population (et non seulement les orpailleurs) qui sera exposé et que les doses absorbées devraient être élevée.

Ainsi ces éléments et agents reconnus comme des toxiques et cancérigènes ou encore perturbateurs endocriniens pour certains, les effets sanitaires attendus dans la population vont être à la fois aigu et chronique en même temps.

Un protocole d'étude devrait également prendre en compte les données caractéristiques des populations telles que la perception du risque ou encore les croyances, les habitudes et comportements, les conditions précaires et mode de vie ...

La non prise en compte de tous ses agents dangereux et paramètres de population montrerait les limites de plusieurs études sanitaires réalisées.

En examinant les différents avantages, inconvénients et contraintes des méthodes d'évaluation sanitaire, ce protocole pourrait s'orienter vers des **études épidémiologiques longitudinales rétrospectives** en commençant par les groupes d'expositions **des enfant-orpailleurs**, particulièrement vulnérable. Ces études couple par quelques mesures directes ou indirectes représenteraient une meilleure approche dans une démarche des effets sanitaires globaux.