

IRDH

Institut de Recherche en Droits Humains

RECHERCHE | FORMATION | PLAIDOYER

Établissement privé d'utilité publique

66, Av. Kapenda, Lubumbashi
RD Congo

+243 851 103 409

info@irdh.org; www.irdh.org



RAPPORT DE CONFERENCE

« JUSTICE ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE : DEFIS, PERSPECTIVES ET DYNAMIQUES CONFLICTUELLES »

Première partie: Hydrogéologie et eaux
d'exhaure - Ecotoxicologie aquatique - Sols
et agriculture - Exposome et santé publique

LUBUMBASHI, LE 04 SEPTEMBRE 2026

RAPPORT DE CONFERENCE

« JUSTICE ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE : DEFIS, PERSPECTIVES ET DYNAMIQUES CONFLICTUELLES »

Première partie: Hydrogéologie et eaux d'exhaure - Ecotoxicologie aquatique - Sols et agriculture - Exposome et santé publique

RESUME EXECUTIF

L'environnement est un système complexe et multidimensionnel. Les formes de vie animales et végétales s'y déploient aussi bien dans les milieux aériens, terrestres qu'aquatiques. La préservation de ces écosystèmes interconnectés ne pourra se faire sans une synergie forte entre l'Etat, le monde académique, les acteurs industriels et les communautés locales.

Face à cette vaste réalité, l'Institut de recherche en droits humains (IRDH) a choisi de focaliser les efforts de sa première conférence scientifique sur la problématique de la pollution de l'hydrosphère. Dans ce cadre, il a organisé, le 4 septembre 2026, une première rencontre au Centre Arrupe pour la Recherche et la Formation (CARF) de Lubumbashi. L'événement a réuni un panel d'experts, notamment des juristes environnementalistes, des médecins spécialistes en santé publique, des écotoxicologues, des hydrologues, des pédologues, des agronomes, des ingénieurs des mines, des métallurgistes, des aquaculteurs et des géotechniciens.

Au cours de cette rencontre, quatre professeurs d'université ont exposé avec rigueur leurs perspectives scientifiques sur des domaines de recherche cruciaux pour l'environnement et le développement durable.

D'abord, le Professeur Flory Kiseya a éclairé l'auditoire sur l'origine, l'usage et les critères de potabilité des eaux d'exhaure. Son exposé se résume en une formule clé : « **L'eau d'exhaure n'est pas une simple eau souterraine ordinaire. Elle porte une signature minière métallique, même lorsque son pH reste proche de la neutralité** ».

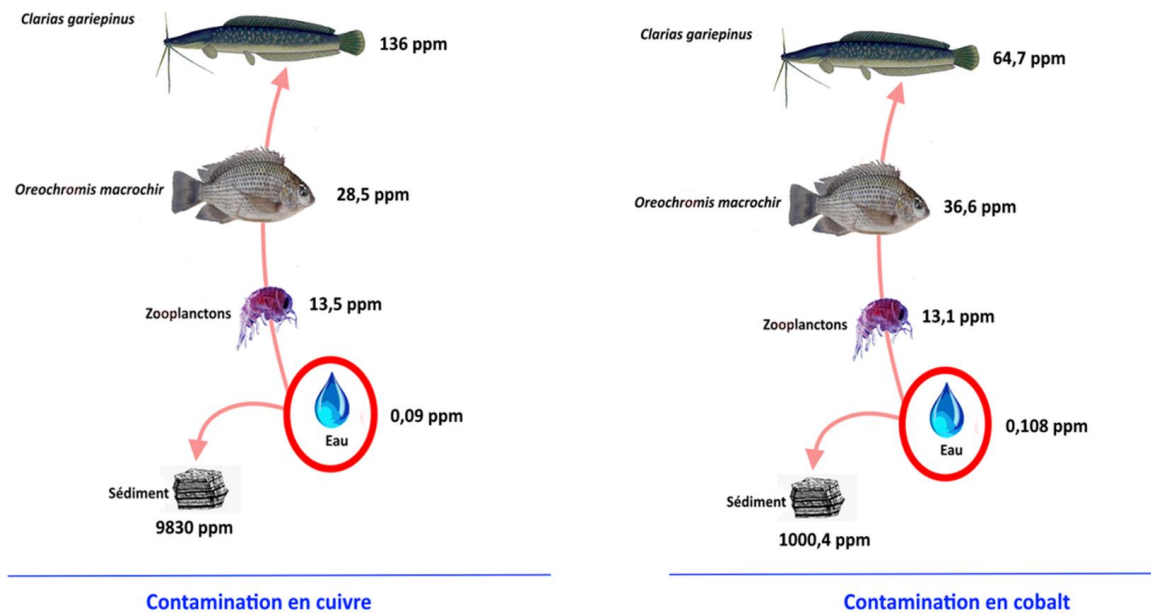
Dans la continuité de ces enjeux, le Professeur Bauchet Katemo a abordé les menaces que font peser les eaux contaminées sur la biodiversité aquatique. Il a notamment démontré **les impacts écotoxicologiques d'une hydrosphère polluée sur l'ensemble de la chaîne alimentaire des différentes formes de vie aquatiques**.

Ensuite, l'exposé du Professeur Michel Mpundu a mis en évidence **les indicateurs de la dégradation des sols irrigués par des eaux contaminées**. Il a analysé leurs impacts négatifs tout en ouvrant des perspectives de remédiation grâce à la phytotechnie.

Enfin, le Professeur Célestin Banza a mis en lumière sur les risques sanitaires d'une exposition prolongée aux Éléments Traces Métalliques (ETM). Il a notamment alerté sur **le rôle de ces métaux comme perturbateurs endocriniens, leurs effets délétères différés, ainsi que sur les risques accrus de malformations congénitales et de retards de croissance.**

=====

Impact écotoxicologique d'une eau polluée sur la chaîne alimentaire aquatique.



INTRODUCTION GENERALE

1. De l'organisation de la conférence

Le 04 septembre 2026, de 13 heures à 16 heures, au Centre Arrupe pour la Recherche et la Formation (CARF) de Lubumbashi, l'Institut de recherche en droits humains (IRDH) a organisé la première conférence scientifique réunissant des juristes environnementalistes, des médecins spécialistes en santé publique, des écotoxicologues, des hydrologues, des pédologues, des agronomes, des ingénieurs des mines, des métallurgistes, des aquaculteurs et des géotechniciens.

Cette conférence s'inscrit dans une transformation profonde de la question environnementale dans la ceinture minière du sud de la République Démocratique du Congo (RDC). Le Haut-Katanga et le Lualaba abritent des gisements de cuivre et de cobalt d'importance mondiale. Conséquemment, les deux provinces sont exposées à une densité exceptionnelle d'exploitations minières, de concentrateurs, d'unités hydro et pyrométallurgiques, de haldes, de bassins de résidus et des réseaux de drainage.

Dans le paysage décrit ci-dessus, la justice environnementale ne peut être réduite à la réparation à posteriori d'un dommage visible. Elle implique la distribution équitable des risques et des bénéfices, la reconnaissance des savoirs et des droits des communautés, l'accès à l'information, la participation aux décisions et la disponibilité de recours effectifs.

2. Problématique de la conférence

Le présent rapport structure la conférence autour d'une question transversale : **Comment qualifier scientifiquement les impacts des eaux d'exhaure et des rejets miniers, lorsqu'ils traversent plusieurs compartiments environnementaux, avant d'atteindre l'être humain ?**

Cette question appelle un cadre « source–voie–récepteur ». La source peut être hydrique, atmosphérique, pédologique ou alimentaire. Le récepteur peut être un macroinvertébré benthique, un poisson, une culture maraîchère, un bétail ou une population humaine. La justice environnementale commence scientifiquement, lorsque ces chaînes sont rendues traçables.

Le cadrage institutionnel de l'IRDH ajoute une dimension juridique essentielle. L'article 53 de la Constitution congolaise reconnaît le droit de toute personne à un environnement sain et impose à l'État une obligation de protection de l'environnement et de la santé des populations. La loi N° 11/009 du 9 juillet 2011 domestique, en Droit de l'environnement congolais, les principes internationaux de prévention, de précaution, de pollueur-payeur, d'information et de participation du public. Le Code minier révisé en 2018 et son Règlement d'application renforcent par ailleurs les dispositifs d'Etude d'impact environnemental et social (EIES), de certificat environnemental, de gestion des eaux, de suivi de la qualité et de réhabilitation.

La préoccupation scientifique centrale est relative aux effets cumulatifs de la pollution, même à faible degré. Une communauté peut être exposée simultanément à une poussière ou une eau contenant un polluant (quel que soit le degré), du cobalt, du cuivre, du manganèse, du plomb ou de l'arsenic. Au même moment qu'elle consomme des légumes cultivés sur un sol métallifère et des poissons ayant accumulé des métaux. L'évaluation, substance par substance, demeure nécessaire. Cependant, elle ne suffit plus, si elle ne tient pas compte de l'exposome. Cette notion intègre le temps d'exposition d'individus aux éléments traces métalliques, leurs interactions et les fenêtres de vulnérabilité. De même, l'écotoxicologie s'intéresse aux mélanges, aux stress multiples et aux perturbations indirectes, telles que la turbidité, le colmatage et la perte d'habitat. Ces perturbations qui peuvent être aussi déterminantes que la toxicité chimique directe.

3. Contribution de la conférence à la recherche de la réponse

L'un des apports majeurs de cette conférence est d'avoir réuni quatre disciplines qui sont trop souvent séparées : L'ingénierie minière et hydrogéologique, l'écotoxicologie aquatique, les sciences du sol et de l'agronomie, ainsi que la toxicologie humaine. Cette interdisciplinarité permet de passer, d'une logique de conformité ponctuelle, à une logique de causalité environnementale pérenne. Ainsi, un échantillon d'eau pris à l'exutoire ne peut être interprété correctement sans connaître sa variation saisonnière due à son débit, sa spéciation, ses limites de détection, la géochimie du bassin, la position par rapport aux usages en aval.

DEROULEMENT DES TRAVAUX

La présente synthèse reprend le déroulé des actes de la conférence. Outre les experts en divers domaines touchant à l'environnement, la participation s'était élargie aux services techniques provinciaux de la Division de l'Environnement ; de la Division de l'Agriculture et Sécurité alimentaire ; de la Division de Pêche et Élevage ; de l'Agence Congolaise de l'Environnement (ACE) ; du Fonds National de Promotion et de Service Social (FNPSS) ; de dirigeants des entreprises minières ; des représentants des communautés locales et d'autres parties prenantes à la protection de l'environnement et au développement durable.

Pendant plusieurs heures, les participants ont suivi des exposés de haute facture scientifique. D'abord, le mot d'introduction du Directeur Général de l'IRDH, ensuite, quatre professeurs d'université ont développé des sous-thèmes portant sur les aspects techniques du thème général intitulé : « **Justice environnementale et sociale dans la province du Haut-Katanga : Défis, perspectives et dynamiques conflictuelles** ».

Le premier panel s'est concentré sur la cause : « les eaux d'exhaure », leur nature, leur composition physico-chimique et leurs usages possibles. Le second panel s'est appesanti sur les impacts de ces eaux sur les animaux aquatiques via la bioaccumulation et bioamplification. Le troisième a exposé sur les impacts sur le sol et les cultures maraichères. Enfin, le quatrième a analysé les impacts sur l'être humain qui est au sommet de la chaîne alimentaire, qui s'abreuve en eau, consomme des poissons et des légumes issus du sol.

Cette activité s'est ainsi inscrite dans le cadre du devoir universel de protection de l'environnement. L'événement avait pour objectif d'analyser la problématique environnementale sous différents angles techniques. Il a, par ailleurs, mis en lumière les dangers écologiques et sociaux qui guettent la province du Haut-Katanga, tout en démontrant scientifiquement l'urgence d'impliquer activement les entreprises minières. Cette participation est jugée indispensable à la co-construction de solutions durables face aux conflits environnementaux.

Le rapport de la conférence repose sur des données empiriques et des interprétations rigoureuses des experts de chaque thématique. Ces interventions s'appuient sur des analyses de laboratoire et sur des référentiels. Le fil directeur du rapport peut ainsi être formulé comme une chaîne de preuve : **Activité minière → émission et transfert d'éléments trace-métalliques**

→ **modification physico-chimique de l'hydrosphère** → **exposition biologique** → **biomarqueur ou effet** → **évaluation du risque** → **prévention, traitement, réparation et suivi.**

L'examen d'un niveau quelconque de cette chaîne exige une nette distinction de ce qui est mesuré, ce qui est modélisé, ce qui est plausible et du reste à démontrer.

La notion de justice environnementale implique un principe de symétrie de l'information. Les communautés riveraines doivent pouvoir accéder à des résultats compréhensibles, tandis que les entreprises doivent disposer d'un cadre scientifique stable, avec des seuils, protocoles et obligations de déclaration clairement définis. La transparence des données ne remplace pas la régulation ; elle en augmente l'efficacité en permettant la vérification indépendante, la détection précoce des tendances et la réduction des conflits fondés sur l'asymétrie de l'information.

Trois objectifs analytiques structurent le présent rapport. Le premier est descriptif : Conserver sans altération les données chiffrées et les observations portées dans les présentations, en identifiant leur provenance. Le deuxième est explicatif : Relier ces observations à des mécanismes hydrogéologiques, géochimiques, éco-toxicologiques et toxicologiques reconnus. Le troisième est décisionnel : Transformer les constats en indicateurs, seuils d'alerte, options de traitement et protocoles de suivi. Cette séparation est essentielle, car une donnée peut être exacte sans que son mécanisme soit démontré, et un mécanisme plausible ne suffit pas à établir la responsabilité d'une source particulière.

Le niveau d'ambition scientifique retenu est celui d'une évaluation intégrée du risque. Il associe la caractérisation du danger, l'évaluation de l'exposition, la relation dose-réponse lorsque disponible et la caractérisation de l'incertitude. A l'échelle écologique, la même logique est étendue aux habitats et aux fonctions de l'écosystème. L'objectif n'est donc pas de multiplier les seuils, mais d'identifier les combinaisons de preuves qui justifient une action proportionnée : **Prévention, lorsque le risque est plausible et potentiellement grave ; Intervention immédiate, lors d'un incident aigu ; Restauration, lorsque le dommage est documenté, et recherche ciblée lorsque l'incertitude empêche encore une conclusion causale robuste.**

Cette démarche donne à la conférence une portée opérationnelle. Les données scientifiques deviennent des éléments d'une gouvernance. Elles orientent la conception des réseaux de surveillance, les obligations de publication, les décisions d'usage de l'eau, les restrictions temporaires de pêche ou de culture, les investissements de traitement et les mécanismes de

réparation. La qualité scientifique n'est donc pas un supplément académique. Elle conditionne directement l'équité de la décision publique et la possibilité d'un dialogue contradictoire entre l'État, les entreprises minières, les chercheurs et les communautés locales.

MOT DE BIENVENU DU DIRECTEUR GENERAL DE L'IRDH

Mesdames et Messieurs, en vos titres et qualités respectifs, tout protocole observé.

Messieurs les Professeurs des Universités, spécialistes en divers domaines de l'Environnement.

Chers chercheurs en droits humains.



Nous sommes heureux de vous accueillir dans cette salle de conférence du Centre Arrupe de Lubumbashi et vous souhaitons la bienvenue au débat scientifique sur la « **Justice environnementale et sociale** ». Cette première conférence, organisée par l'Institut de recherche en droits humains (IRDH), marque un nouveau départ dans la relation entre les parties prenantes à la protection de l'environnement dans la province du Haut-Katanga.

Des responsables des services publics, des dirigeants d'entreprises, des chercheurs, des responsables d'ONG ainsi que des représentants des communautés impactées par les activités

minières se retrouvent en ce lieu, afin de discuter des problématiques environnementales et d'analyser des voies de collaboration pour des solutions durables.

1. Contexte de l'organisation de la conférence

La RDC est fortement engagée dans l'exploitation minière. Au cœur de cette dynamique, la province du Haut-Katanga se positionne en tête en termes de nombre d'entreprises minières en activité. L'intensification de cette exploitation sera naturellement décuplée par la mise en service du Corridor de Lobito qui traverse la région. Par conséquent, le risque d'une augmentation des plaintes relatives à la pollution environnementale est particulièrement élevé.

Ces activités anthropiques sont directement à l'origine de l'altération de la biosphère, de la dégradation de la lithosphère et de la contamination de l'hydrosphère. Elles entraînent la dispersion d'Eléments-Traces Métalliques (ETM) dans la nature (les terres arables, l'atmosphère urbaine, ainsi que dans les nappes phréatiques, les rivières, les fleuves et les lacs). De ce fait, elles affectent l'ensemble de la biodiversité, qu'elle soit animale ou végétale, dans les eaux, sur la terre ou dans l'air. C'est dans ce contexte alarmant que l'IRDH organise la présente conférence.

2. Objectifs de la Conférence

Cet événement vise à analyser, sous différents angles techniques, les dangers environnementaux et sociaux qui guettent le Haut-Katanga. Plus spécifiquement, la conférence tend à :

- **Démontrer** la nécessité et l'urgence d'une participation active des entreprises minières à la co-construction de solutions durables aux conflits environnementaux, plutôt que de chercher à s'y soustraire ;
- **Contribuer** à la vulgarisation du devoir citoyen de protection de l'environnement, conformément à l'article 53 de la Constitution, en vigueur en RDC.

3. Problématiques environnementales

Chacun d'entre nous se pose l'une ou l'ensemble des questions ci-après. Celles-ci tournent autour de **l'avenir de l'être humain** et des diverses formes de vie dont il dépend, et se résument au besoin fondamental d'un **environnement sain** :

- Qu'est-ce qui est à la base de l'altération de la qualité de la vie dans nos villes et nos villages ?
- Pourquoi l'air que l'on respire, l'eau que l'on boit et la terre que l'on cultive perdent-ils continuellement leurs qualités vitales ?
- Comment faire face à la chaleur de plus en plus excessive et suffocante, aux odeurs nauséabondes, aux bruits assourdissants et à la pollution lumineuse ?
- L'eau de la REGIDESO, des puits de forage ou de nos rivières est-elle encore réellement potable ?
- Qu'est-ce qui cause la disparition des poissons et des autres espèces aquatiques de nos rivières, de nos lacs et de nos fleuves ?
- Qu'est-ce qui rend les terres de nos champs de plus en plus infertiles ?
- Qu'est-ce qui provoque la diminution ou la disparition progressive de nos forêts et de la faune sauvage ?

4. Réponse de la science au problème social

En jargon scientifique, ce questionnement renvoie à la notion de qualité de l'environnement, que la science juridique définit à travers la combinaison de trois dimensions relatives à :

- Un ensemble d'éléments naturels et artificiels ;
- Des équilibres biologiques et géochimiques ;
- Des facteurs économiques, sociaux et culturels qui favorisent l'existence humaine, la transformation et le développement de son milieu de vie.¹

En fait, la définition de l'environnement fait appel à plusieurs domaines scientifiques. Elle révèle que le droit à un environnement sain est un droit fondamental, indissociable de la vie humaine. Cette définition met en lumière sa complexité ainsi que sa dépendance vis-à-vis de la technicité de multiples disciplines scientifiques.

¹ Définition tirée de l'article 2 de la Loi N° 11/009 du 09 juillet 2011 portant principes fondamentaux relatifs à la protection de l'environnement.

Le premier domaine scientifique étudie **les écosystèmes et les diverses formes de vie humaine**. En termes simples, il s'agit de l'étude des modes de vie et des types d'habitats dans les villes et les villages, à travers les âges, les époques, les continents, ainsi que la diversité des groupes ethniques.

Le deuxième domaine scientifique est consacré aux **écosystèmes et aux diverses formes de vie animale**. A l'instar des sciences humaines, la zoologie et les sciences vétérinaires analysent la faune sauvage ou domestique selon les périodes, les régions et les habitats. Cette catégorie englobe toutes les espèces animales, qu'elles soient terrestres ou aquatiques, allant des micro-organismes, bactéries et microbes, jusqu'aux mastodontes éléphantiques.

Le troisième domaine scientifique examine les **écosystèmes et les multiples formes de vie végétale**. La botanique et ses disciplines dérivées étudient les espèces végétales dans leurs milieux naturels ou cultivés. Cette nomenclature s'étend des simples herbes et champignons aux arbres de la taille des baobabs, et des potagers domestiques aux denses forêts équatoriales.

L'environnement est complexe. Les formes de vie animales et végétales évoquées ci-dessus se déploient tant sur le plan terrestre qu'aquatique. Face à cette vaste réalité, aborder l'environnement impose une délimitation rigoureuse du débat.

Le débat sur **l'atmosphère** se concentre sur l'air et la couche d'ozone. Il réunit les spécialistes des gaz à effet de serre et de la pollution atmosphérique, ainsi que l'étude des formes de vie qui dépendent directement de la qualité de l'air.

L'analyse de **la lithosphère** sous-entend la connaissance des **sols**, des sables, des roches et des reliefs. Elle implique l'examen du développement de la **faune et de la flore terrestres**, des parcs animaliers, des élevages, des plantations agricoles industrielles et des potagers domestiques.

La discussion sur **l'hydrosphère** concerne la **biodiversité aquatique**, les eaux souterraines et de surface (ruisseaux, rivières, fleuves, lacs). Elle englobe l'étude de la faune, de la flore et des **écosystèmes aquatiques** dans lesquels ils évoluent.

5. Focus sur l'eau

Il est impossible de traiter l'ensemble de ces questions lors d'une seule conférence de trois heures. C'est pourquoi l'IRDH focalise ses premiers efforts sur la problématique liée à l'hydrosphère. Les interventions scientifiques s'articuleront autour des communications suivantes :

1. Le Professeur Flory Kiseya Tshikala, spécialiste en géophysique appliquée et ingénierie minière, interviendra sur le thème., interviendra sur le thème : « Eaux d'exhaure : Origines, usages et conditions de potabilité ».
2. Le Professeur Boshe Katemo Manda, spécialiste en aquaculture, abordera les « Impacts éco-toxicologiques des effluents miniers et des eaux d'exhaure : Enjeux pour la biodiversité aquatique et la sécurité de la chaîne alimentaire ».
3. Le Professeur Ordinaire Michel Mpundu Mubemba Mulambi, spécialiste en écologie et en restauration des paysages, traitera des « Risques de contamination de la chaîne alimentaire dans le Haut-Katanga et perspectives de remédiation ».
4. Le Professeur Ordinaire Célestin Banza Lubaba Nkulu, spécialiste en santé publique, éco-toxicologie et environnement, exposera les « Impacts des métaux lourds sur la santé publique, dans le haut-Katanga ».

Mesdames, mes demoiselles et messieurs ; distingués invités. Les aspects juridiques de la problématique environnementale feront l'objet d'une deuxième conférence, dont la date sera fixée d'un commun accord avec les intervenants. En réunissant ainsi la rigueur scientifique et l'engagement citoyen, la présente conférence pose les jalons d'un dialogue constructif et indispensable pour l'avenir de notre province. L'IRDH reste convaincu que la préservation de notre écosystème ne pourra se faire sans une synergie forte entre le monde académique, les acteurs industriels et les communautés locales. Nous formulons le vœu que les échanges de ce jour ouvrent la voie à des réformes concrètes et à des pratiques plus respectueuses de la vie, pour un Haut-Katanga durable et prospère.

THEMATIQUE 1. LES EAUX D'EXHAURE : ORIGINES, **USAGES ET CONDITIONS DE POTABILITE**

Par le **Professeur Kiseya Tshikala Flory**, spécialiste en géophysique appliquée et ingénierie minière à la Faculté Polytechnique de l'Université de Lubumbashi (UNILU), interviendra sur le thème.

« Le pH, à lui seul, ne constitue pas un critère suffisant pour juger de la potabilité de l'eau. »



I. Définition, objectif et sécurité de l'exhaure minière

1.1. Définition

Dans le domaine minier, « l'exhaure » désigne l'ensemble des opérations techniques qui consistent à évacuer et refouler vers la surface, en dehors du champ minier, les eaux qui s'y accumulent. Ces eaux proviennent de diverses sources : les **eaux météoriques** (pluies), les **eaux d'infiltration** qui s'infiltrant dans les galeries, et les **eaux souterraines** mises à découvert par l'exploitation.

L'exhaure n'est donc pas une simple opération de drainage, mais une véritable activité de gestion hydrogéologique qui conditionne la viabilité et la sécurité des travaux miniers. Elle implique la mise en place de dispositifs permanents et adaptés, capables de dériver ces eaux hors du périmètre d'exploitation, afin d'éviter leur accumulation et les risques qui en découlent.



1.2. Objectif opérationnel de l'exhaure.

Le premier objectif de l'exhaure est de garantir une « exploitation à sec », condition indispensable au bon déroulement des travaux miniers. En maintenant les galeries et les puits exempts d'eau, l'exhaure facilite la circulation des engins et du personnel, réduit les risques d'accidents et prévient les interruptions de production.

Une mine inondée ou humide compromet non seulement la sécurité des travailleurs, mais aussi la performance des machines et la qualité des opérations d'extraction. L'exhaure apparaît ainsi comme une mesure préventive essentielle, permettant de maintenir des conditions optimales de travail et de préserver la continuité des activités minières.

1.3. Dimension sécuritaire de l'exhaure.

Au-delà de l'aspect opérationnel, l'exhaure revêt une dimension sécuritaire majeure. L'inondation d'une mine peut entraîner des conséquences dramatiques : perte de matériel, interruption prolongée des activités, voire mise en danger de la vie des travailleurs.

Pour prévenir la noyade de la mine, il est nécessaire de mettre en œuvre des mesures préventives et passives, telles que : L'installation de **systèmes de pompage permanents**, capables de refouler continuellement les eaux vers la surface. **La surveillance en continu des niveaux d'eau**, grâce à des capteurs et instruments de mesure. La création de **bassins de rétention et de rejet**, permettant de stocker temporairement les eaux évacuées avant leur traitement ou leur dérivation. Et L'élaboration **de plans d'urgence** en cas de crue ou d'accident hydrogéologique, afin de protéger les travailleurs et les infrastructures.

II. Origines, nature des eaux et système hydrogéologique d'exhaure

L'eau d'exhaure n'est pas une catégorie chimique homogène. C'est une catégorie fonctionnelle d'ingénierie. Sa composition dépend de l'origine de l'eau, du temps de contact avec la roche, du type de minerai, des explosifs, des lubrifiants, des matériaux de remblai, des bactéries, du régime redox et des opérations de traitement rencontrées. Une eau pompée dans un aquifère carbonaté peut être neutre et dure, tandis qu'une eau circulant dans des zones sulfurées oxydantes peut devenir acide, sulfatée et fortement métallifère. Cette distinction est fondamentale pour le

Katanga, où les assemblages cuivre-cobalt (Cu-Co) s'accompagnent localement de Fer (Fe), Manganèse (Mn), Zinc (Zn), Plomb (Pb), Arsenic (As), Cadmium (Cd), Uranium (U) et des phases sulfurées susceptibles de contrôler la mobilité des éléments.

Le système hydrogéologique doit être conceptualisé comme un continuum entre la surface et les travaux miniers. Dans la zone insaturée, l'eau de pluie s'infiltré sous l'effet de la gravité et des gradients capillaires. Une nappe perchée peut se former sur une lentille peu perméable. Plus bas, une nappe libre répond directement aux variations de recharge, alors qu'une nappe captive est maintenue sous pression entre couches moins perméables. Dans les calcaires et dolomies karstifiés, l'écoulement peut être concentré dans des conduits à forte transmissivité. Dans le socle cristallin, il dépend surtout des fractures, diaclases et zones altérées. Les actes mentionnent précisément ces compartiments, qui doivent être intégrés dans un modèle conceptuel du site.

2.1. Modélisation hydrogéologique globale.

La portée de cette modélisation est considérable. Elle permet de comprendre la dynamique des nappes, d'évaluer les impacts des activités minières sur les ressources en eau, de planifier une gestion intégrée des bassins versants en tenant compte des besoins agricoles, industriels et domestiques, et de prévenir la pollution pour protéger la santé des populations.

La modélisation hydrogéologique globale permet de comprendre la dynamique des eaux souterraines et de surface dans un bassin versant. Elle repose sur deux volets complémentaires: L'analyse des réservoirs du sous-sol et l'étude des écoulements à l'échelle du bassin.

a. Réservoirs du sous-sol.

Dans un premier temps, l'orateur a insisté sur la diversité des réservoirs du sous-sol. La zone insaturée, située au-dessus de la nappe phréatique, laisse circuler l'eau sans saturer totalement les pores du sol. La nappe perchée, isolée par une couche imperméable, se forme localement et reste vulnérable aux variations climatiques. La nappe libre, quant à elle, constitue le principal réservoir accessible, directement alimenté par les précipitations et les infiltrations. La nappe captive, enfermée entre deux couches imperméables, nécessite des forages spécifiques pour être exploitée. Enfin, les formations géologiques – sable, schistes, socle cristallin fracturé et réseaux karstiques – influencent la vitesse et la direction des écoulements souterrains. Cette diversité montre que chaque couche joue un rôle particulier dans le stockage et la circulation de

l'eau, et qu'il est indispensable de les comprendre pour anticiper les risques liés à leur exploitation.

b. Écoulements à l'échelle du bassin versant.

Dans un second temps, l'analyse s'est portée sur les écoulements à l'échelle du bassin versant, à travers un bilan hydrique global. Les précipitations constituent la principale source d'alimentation en eau. Une partie de cette eau s'infiltre dans le sol, rechargeant les nappes souterraines. Une autre partie ruisselle en surface, alimentant directement les rivières et les lacs. L'écoulement de subsurface, intermédiaire entre ruissellement et infiltration, contribue de manière différée aux cours d'eau. Enfin, l'écoulement souterrain vers l'exutoire traduit la participation des nappes phréatiques et captives au débit global du bassin. Ce bilan met en évidence la circulation complexe de l'eau, ses transformations et ses points de vulnérabilité, notamment en cas de pollution ou de surexploitation.

2.2. Types de séquence technique de l'exhaure en mine à ciel ouvert (Open Pit)

a. Exhaure primaire.

L'exhaure primaire correspond au rabattement de la nappe phréatique sous le fond de la fosse. Elle est réalisée à l'aide de puits externes équipés de pompes immergées, qui refoulent continuellement l'eau vers la surface. Cette opération vise à maintenir le niveau de la nappe en dessous du plancher de la mine, afin d'éviter toute infiltration massive et de garantir la stabilité des travaux. Elle constitue une mesure préventive essentielle, car elle permet de contrôler la pression hydrostatique et de protéger les infrastructures minières contre les risques d'inondation.

b. Exhaure secondaire.

L'exhaure secondaire, quant à elle, concerne le drainage des eaux d'infiltration qui s'accumulent dans les talus et les parois de la fosse. Elle est assurée par des forages horizontaux de drainage, qui captent ces eaux et les dirigent vers les banquettes et fossés d'écoulement. L'ensemble de ces dispositifs conduit les eaux vers le puisard situé au fond de la fosse, où elles sont collectées avant d'être refoulées. Cette forme d'exhaure agit comme une mesure corrective et complémentaire, permettant de gérer les infiltrations résiduelles et d'assurer la sécurité des zones de travail.

2.3. Le système d'exhaure souterrain complexe (Cas de la mine de Kipushi)

En mine souterraine, l'architecture devient un réseau de collecte et de pompage étagé. A titre illustratif, la mine de Kipushi collecte des venues naturelles par caniveaux, fossés et galeries. Ensuite ces eaux passent dans quatre décanteurs, puis un pompage depuis une salle au niveau 1200 m équipée de cinq pompes multicellulaires de 3,5 MW vers une salle au niveau 850 m équipée de trois pompes de 3,2 MW, avant leur refoulement vers la surface. Une telle installation traduit une charge hydraulique considérable. Elle impose des exigences de redondance, alimentation électrique sécurisée, surveillance des vibrations, gestion des boues et capacité tampon en cas de panne.

- *Analyse du schéma de l'installation de Kipushi :*

- (1) Collecte des venues d'eau naturelles par un réseau de drainage souterrain (caniveaux, fossés, galeries) ;
- (2) Acheminement vers 4 décanteurs souterrains pour la séparation solide-liquide ;
- (3) Pompage étagé : Salle d'exhaure n°2 (niveau 1200 m, équipée de 5 pompes multicellulaires de 3,5 MW) vers la Salle d'exhaure n°1 (niveau 850 m, équipée de 3 pompes multicellulaires de 3,2 MW) ;
- (4) Refoulement final vers la station de traitement et de rejet en surface.

III. Usages et devenir des eaux d'exhaure

Les eaux d'exhaure, une fois pompées et évacuées hors du périmètre minier, connaissent des destins variés qui reflètent à la fois les besoins industriels, les contraintes environnementales et les usages anthropiques.

3.1. Usages industriels directs

Une partie de ces eaux est utilisée dans des usages industriels directs. Elles servent notamment comme eaux de procédé pour alimenter les concentrateurs miniers. Cette réutilisation interne permet de réduire la dépendance aux autres sources d'eau, mais elle ne supprime pas les risques liés à la présence de métaux lourds ou de substances toxiques dans ces effluents.

3.2. Rejets environnementaux et ses dangers pour l'écosystème

La majeure partie des volumes est cependant destinée aux rejets environnementaux. Les eaux sont évacuées dans les rivières locales, telles que le Luilu, le Musonoie ou le Kafubu. Ce rejet massif, souvent conforme aux limites fixées par le règlement minier, n'est pas exempt de

conséquences écologiques. Les cours d'eau deviennent des vecteurs de dispersion des contaminants, affectant la biodiversité aquatique et les usages en aval.

3.3. Usages anthropiques (directs et indirects)

Sans encourager, les eaux d'exhaure connaissent également des usages anthropiques, directs, (approvisionnement des populations locales en eau, faute de sources alternatives), et indirects, (irrigation des cultures maraîchères situées en aval des sites miniers). **Cet usage, bien que vital pour les communautés, expose les habitants à des risques sanitaires liés à la bioaccumulation des métaux lourds dans les produits agricoles et à la consommation d'une eau dont la potabilité n'est pas garantie.**

L'échelle des volumes illustre l'ampleur du phénomène. A Kipushi, par exemple, le pompage atteint environ 1,6 million de m³ par mois, rejetés vers la rivière Kafubu. Ce chiffre témoigne de la pression exercée sur les milieux naturels et de l'importance de mettre en place des mécanismes de contrôle et de traitement adapté.

IV. Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'exhaure

Les eaux d'exhaure, une fois évacuées hors des sites miniers, présentent des caractéristiques physico-chimiques particulières qui traduisent à la fois leur origine géologique et les activités anthropiques liées à l'exploitation.

4.1. Composition générale

Sur le plan de la composition générale, elles contiennent des matières en suspension (MES), des sels dissous et des métaux lourds. Ces éléments proviennent directement du contexte géologique des gisements et de la nature des roches traversées. Les particules solides en suspension augmentent la turbidité des eaux, tandis que les sels dissous modifient leur conductivité et leur équilibre ionique.

4.2. Polluants anthropiques d'exploitation

A cette composition naturelle s'ajoutent des polluants anthropiques d'exploitation. Les eaux d'exhaure peuvent contenir des traces d'explosifs utilisés pour le dynamitage, des lubrifiants provenant des engins miniers et du gasoil issu des opérations de pompage ou de transport. Ces

contaminants accentuent la charge polluante et introduisent des composés organiques ou chimiques qui ne sont pas naturellement présents dans les nappes.

4.3. Risques spécifiques : Transport potentiel de particules radioactives

Un risque spécifique est lié au transport potentiel de particules radioactives. Certaines formations géologiques du Katanga renferment des minéraux radioactifs, et leur mise à découvert par l'exploitation peut entraîner une dispersion invisible mais dangereuse dans les eaux d'exhaure. Ce risque, bien que moins fréquent que la contamination par les métaux lourds, demeure préoccupant pour la santé publique et la sécurité environnementale.

4.4. Signature minière du sol du Katanga (Gisements de cuivre-Cobalt)

Les eaux d'exhaure portent une véritable signature minière du Katanga, liée aux gisements de cuivre et de cobalt. **On y retrouve de manière récurrente des concentrations significatives de cuivre (Cu), cobalt (Co), manganèse (Mn), fer (Fe), nickel (Ni), zinc (Zn), aluminium (Al), plomb (Pb) et arsenic (As).** A cela s'ajoutent des sulfates et des variations de pH, qui traduisent l'influence des processus chimiques d'oxydation et de dissolution des minéraux. Cette signature chimique constitue un indicateur fiable de l'origine minière des eaux et permet de distinguer les rejets liés aux activités extractives des autres sources de pollution.

V. Variabilité physico-chimique des eaux d'exhaure selon les sites

L'étude des eaux d'exhaure révèle une variabilité physico-chimique importante. Elles ne peuvent être appréhendées de manière uniforme. Chaque site présente une signature particulière, liée à son substrat géologique et à ses conditions d'exploitation. Raison pour laquelle, **l'entreprise doit s'assurer, via des études de labo et les audits régulières, de la qualité de ses eaux d'exhaure.** Les différences de pH, de dureté et de teneurs en métaux lourds traduisent des risques différenciés : Contamination chronique à Mutoshi, forte minéralisation et toxicité chimique à Kipushi, acidité et mobilité accrue des polluants à Kasumbalesa.

5.1. Secteur de Mutoshi

Dans le secteur de Mutoshi, les analyses montrent un pH moyen de 7,08, oscillant entre 6,58 et 8,20, ce qui traduit une **relative neutralité** chimique. Toutefois, les teneurs en **métaux lourds y**

sont particulièrement élevées : cuivre (2,43 mg/L), cobalt (0,58 mg/L), manganèse (1,84 mg/L) et fer (0,70 mg/L). Ces concentrations témoignent de l'influence directe des gisements de cuivre-cobalt sur la composition des eaux, et posent un risque de contamination chronique pour les sols et les cultures irriguées en aval.

5.2. Secteur de Kipushi

Le secteur de Kipushi présente un profil différent. Le **pH y est neutre** (autour de 7,7), mais la **dureté est extrêmement élevée** (503 mg CaCO₃/L), révélant une **forte minéralisation dolomitique**. Les eaux contiennent du cuivre (0,08 mg/L), du cobalt (0,03 mg/L), du zinc (0,80 mg/L), du plomb (0,05 mg/L) et du cadmium (0,01 mg/L). Un audit réalisé en 2003 par SNC-Lavalin pour la Banque mondiale a également signalé la présence d'arsenic et de cyanures, ce qui accentue la gravité des risques sanitaires. Ce profil illustre une eau fortement minéralisée, mais aussi chargée de polluants toxiques, dont certains sont particulièrement dangereux pour la santé humaine.

5.3. Secteur de Kasumbalesa

In fine, le secteur de Kasumbalesa (SODIMICO) se distingue par des eaux d'exhaure acides, avec un pH de 6,01. Cette **acidité traduit une altération chimique** des sols et une forte vulnérabilité des milieux aquatiques. Les eaux acides favorisent la solubilisation des métaux lourds, augmentant leur mobilité et leur capacité à contaminer les cultures et les cours d'eau.

VI. Risques sanitaires des eaux d'exhaure et conditions de potabilité

Les eaux d'exhaure, issues des activités minières, sont souvent utilisées pour alimenter les concentrateurs avant d'être renvoyées dans les bassins de rejet. Toutefois, ces eaux peuvent transporter des **particules radioactives** et des éléments toxiques tels que le **cadmium** et l'**arsenic**, comme c'est le cas dans la zone de Kipushi.

Le pH, à lui seul, ne constitue pas un critère suffisant pour juger de la potabilité de l'eau. En effet, certaines eaux d'exhaure affichent un pH de 6, révélant une acidité qui compromet leur consommation. De plus, même lorsqu'elles respectent les limites de rejets d'effluents fixées par le Règlement minier, ces eaux ne répondent pas nécessairement aux standards de potabilité

définis par les Nations Unies (OMS et FAO). L'intervention a mis en évidence la nécessité de distinguer entre conformité réglementaire en matière de rejets industriels et véritable potabilité, afin de protéger efficacement la santé des populations exposées.

Le recours aux usages anthropiques des eaux d'exhaure, qu'il s'agisse de l'approvisionnement direct des populations locales ou de l'irrigation des cultures maraîchères en aval, comporte des dangers majeurs qu'il convient de souligner.

6.1. Risques sanitaires

Ces eaux sont rarement conformes aux normes de potabilité fixées par l'OMS et la FAO. Elles peuvent contenir des métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, l'arsenic ou le cuivre, ainsi que des particules radioactives ou des résidus chimiques issus des procédés miniers. Leur consommation directe expose les populations à des maladies chroniques : Insuffisances rénales, atteintes hépatiques, troubles neurologiques, voire cancers. Les enfants et les femmes enceintes sont particulièrement vulnérables, car l'exposition prolongée peut entraîner des retards de croissance, des malformations congénitales ou des troubles neuro-développementaux.

6.2. Risques sur le plan agronomique et alimentaire

L'irrigation des cultures avec ces eaux favorise la bioaccumulation des contaminants dans les plantes. Les légumes, tubercules et fruits absorbent progressivement les métaux lourds, qui se retrouvent ensuite dans la chaîne alimentaire. Ce phénomène est aggravé par la bioamplification, qui augmente les concentrations toxiques à mesure que l'on progresse dans les niveaux trophiques. Les produits agricoles issus de ces cultures deviennent ainsi des vecteurs invisibles de contamination pour les consommateurs, compromettant la sécurité alimentaire.

6.3. Risques sur le plan environnemental et social

L'usage non contrôlé des eaux d'exhaure accentue la dégradation des sols et la pollution des cours d'eau. Les communautés rurales, dépendantes de l'agriculture vivrière et de l'eau locale, se trouvent piégées dans une situation de justice environnementale compromise : elles utilisent une ressource vitale qui est en réalité porteuse de risques graves pour leur santé et leur sécurité alimentaire.

VII. Conclusion

Les eaux d'exhaure ne sont pas de simples effluents hydriques : elles représentent un mélange complexe de composants naturels et de polluants anthropiques, porteurs d'une identité chimique propre aux gisements du Katanga. Leur gestion exige une vigilance accrue, car elles peuvent devenir des vecteurs de contamination durable pour les sols, les cours d'eau et les populations riveraines.

L'usage anthropique des eaux d'exhaure, bien qu'il réponde à des besoins immédiats, constitue une menace silencieuse et durable. Il appelle à une gestion rigoureuse, incluant le traitement préalable des eaux, la mise en place de normes de contrôle strictes et la sensibilisation des populations. Sans ces mesures, ce qui apparaît comme une ressource vitale risque de se transformer en un vecteur de contamination généralisée, compromettant à la fois la santé publique et la durabilité des systèmes agricoles.

THEMATIQUE 2. IMPACTS ECO-TOXICOLOGIQUES DES EFFLUENTS MINIERES ET DES EAUX D'EXHAURE : **ENJEUX POUR LA BIODIVERSITE AQUATIQUE ET LA SECURITE DE LA CHAINE ALIMENTAIRE**

Par le **Professeur Katemo Manda Bauchet**, spécialiste en aquaculture et Directeur Général de l'École de Pêche et d'Aquaculture de l'Université de Lubumbashi (UNILU).

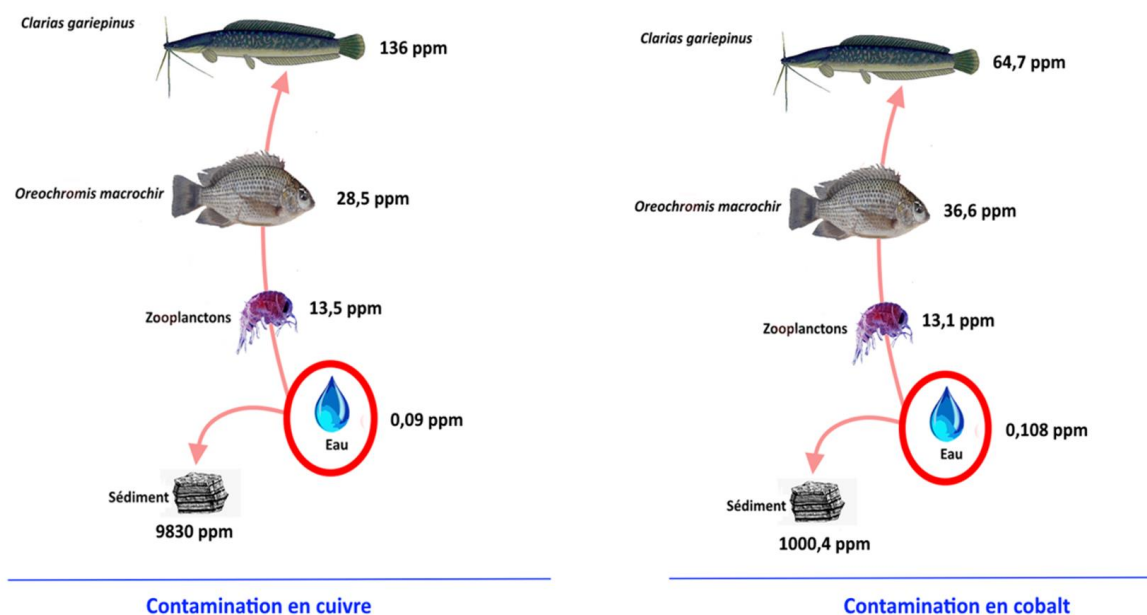


I. Introduction

La contamination environnementale dans le contexte minier du « Grand-Katanga » résulte de l'interaction de quatre compartiments fondamentaux. Dans l'**hydrosphère**, les rejets des eaux d'exhaure et le Drainage Minier Acide (DMA) transportent des sulfates et des Eléments Traces-Métalliques (ETM) solubles, affectant directement les rivières. L'**atmosphère** garde l'empreinte des émissions historiques de dioxyde de soufre (SO₂), de plomb, de cadmium et de cobalt issues des usines de pyrométallurgie, responsables de véritables « déserts métalliques » où les sols sont totalement dénudés de couverture herbacée. La **lithosphère**, quant à elle, subit une double

pression : l'érosion éolienne intense des terrils et haldes de résidus en saison sèche, et le lessivage pluvial toxique vers les nappes phréatiques en saison de pluies. Enfin, le **facteur humain** accentue cette contamination par les activités artisanales (orpaillage, dépierrage, lavage manuel) menées directement dans les cours d'eau, souvent sans équipements de protection individuelle, exposant les travailleurs et les communautés riveraines à des risques accrus.

Dans la zone du « Grand-Katanga », l'origine et la nature physico-chimique des effluents polluants sont préoccupantes. Les rejets miniers solides proviennent des résidus de concentrateurs, des lixiviats de haldes et des sédiments issus de l'érosion hydro-éolienne. Le Drainage Acide de Mine (DAM) résulte de l'oxydation chimique et biologique des minéraux sulfurés, notamment la pyrite, exposés à l'eau et à l'oxygène, générant des effluents acides fortement chargés en métaux. La signature métallique katangaise se traduit par une prédominance de cuivre, cobalt, zinc, plomb et uranium, qui confèrent aux eaux et aux sols une identité chimique directement liée aux gisements exploités. Enfin, les réactifs chimiques résiduels issus des procédés hydro-métallurgiques (cyanures, acides forts et solvants organiques), aggravent la charge polluante et introduisent des composés particulièrement dangereux pour la santé humaine et l'environnement.



II. Mécanismes physiologiques de la toxicité aquatique chez les poissons

La toxicité aquatique des métaux lourds et des effluents miniers chez les poissons se manifeste par une série de mécanismes physiologiques complexes, allant de l'exposition initiale à des perturbations cellulaires profondes.

2.1. Les voies d'exposition et d'absorption

Les voies d'exposition et d'absorption constituent la première étape. Ensuite vient l'ingestion de sédiments ou de proies contaminés qui illustre la manière dont la pollution minière s'inscrit dans la dynamique écologique. Elle ne se limite pas à une exposition directe par l'eau, mais s'infiltre dans les réseaux trophiques, transformant chaque maillon de la chaîne alimentaire en vecteur de toxicité.

a. Absorption branchiale directe (bio-disponibilité des métaux dissous)

L'absorption branchiale directe constitue la voie d'exposition la plus immédiate et la plus critique pour les poissons face aux métaux dissous dans l'eau. Les branchies, en raison de leur structure hautement vascularisée et de leur rôle vital dans les échanges gazeux, représentent une surface d'entrée privilégiée pour les contaminants.

Lorsqu'un poisson respire, l'eau traverse ses lamelles branchiales, permettant l'oxygénation du sang. Mais cette même circulation favorise la biodisponibilité des métaux lourds (cuivre, cobalt, plomb, cadmium, etc.), qui franchissent les membranes cellulaires par diffusion ou transport actif. Les ions métalliques interagissent avec les protéines et enzymes branchiales, perturbant les mécanismes d'osmorégulation et d'équilibre ionique. Les poissons absorbent directement les métaux dissous par leurs branchies, qui sont des surfaces d'échange hautement vascularisées et donc particulièrement vulnérables.

b. Ingestion de sédiments ou de proies contaminés.

Le mécanisme d'ingestion de sédiments ou de proies contaminés constitue une voie d'exposition indirecte mais particulièrement dangereuse pour les poissons. En effet, les particules fines déposées au fond des cours d'eau, issues des rejets miniers ou du drainage acide, concentrent les métaux lourds et autres polluants. Lorsque les poissons fouillent le substrat pour se nourrir,

ils ingèrent ces sédiments contaminés, ce qui favorise une bioaccumulation progressive dans leurs tissus.

De même, les proies aquatiques (invertébrés, crustacés, petits poissons) qui vivent dans ces milieux absorbent elles-mêmes les contaminants.

c. Le mode de contamination comme un indicateur essentiel pour déterminer l'origine et la nature du polluant auquel le poisson est exposé.

Lorsque les branchies présentent des concentrations plus élevées que le foie, cela signifie que la contamination provient directement de l'eau respirée. Les métaux dissous, biodisponibles dans la colonne d'eau, franchissent les membranes branchiales lors des échanges gazeux. Ce type de contamination est typique des milieux où les effluents miniers ou le drainage acide de mine enrichissent l'eau en éléments traces métalliques. Les branchies, en tant qu'organes respiratoires, deviennent alors les premiers réceptacles de la pollution, traduisant une exposition par voie respiratoire.

A l'inverse, lorsque les foies présentent des teneurs plus élevées que les branchies, cela démontre une contamination par voie alimentaire. Le poisson a ingéré des proies ou des sédiments contaminés, et les métaux lourds se sont accumulés dans le foie, organe central de la détoxification et du métabolisme. Ce mécanisme est particulièrement insidieux, car une eau relativement neutre au moment du prélèvement peut sembler non polluée, alors que les organismes vivants qui s'y trouvent (planctons, petits crustacés, écrevisses) concentrent les contaminants. Ainsi, la contamination ne résulte pas seulement de l'eau elle-même, mais aussi de la chaîne trophique aquatique, qui devient un vecteur invisible de toxicité.

Pour l'eau d'exhaure, au-delà des prélèvements d'eau de surface ou de sédiments, **il est conseillé de mener des examens sur les poissons, spécialement les branchies et les foies.** Pour que l'analyse comparative entre les branchies et le foie puisse permettre de diagnostiquer la voie d'exposition : respiration ou ingestion. Cette distinction est capitale pour comprendre la dynamique de la pollution minière et pour mettre en place des stratégies de surveillance adaptées. Car, elle révèle que **même une eau apparemment neutre peut être un milieu hautement contaminant par le biais de ses organismes aquatiques.**

Pour les écosystèmes du Copperbelt, l'état écologique doit être évalué avec une approche de type « *weight of evidence* » associant chimie de l'eau, chimie des sédiments, bioessais, communautés benthiques, poissons et données d'habitat. Une seule matrice peut sous-estimer le risque. Le sédiment, notamment, enregistre l'histoire de la contamination et peut expliquer des effets persistants alors que l'eau paraît momentanément conforme après dilution.

Compartiment	Sources	Contaminants/pressi ons	Voies d'effet
Hydrosphère	Exhaure, DAM/AMD, effluents	Métaux dissous, sulfates, MES, cyanures/réactifs selon procédé	Branchies, ingestion, habitat
Atmosphère	Fonderies, poussières, SO ₂	PM, Pb, Cd, Co, dépôts acides	Inhalation ; dépôt sur sols/eaux
Lithosphère	Terrils, haldes, sols nus	Métaux, sulfures oxydables, fines	Lessivage, ruissellement, transfert sol-eau
Facteur humain	Industrie, Artisanat, lavage, manipulation	Contact direct + remise en suspension	Dermique, inhalation, ingestion accidentelle

III. Les effets des effluents liés à l'eau d'exhaure, cascades de toxicité cellulaire et systémique

Une fois les contaminants pénétrés dans l'organisme, ils déclenchent des cascades de toxicité cellulaire et systémique. Plusieurs effets peuvent se manifester sur les poissons :

3.1. Stress oxydant

Le stress oxydant constitue l'un des mécanismes majeurs de la toxicité aquatique. Lorsqu'ils sont exposés aux métaux lourds dissous, les poissons voient leur organisme produire en excès des **espèces réactives de l'oxygène (ROS)**. Ces molécules instables dépassent les capacités de défense antioxydante naturelles, entraînant une oxydation des lipides membranaires, des protéines et de l'ADN. Les cellules subissent alors des dommages irréversibles qui compromettent leur fonctionnement normal.

A long terme, ce déséquilibre redox provoque une cascade de dysfonctionnements métaboliques. Les tissus sensibles, tels que les branchies et le foie, deviennent les premiers affectés, ce qui réduit la capacité respiratoire et la détoxification de l'organisme. Le stress oxydant est donc à la fois un mécanisme primaire et un catalyseur des autres formes de toxicité, aggravant les effets des métaux lourds sur la physiologie des poissons.

3.2. Inhibition enzymatique et métabolique

Certains métaux lourds, comme le plomb, perturbent directement les voies métaboliques en bloquant des enzymes essentielles. L'exemple le plus connu est l'inhibition de l'**ALAD (δ-aminolévulinique déshydratase)**, enzyme clé de la biosynthèse de l'hème. Ce blocage entraîne une accumulation de précurseurs toxiques et une diminution de la production d'hémoglobine, compromettant le transport de l'oxygène dans le sang.

Au-delà de l'ALAD, d'autres enzymes métaboliques sont ciblées, ce qui perturbe la synthèse des protéines et le métabolisme énergétique. Les poissons exposés présentent alors une baisse de croissance, une diminution de la fertilité et une vulnérabilité accrue aux maladies. L'inhibition enzymatique illustre la capacité des métaux lourds à désorganiser les fonctions vitales de manière subtile mais durable.

3.3. Altération de la fonction respiratoire

Les branchies, principales interfaces respiratoires, sont directement affectées par les métaux dissous. L'exposition prolongée entraîne une **obstruction des lamelles branchiales** par dépôts métalliques ou mucus, réduisant la surface d'échange gazeux. Dans les cas extrêmes, des nécroses tissulaires apparaissent, détruisant les structures essentielles à la respiration.

Cette altération se traduit par une hypoxie chronique : les poissons peinent à extraire l'oxygène de l'eau, ce qui réduit leur endurance et leur capacité de survie. Les individus atteints deviennent plus vulnérables aux prédateurs et aux variations environnementales, fragilisant l'ensemble de la population piscicole.

3.4. Perturbation ionique et osmoregulatrice

L'enzyme **Na⁺/K⁺-ATPase branchiale** joue un rôle central dans le maintien de l'équilibre ionique et hydrique. Les métaux lourds altèrent son fonctionnement, entraînant des pertes massives de sodium et de potassium. Ce déséquilibre provoque une rupture de l'osmorégulation, essentielle à la survie des poissons en milieu aquatique.

Les conséquences sont multiples : déshydratation cellulaire, gonflement ou éclatement des tissus, et apparition de nécroses. A l'échelle de l'organisme, cette perturbation ionique compromet la régulation de la pression osmotique, rendant les poissons incapables de s'adapter aux fluctuations de leur environnement.

3.5. Lésions tissulaires et neurotoxicité

Les métaux lourds, que transportent les eaux d'exhaure, s'accumulent dans les organes vitaux tels que le foie, les reins et les branchies, provoquant des **lésions structurelles**. Ces atteintes réduisent la capacité de détoxification, d'excrétion et de respiration, entraînant une fragilisation générale de l'organisme.

Sur le plan neurologique, certains métaux comme le mercure ou le plomb perturbent la transmission synaptique et endommagent les tissus nerveux. Les poissons présentent alors des troubles du comportement : nage désorientée, diminution de la réactivité et incapacité à fuir les prédateurs. Ces effets combinés compromettent la survie individuelle et, à terme, la viabilité des populations entières.

IV. Toxicité aiguë versus toxicité chronique et les effets sublétaux chez les poissons

La distinction entre **toxicité aiguë** et **toxicité chronique** est essentielle. La toxicité aiguë se traduit par une mortalité massive et rapide, souvent consécutive à des déversements accidentels majeurs. A l'inverse, la toxicité chronique résulte d'une exposition continue à de faibles doses. Elle induit des dysfonctionnements physiologiques subtils mais persistants, qui se traduisent par une baisse progressive de la fertilité, une altération du comportement et, à terme, un effondrement des populations piscicoles.

L'intérêt d'une telle évaluation moderne de la toxicité aiguë et chronique, permet de déterminer l'ampleur des effets sublétaux. Ce n'est pas parce que les poissons ne sont pas tous morts à la surface de l'eau de manière commune que l'eau qui est en contact avec les eaux d'exhaure sont bonnes. Une mortalité massive après un déversement est spectaculaire et relativement facile à documenter. A l'inverse, **une exposition chronique peut réduire la croissance, la reproduction, l'immunité, la capacité de fuite, l'efficacité alimentaire ou la réussite de l'éclosion sans mortalité immédiate.**

Donc, **si les eaux d'exhaure n'apportent pas une toxicité aiguë capable de tuer plusieurs poissons en même temps, la toxicité chronique peut être létale de manière graduelle, et donner un semblant de bon procédé.** Au niveau de la population, ces effets peuvent se traduire par une diminution de la reproduction, un changement de structure d'âge et, finalement, une perte de l'espèce spécifique.

V. Conséquences physiques et écologiques des eaux d'exhaure sur les rivières et les écosystèmes aquatiques

L'eau d'exhaure est un agent polluant. Même lorsque les enquêtes prouvent une qualité assez acceptable pour qu'elle soit rejetée dans la nature, son déversement dans les rivières n'est pas sans conséquences sur les écosystèmes. Outre les effets chimiques des matières en suspension de l'eau d'exhaure, quelques effets physiques néfastes peuvent être cités :

5.1. L'envasement et les trois effets mortels du colmatage benthique par les sédiments fins

a. Etude de cas visuelle : Analyse de la confluence des rivières Kangelekwa (extrêmement chargée en limons argileux orange) et Musonoï (claire).

Le Professeur Bauchet a mené une étude de cas visuelle de la confluence des rivières Kangelekwa et Musonoï, qui illustre parfaitement l'impact du colmatage sédimentaire. Il a fait deux prélèvements dans des contenants transparents de 1.5 Litres. Et il apparaît directement, de manière visuelle, que la Kangelekwa, est extrêmement chargée en limons argileux orange, se mêle aux eaux claires de la Musonoï, créant un contraste saisissant. Ce phénomène traduit **l'apport massif de particules fines issues des activités minières, qui modifient la dynamique hydrologique et altèrent la qualité écologique du milieu aquatique.** L'accumulation de ces sédiments sur le fond entraîne un colmatage benthique, véritable menace pour la biodiversité.

Trois effets mortels découlent de ce processus :

i. **Obstruction euphotique via la turbidité qu'apporte les eaux d'exhaure.**

L'augmentation de la turbidité limite, ou réduit la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau. La photosynthèse des algues et du phytoplancton est bloquée, les particules fines colmatent les interstices du substrat, et réduisent la circulation de l'eau autour des œufs et simplifient l'habitat benthique entraînant une chute de la production primaire. Ce déficit énergétique se répercute sur l'ensemble de la chaîne trophique, réduisant la disponibilité de nourriture pour les invertébrés et les poissons.

A long terme, l'obstruction euphotique provoque un appauvrissement de la diversité biologique. Les écosystèmes aquatiques deviennent incapables de soutenir des populations stables, ce qui fragilise la résilience écologique des rivières.

ii. **Abrasion branchiale.**

Les particules minérales anguleuses en suspension peuvent provoquer des lacérations, irritations, abrasions mécaniques sur les filaments branchiaux des poissons. Ces micro-blessures perturbent la respiration et favorisent l'entrée de pathogènes, augmentant la vulnérabilité des individus. L'exemple Kangelekwa–Musonoï présenté dans les actes illustre visuellement cette différence de charge sédimentaire et rappelle qu'un cours d'eau peut être écologiquement dégradé même si la concentration dissoute d'un métal donné n'est pas maximale.

Avec le temps, l'abrasion chronique entraîne une hypoxie généralisée. Les poissons réduisent leur activité, deviennent plus sensibles aux prédateurs et voient leur espérance de vie diminuer.

iii. Destruction des frayères

Le colmatage benthique asphyxie les œufs déposés sur le fond, privant les embryons d'oxygène et entraînant une mortalité massive. Les micro-habitats benthiques, essentiels à la reproduction et au développement des invertébrés, sont également détruits. Cette destruction compromet la régénération des populations piscicoles et benthiques. À terme, elle provoque un effondrement des communautés aquatiques locales, réduisant la capacité de renouvellement naturel des espèces.

5.2. La disparition du groupe EPT comme indicateur de la sante des cours d'eau

Les Éphéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT) sont des insectes aquatiques particulièrement sensibles à la pollution. Leur présence ou absence constitue un indicateur biologique fiable de la qualité des cours d'eau. Une eau excellente ou bonne se caractérise par plus de huit taxons EPT, tandis qu'une eau acceptable en compte plus de cinq. En dessous de ce seuil, la qualité devient marginale (plus de deux taxons) ou pauvre (moins de deux taxons).

La disparition progressive du groupe EPT traduit une dégradation écologique sévère. Ces insectes, essentiels au fonctionnement des écosystèmes aquatiques, disparaissent dès que la charge polluante dépasse les seuils tolérables. Leur absence signale non seulement une contamination chimique, mais aussi une altération physique du milieu (turbidité, colmatage benthique). Ainsi, l'indice EPT devient un outil de diagnostic incontournable pour évaluer la santé des rivières et orienter les politiques de gestion environnementale.

5.3. Alteration de la biodiversité globale comme indicateur

La pollution minière et les effluents toxiques entraînent une réduction drastique de la richesse spécifique. Les espèces sensibles disparaissent en premier, laissant place à des organismes plus tolérants mais moins diversifiés. Ce phénomène provoque un déséquilibre majeur des réseaux trophiques : Les prédateurs perdent leurs proies, les herbivores voient leurs ressources diminuer, et la chaîne alimentaire s'effondre progressivement.

Au-delà de la simple diminution du nombre d'espèces, c'est la structure fonctionnelle des écosystèmes qui est compromise. La disparition des insectes EPT, des poissons sensibles et des invertébrés benthiques réduit la résilience écologique des cours d'eau. Les rivières polluées deviennent incapables de se régénérer naturellement, ce qui accentue la vulnérabilité des populations humaines dépendantes de ces ressources pour leur alimentation et leur subsistance.

VI. Transfert trophique, bioaccumulation, bioamplification et menaces sur la sécurité alimentaire

6.1. La bioaccumulation

La bioaccumulation désigne le processus par lequel un individu absorbe et retient progressivement des polluants métalliques dans ses tissus au cours de sa vie. Les métaux lourds, une fois introduits par ingestion ou absorption branchiale, ne sont pas efficacement éliminés par les mécanismes physiologiques. Ils s'accumulent donc de manière irréversible dans les organes tels que le foie, les reins ou les branchies.

Ce phénomène est particulièrement insidieux, car même de faibles concentrations dans l'eau ou les sédiments peuvent, à long terme, conduire à des niveaux toxiques dans l'organisme. La bioaccumulation affecte la santé individuelle : troubles métaboliques, lésions tissulaires, perturbations de la reproduction et diminution de la longévité. Elle constitue ainsi une menace silencieuse qui fragilise la survie des poissons exposés.

6.2. La biomagnification ou la bioamplification

a. Notion

La biomagnification, quant à elle, concerne le système écologique dans son ensemble. Elle se produit lorsque les polluants accumulés dans les organismes de bas niveau trophique (planctons, invertébrés, petits crustacés) sont transférés et amplifiés à chaque maillon de la chaîne alimentaire. Les prédateurs consomment des proies déjà contaminées, et les concentrations de métaux lourds augmentent de manière exponentielle à mesure que l'on monte dans la pyramide trophique.

Ce mécanisme explique pourquoi les grands poissons carnivores, situés au sommet de la chaîne, présentent souvent des niveaux de contamination bien supérieurs à ceux de leur environnement immédiat. La biomagnification transforme donc une pollution diffuse en un risque systémique, compromettant non seulement la biodiversité aquatique mais aussi la sécurité alimentaire humaine, puisque ces poissons contaminés entrent dans la consommation des populations locales.

b. Formalisation

La bioaccumulation peut être formalisée par un facteur de bioconcentration $BCF = C_{\text{Organisme}} / C_{\text{eau}}$ pour une exposition principalement aqueuse, ou un facteur de bioaccumulation BAF lorsque toutes les voies sont incluses. La biomagnification trophique se mesure plus rigoureusement par un facteur TMF estimé à partir de la pente entre $\log(\text{concentration})$ et position trophique. Le présent rapport utilise le terme biomagnification pour une chaîne **sédiment–eau–zooplancton–Tilapia–Clarias**. Scientifiquement, l'augmentation entre niveaux biotiques est suggestive, mais un TMF robuste requerrait des réplicats, des isotopes stables trophiques et une analyse statistique multi-espèces.

$$BCF = C_{\text{Organisme}} / C_{\text{eau}} ; BAF = C_{\text{Organisme}} / C_{\text{milieu}} (\text{toutes voies})$$

Équation 6. Indicateurs simplifiés de bioaccumulation.

$$\ln(C_{\text{biote}}) = \alpha + \beta \cdot TL ; TMF = e^{\beta}$$

Équation 7. Estimation conceptuelle d'un facteur de magnification trophique à partir du niveau trophique TL .

Scientifiquement, l'augmentation entre niveaux biotiques est suggestive, mais un TMF robuste requerrait des réplicats, des isotopes stables trophiques et une analyse statistique multi-espèces.

VII. Cartographie du gradient de pollution : Le bassin de la rivière

Lufira

7.1. Suivi des teneurs en cuivre (Cu) de Likasi jusqu'au Lac Tshangalele 3:

Le gradient de cuivre présenté pour le bassin de la Lufira est l'un des ensembles de données les plus démonstratifs des actes : 0,3 mg/L à Panda amont, 70,9 mg/L dans le secteur Likasi/Buluo, 28,2 mg/L à Panda aval, 0,5 mg/L dans la Lufira, 0,09 mg/L à Kapolowe et 0,005 mg/L à la sortie du lac Tshangalele. L'augmentation brutale entre Panda amont et Likasi/Buluo localise un apport

majeur ou un ensemble d'apports. La décroissance aval de plusieurs ordres de grandeur suggère dilution, précipitation et sorption, mais elle ne prouve pas que la masse métallique a quitté l'écosystème : une fraction peut avoir été transférée vers les sédiments.

7.2. Le réseau trophique toxique du Lac Tshangalele (Kapolowe Mission)

Les valeurs de la chaîne trophique rapportée sont spectaculaires. Pour le cuivre : sédiment 9830 ppm, eau 0,09 ppm, zooplancton 13,5 ppm, *Oreochromis macrochir* 28,5 ppm et *Clarias gariepinus* 136 ppm. Pour le cobalt : sédiment 1000,4 ppm, eau 0,108 ppm, zooplancton 13,1 ppm, *Tilapia* 36,6 ppm et *Clarias* 64,7 ppm. Le contraste eau-biote montre qu'une faible concentration aqueuse instantanée peut coexister avec une exposition intégrée élevée. Les organismes intègrent l'exposition dans le temps, et les poissons benthivores ou prédateurs peuvent être exposés par l'alimentation en plus de la voie branchiale.

7.3. Modélisation de la bioamplification du Cuivre (Cu)

Le cuivre se concentre massivement dans les **sédiments** (9830 ppm), qui constituent le principal réservoir de contamination. L'**eau** en contient relativement peu (0,09 ppm), mais cette faible concentration suffit à contaminer le **zooplancton** (13,5 ppm). En consommant ce zooplancton, le **tilapia (*Oreochromis macrochir*)** accumule 28,5 ppm de cuivre dans ses tissus. Enfin, au sommet de la chaîne, le **silure (*Clarias gariepinus*)** présente une concentration de 136 ppm, soit une amplification exponentielle par rapport à l'eau initiale. Ce schéma illustre parfaitement la **bioamplification trophique**, où chaque niveau de la chaîne alimentaire concentre davantage le polluant.

7.4. Modélisation de la bioamplification du Cobalt (Co)

Le cobalt suit une dynamique similaire. Les **sédiments** affichent une concentration de 1000,4 ppm, tandis que l'**eau** n'en contient que 0,108 ppm. Le **zooplancton** en accumule 13,1 ppm, servant de vecteur de contamination pour le **tilapia**, qui atteint 36,6 ppm. Le **silure**, prédateur supérieur, concentre 64,7 ppm de cobalt. Bien que les valeurs soient moins élevées que pour le cuivre, la logique reste identique : une amplification progressive des concentrations à chaque maillon trophique, transformant une pollution diffuse en un risque systémique pour l'écosystème et la sécurité alimentaire humaine.

Compartiment	<u>Cuivre (Cu)</u>	<u>Cobalt (Co)</u>
Sédiment	9830 ppm	1000,4 ppm
Eau	0,09 ppm	0,108 ppm
Zooplancton	13,5 ppm	13,1 ppm
Tilapia (Oreochromis macrochir)	28,5 ppm	36,6 ppm
Silure (Clarias gariepinus)	136 ppm	64,7 ppm

Le lac Tshangalele illustre un réseau trophique toxique, où les métaux lourds circulent et s'amplifient de manière invisible mais implacable. Les poissons, en particulier les espèces consommées par les populations locales, deviennent des vecteurs de contamination chronique. Cette situation met en lumière l'importance de surveiller non seulement la qualité de l'eau, mais aussi les organismes vivants qui en constituent la chaîne alimentaire, car ce sont eux qui révèlent la véritable ampleur de la pollution.

La littérature indépendante renforce ce signal. Squadrone et al. (2016) ont analysé quatorze éléments dans des poissons du Lac Tshangalele et rapporté les concentrations médianes les plus élevées près de la zone minière, avec notamment Co 7,25 mg/kg et Cu 88,1 mg/kg en poids sec, ainsi que des maximas atteignant 15,1 mg/kg pour Co et 173,1 mg/kg pour Cu. Les concentrations diminuaient globalement vers le barrage. Ces résultats ne sont pas identiques aux chiffres du rapport (matrices, espèces et campagnes peuvent différer), mais convergent vers l'existence d'une exposition halieutique significative.

7.5. Impacts sur la santé des poissons et indicateurs DELT

a. Organotropisme des ETMs

Les Eléments Traces Métalliques (ETMs) présentent un **organotropisme** marqué, c'est-à-dire une affinité particulière pour certains organes. Le plomb, l'uranium et le mercure se concentrent préférentiellement dans les branchies, compromettant directement la fonction respiratoire. Le

cadmium, le cuivre et le zinc s'accumulent dans le foie, organe central de la détoxification et du métabolisme, entraînant des lésions hépatiques et une perturbation des fonctions enzymatiques. Enfin, les muscles, qui constituent la partie consommée par l'homme, présentent également une accumulation significative, transformant la contamination aquatique en un risque sanitaire direct pour les populations riveraines.

Les actes décrivent un organotropisme : Pb, U et Hg plus élevés dans les branchies ; Cd, Cu et Zn dans le foie ; présence significative dans les muscles. Cette distribution est biologiquement plausible. Les branchies reflètent l'exposition aqueuse et l'adsorption superficielle ; le foie joue un rôle de détoxification et de stockage via la métallothionéine ; le rein participe à l'excrétion et à l'accumulation de certains métaux. Pour la sécurité alimentaire, le muscle est la matrice prioritaire parce qu'il correspond à la portion consommée. Mais, l'ingestion de poisson entier ou d'abats dans certaines pratiques alimentaires, peut modifier le profil d'exposition distribution sélective des métaux dans les organes. Il permet de comprendre les mécanismes physiopathologiques de la toxicité. Les branchies révèlent une exposition par voie respiratoire, le foie traduit une contamination alimentaire, et les muscles témoignent du danger pour la chaîne alimentaire humaine. L'organotropisme devient ainsi un indicateur biologique essentiel pour diagnostiquer la nature et l'origine de la pollution.

b. Indicateurs DELT

Les indicateurs DELT (Déformations, Érosions, Lésions, Tumeurs) constituent des marqueurs visibles de la toxicité chronique. Dans les zones polluées, les poissons présentent une prévalence élevée de déformations squelettiques, notamment des courbures de la colonne vertébrale. L'érosion des nageoires est fréquente, traduisant une fragilisation tissulaire due à l'exposition prolongée aux métaux lourds. Les lésions cutanées, souvent infectées, témoignent d'une immunodépression, tandis que les tumeurs apparaissent comme des manifestations ultimes de la cancérogénicité des polluants.

Les indicateurs DELT — Déformations, Érosion des nageoires, Lésions, Tumeurs — constituent des marqueurs intégrateurs mais non spécifiques. Une prévalence élevée signale un stress environnemental, sans identifier automatiquement le contaminant. Leur interprétation doit inclure les parasites, agents infectieux, blessures mécaniques, nutrition et qualité d'habitat. La relation poids-taille $W = aL^b$ fournit un indicateur complémentaire : le coefficient b décrit le type de croissance et le facteur de condition, souvent dérivé de W/L^b , permet de comparer l'état corporel

à taille donnée. La présente conférence rapporte une baisse de condition à Tshangalele par rapport au Lac Kipopo, ce qui est cohérent avec un coût énergétique chronique mais exige un contrôle de l'âge, sexe, saison et reproduction.

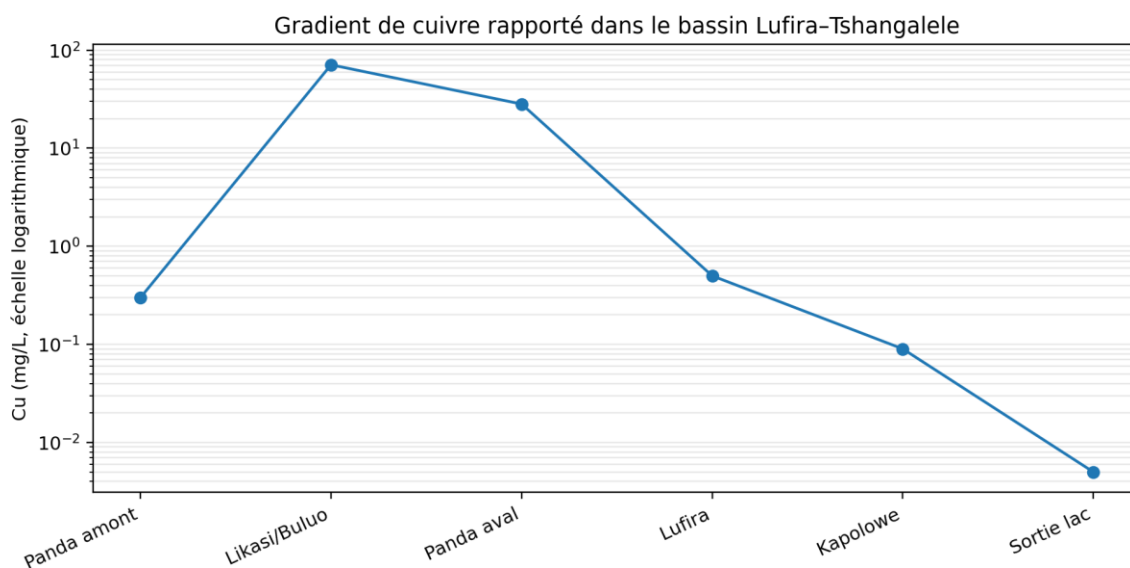


Figure 1. Gradient de Cu repris du rapport IRDH. L'échelle logarithmique met en évidence l'amplitude entre le maximum de Likasi/Buluo et la sortie du lac.

Compartiment organisme	/ Cu (ppm)	Co (ppm)	Lecture écotoxicologique
Sédiment	9830	1000,4	Réservoir géochimique; forte concentration totale
Eau	0,09	0,108	Exposition dissoute instantanée relativement faible à Kapolowe
Zooplancton	13,5	13,1	Accumulation à la base de la chaîne trophique

Compartiment organisme	/ Cu (ppm)	Co (ppm)	Lecture écotoxicologique
Tilapia – <i>O. macrochir</i>	28,5	36,6	Poisson consommé; exposition aqueuse + alimentaire
Silure – <i>C. gariepinus</i>	136	64,7	Niveau élevé; importance du régime et de l'habitat

Ces indicateurs, facilement observables sur le terrain, offrent un outil pratique de biomonitoring. Ils permettent de relier directement la pollution minière aux effets biologiques visibles, sans recourir systématiquement à des analyses chimiques coûteuses. Les DELT traduisent ainsi la souffrance écologique des milieux aquatiques et la dégradation progressive de la santé piscicole.

7.6. Retard de croissance

La pollution métallique entraîne un retard de croissance mesurable par la relation taille-masse des poissons. L'équation allométrique $Poids = a \cdot Taille^b$ révèle une diminution significative du coefficient de condition physique chez les poissons du lac Tshangalele par rapport à ceux du lac Kipopo, utilisé comme témoin sain. Cette baisse traduit une incapacité des individus contaminés à convertir efficacement l'énergie en croissance corporelle.

Ce retard de croissance a des conséquences écologiques et économiques majeures. Les poissons deviennent plus petits, moins résistants et moins reproductifs, ce qui fragilise la dynamique des populations. Pour les communautés locales, cela signifie une diminution de la productivité halieutique et une perte de valeur nutritive, aggravant l'insécurité alimentaire.

VIII. Risques pour la population humaine

8.1. Limites maximales de consommation (Minimal Risk Level = MRL)

Les études toxicologiques ont permis de définir des seuils de consommation sécuritaires pour un adulte de 70 kg exposé aux poissons contaminés par les métaux lourds. Pour les **silures (Clarias gariepinus)**, la limite maximale est fixée à 20 g/jour, tandis que pour les **tilapias (Oreochromis**

macrochir), elle est légèrement plus élevée, à 30 g/jour. Ces valeurs traduisent la nécessité de limiter drastiquement l'ingestion de chair de poissons provenant de milieux pollués, afin de réduire le risque d'accumulation chronique de plomb, cadmium, cuivre, cobalt et mercure dans l'organisme humain.²

Ces seuils, bien qu'indicatifs, révèlent une réalité préoccupante. La consommation régulière de poissons issus des zones minières contaminées expose les populations locales à des doses supérieures aux niveaux de sécurité. Les MRL deviennent ainsi un outil de prévention sanitaire, mais aussi un indicateur de la gravité de la pollution aquatique, car ils montrent que même de faibles quantités de chair de poisson peuvent représenter un danger pour la santé humaine.

8.2. Effets sur la reproduction humaine

Les corrélations cliniques établies par Mukendi et al. (2018) démontrent que l'exposition chronique aux métaux lourds miniers affecte directement la fertilité humaine. Chez la femme, on observe une baisse significative de l'**Hormone Anti-Mullérienne (AMH)**, indicateur de la réserve ovarienne, ce qui compromet la capacité reproductive. Chez l'homme, les paramètres du sperme sont sévèrement altérés : Diminution du pH, baisse de la numération et de la mobilité des spermatozoïdes. Ces perturbations convergent vers une réduction globale de la fertilité, traduisant l'impact systémique des métaux lourds sur la santé reproductive.

Ces effets ne se limitent pas à des anomalies biologiques isolées, mais s'inscrivent dans une dynamique de santé publique. La contamination alimentaire par les poissons pollués devient un vecteur invisible de déclin démographique et de fragilisation des communautés. La pollution minière, en affectant la reproduction humaine, dépasse le cadre environnemental pour devenir un enjeu social et sanitaire majeur, nécessitant une régulation stricte et une sensibilisation accrue des populations riveraines.

² NOTE SCIENTIFIQUE — Dans les actes, les valeurs « 20 g/j » et « 30 g/j » sont présentées comme MRL. Au sens ATSDR, un **Minimal Risk Level** est une dose journalière exprimée en mg/kg/j. Le rapport conserve les valeurs comme limites de consommation rapportées, mais recommande de documenter leur dérivation avant communication sanitaire

IX. Mesures de gestion, solutions de réhabilitation et de transition

9.1. Traitement actif

Le traitement actif repose sur des procédés industriels visant à neutraliser directement les effluents toxiques. La neutralisation chimique permet de corriger l'acidité des rejets miniers, notamment par l'ajout de chaux ou de bases fortes, tandis que la précipitation métallique favorise la transformation des métaux dissous en composés insolubles, plus faciles à extraire. Ces procédés sont souvent couplés à des systèmes de filtration mécanique ou membranaire, qui retiennent les particules fines et réduisent la charge polluante.

Ce type de traitement exige un contrôle continu des rejets, avec des capteurs et des analyses régulières pour ajuster les dosages chimiques et garantir la conformité aux normes environnementales. Bien qu'efficace, il reste coûteux et énergivore, ce qui limite son application dans les zones minières artisanales ou à faible encadrement technique.

9.2. Traitement passif

Le traitement passif privilégie des solutions écologiques et durables. La création de zones humides artificielles ou de marais filtrants permet de piéger naturellement les métaux lourds grâce aux sédiments et aux plantes aquatiques. Les drains calcaires, intégrés dans ces systèmes, remontent le pH de l'eau en neutralisant l'acidité, ce qui favorise la précipitation des métaux et réduit leur mobilité.

Ce procédé présente l'avantage d'être peu coûteux et de s'intégrer harmonieusement dans le paysage. Il favorise également la biodiversité locale en recréant des habitats aquatiques. Toutefois, son efficacité dépend fortement des conditions hydrologiques et de la durée de contact entre l'eau polluée et les substrats filtrants.

9.3. Phytoremédiation et biosorption

La phytoremédiation utilise des plantes tolérantes capables d'accumuler ou de stabiliser les métaux lourds dans leurs tissus. Certaines espèces hyperaccumulatrices, comme les jacinthes d'eau ou certaines graminées, absorbent les contaminants et réduisent leur concentration dans le sol ou l'eau. La biosorption, quant à elle, repose sur l'action de micro-organismes (bactéries, champignons) qui fixent les métaux sur leurs parois cellulaires.

Ces techniques biologiques sont particulièrement adaptées aux zones à faible intensité industrielle, car elles nécessitent peu d'infrastructures. Elles offrent une solution durable et respectueuse de l'environnement, mais leur efficacité est progressive et dépend de la capacité des espèces utilisées à survivre dans des milieux fortement contaminés.

9.4. Confinement des résidus

Le confinement des résidus miniers consiste à isoler les déchets dans des zones de stockage sécurisées. La pose de géomembranes étanches empêche l'infiltration des eaux de pluie et limite la lixiviation des métaux vers les nappes phréatiques. Une couverture végétale est ensuite installée pour stabiliser les sols et réduire l'érosion.

Ce procédé est essentiel pour prévenir la dispersion des contaminants dans l'environnement. Il permet de transformer des terrils instables en sites contrôlés, réduisant ainsi les risques de pollution chronique. Toutefois, il nécessite une surveillance permanente pour éviter les ruptures de confinement et les infiltrations accidentelles.

9.5. Réhabilitation physique des sites

La réhabilitation physique vise à restaurer la stabilité géotechnique des sites miniers. Elle implique le remodelage topographique des carrières et des terrils, afin de réduire les risques d'éboulement et de favoriser la recolonisation végétale. Les pentes sont adoucies, les sols reconstitués et parfois amendés pour améliorer leur fertilité.

Ce processus contribue à la réintégration des sites miniers dans leur environnement naturel et social. Il permet de transformer des paysages dégradés en espaces utilisables, réduisant l'impact visuel et écologique des exploitations passées. La réhabilitation physique est souvent couplée à des programmes de reboisement et de restauration écologique.

9.6. Economie circulaire minière

L'économie circulaire minière consiste à retraiter les anciens rejets (terrils) pour récupérer les métaux résiduels valorisables. Ce procédé permet non seulement de réduire les volumes de stockage historiques, mais aussi de générer une valeur économique à partir de déchets considérés comme perdus. Les technologies modernes de lixiviation et de flottation facilitent cette récupération.

En parallèle, cette approche contribue à l'assainissement des sites pollués, en diminuant la charge métallique des terrils et en réduisant les risques de lixiviation. Elle illustre une logique de durabilité, où la dépollution et la valorisation économique se rejoignent pour transformer un passif environnemental en opportunité industrielle.

X. Conclusion

L'exposé du professeur Bauchet Katemo conclut par une remarque sur le risque certain de disparition progressive des espèces aquatiques sensibles. Il a rappelé que pour ce motif, le Code minier congolais appelle les entreprises minières à évaluer la diversité des macroinvertébrés, notamment le groupe EPT (Éphéméroptères, Plécoptères et Trichoptères), particulièrement vulnérable et souvent le premier à disparaître. Avant même d'évoquer les populations piscicoles, le professeur a rappelé que le déversement des eaux d'exhaure dans les rivières provoque une turbination. Cela remet en suspension les sédiments fins toxiques qui s'étaient déposés au fond (phénomène lié au colmatage benthique), dispersant à nouveau les Éléments Traces Métalliques (ETM) en aval. Par ailleurs, ces éléments en suspension se déposent, sous forme de boue, sur les œufs, empêchant ainsi leur développement et compromettant la respiration des poissons.

Cet exposé a relevé la distinction entre la bioaccumulation et la bioamplification (biomagnification). La bioaccumulation touche un individu qui, par consommation récurrente de particules, se trouve saturé de substances toxiques. La bioamplification, quant à elle, entraîne une augmentation de concentrations le long de la chaîne alimentaire, pouvant atteindre des niveaux élevés chez les prédateurs supérieurs. Le professeur a mis en garde contre le piège méthodologique consistant à rechercher la pollution uniquement dans les eaux de surface, alors que les sédiments logés au fond des rivières constituent souvent le principal réservoir de contamination.

Le professeur Bauchet a également attiré l'attention sur l'analyse des différents organes des poissons. Les muscles ne révèlent pas toujours de fortes doses, tandis que les branchies et le foie concentrent davantage de métaux lourds. La comparaison des valeurs entre ces organes permet de déterminer si la contamination a été par la voie buccale, par la consommation de microorganismes ou par la voie respiratoire (le poisson respire par les branchies). Enfin, le professeur a mentionné l'usage du DELT comme outil d'évaluation, permettant de vérifier si les poissons sont effectivement pollués par les eaux d'exhaure. Cette intervention a mis en évidence

la complexité des mécanismes écotoxicologiques et la nécessité d'approches scientifiques rigoureuses pour protéger la biodiversité aquatique et garantir la sécurité de la chaîne alimentaire.

THEMATIQUE 3. RISQUES DE CONTAMINATION DE LA **CHAINE ALIMENTAIRE DANS LE HAUT-KATANGA ET** **PERSPECTIVES DE REMEDIATION**

Par le **Professeur Michel Mpundu Mubemba Mulambi**, Ingénieur, Docteur, spécialiste en gestion des ressources naturelles (option Sol et Eau), en écologie et en restauration des paysages, et Doyen de la Faculté des Sciences Agronomiques et de l'Environnement de l'UNILU.



I. Introduction

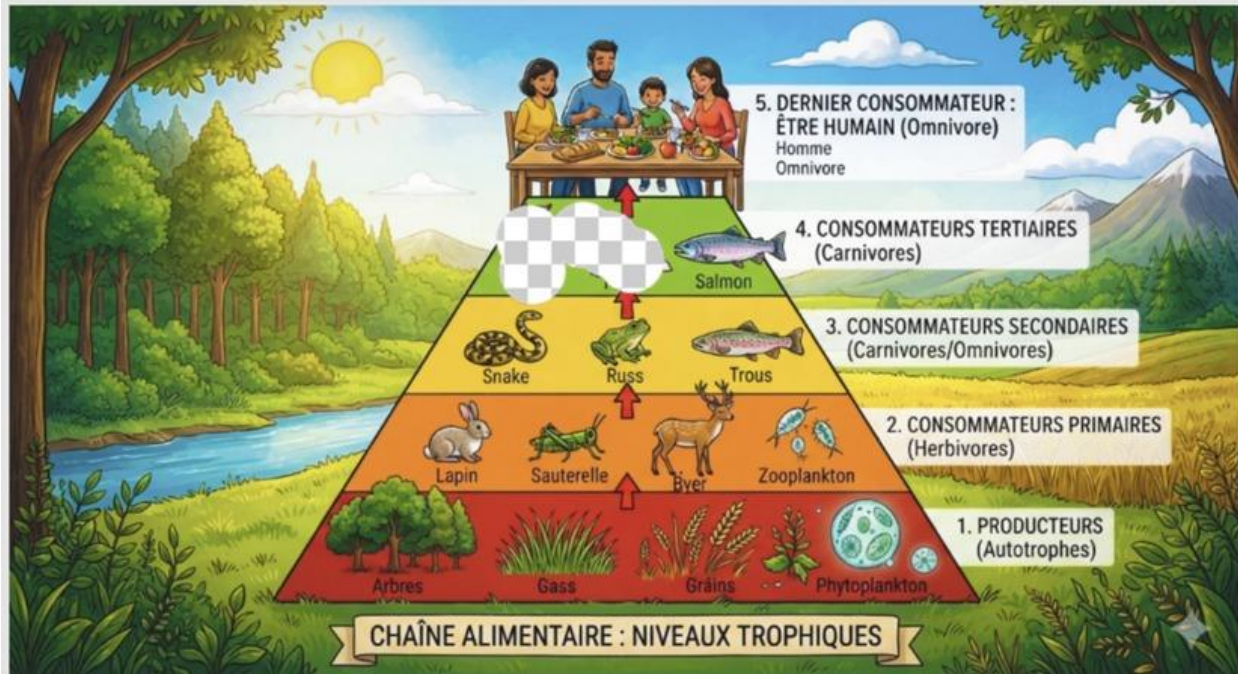
Le Doyen de la Faculté des sciences agronomiques et de l'environnement a abordé la problématique de la durabilité agricole dans le Haut-Katanga, particulièrement, les **effets de la dégradation et de la contamination des sols sur l'agriculture**. Son intervention s'est inscrite dans une perspective scientifique et pratique, en mettant en évidence trois défis majeurs : (i) La mauvaise gestion des déchets urbains, des plastiques et des fosses septiques ; (ii) la déforestation de la forêt claire de miombo, au bénéfice de la fabrication du charbon et

d'exploitation minière et (iii) la pollution accrue des cours d'eau avec des effluents miniers. Ces trois défis entraînent des conséquences directes sur la productivité agricole, la sécurité alimentaire et la santé publique.

1.1. Déchets urbains et emballages en plastique

La mauvaise gestion des déchets urbains, la prolifération des plastiques et le débordement des fosses septiques constituent une crise environnementale et sanitaire majeure dans les centres urbains de la province du Haut-Katanga. Ce phénomène engendre aussi une contamination invisible mais profonde des sols et des ressources en eau.





Le taux de collecte des déchets ménagers reste très faible, en raison du manque d'infrastructures publiques (décharges contrôlées et centres de tri) et d'un service de voirie insuffisant. Faute d'alternatives, les habitants jettent leurs ordures dans des ravins, des cours d'eau ou sur des terrains vagues. Ces accumulations forment des décharges à ciel ouvert.

Les bouteilles et les sacs plastiques à usage unique (souvent appelés sachets) mettent des siècles à se dégrader. Sous l'effet des rayons du soleil et du piétinement, ils se fragmentent en microplastiques. Ces particules s'infiltrent dans les pores du sol, modifient sa structure physique, nuisent à la biodiversité souterraine (comme les vers de terre) et bloquent l'infiltration naturelle des eaux de pluie, aggravant ainsi les inondations urbaines.

Lors de la saison des pluies, l'eau traverse ces amas de déchets urbains et se charge de polluants organiques, de métaux lourds provenant des piles, des appareils électroniques jetés et des produits chimiques domestiques. Ce liquide hautement toxique s'infiltre directement dans le sol, contaminant les terres arables urbaines et les nappes phréatiques sous-jacentes.

1.2. Des fosses septiques

L'absence de réseaux d'égouts collectifs et de stations d'épuration municipales oblige la quasi-totalité de parcelles urbaines à recourir à un assainissement autonome. Les résidents urbains utilisent généralement des fosses septiques et des simples latrines à fond perdu. Beaucoup de ces fosses septiques sont mal maçonnées ou fissurées. De plus, de nombreux ménages construisent volontairement des « puits perdus », pour évacuer les eaux vannes directement dans le sous-sol et éviter d'avoir à payer des services de vidange coûteux.

Ce déversement continu charge le sol en agents pathogènes (bactéries, virus, parasites). La capacité de filtration naturelle du sol est rapidement saturée, transformant le sous-sol urbain en un réservoir de maladies hydriques (choléra, typhoïde). Les matières fécales libèrent de grandes quantités d'azote qui se transforment en nitrates. Les nitrates migrent très facilement à travers le sol vers la nappe phréatique.

1.3. Conséquences immédiates

La contamination du sol par les déchets et les fosses septiques crée un cercle vicieux dramatique. A Lubumbashi comme ailleurs, une grande partie de la population s'approvisionne en eau via des puits artisanaux creusés à faible profondeur dans la même parcelle où se trouve la fosse septique. La proximité entre la source de pollution (fosse) et la source d'eau potable (puits) entraîne une contamination croisée immédiate.

Au-delà de l'impact sanitaire, la mauvaise gestion des déchets compromet également l'activité agricole. Les sols pollués par les plastiques et les produits chimiques perdent leur fertilité et deviennent impropres à la culture. La proximité des décharges avec les zones de maraîchage urbain accentue la vulnérabilité alimentaire des communautés locales, révélant l'urgence d'une politique de gestion intégrée des déchets.

Les potagers urbains (comme ceux cultivés le long des rivières urbaines) absorbent les polluants présents dans le sol et les eaux usées utilisées pour l'arrosage. Les légumes (amaranthes, feuilles de manioc) accumulent ces contaminants, qui finissent directement dans les assiettes des consommateurs.

1.4. La déforestation de la forêt de Miombo

La forêt claire de miombo, souvent appelée simplement « Le miombo », constitue l'écosystème emblématique et prédominant de la province du Haut-Katanga. Elle joue un rôle écologique fondamental en garantissant la biodiversité, la régulation hydrique et la stabilité des sols. Elle est le véritable poumon vert de la région, avec une formation végétale qui joue un rôle écologique, social et économique crucial. Le miombo abrite des nombreuses espèces endémiques de la faune et la flore sauvages.

Cependant, ce biome est aujourd'hui menacé par une pression anthropique sans précédent liée à l'activité minière et urbaine. Sa destruction menace les écosystèmes favorables aux grands mammifères (éléphants, antilopes comme le sable ou le rouan, lions, léopards).

La forte densité des gisements de cuivre et de cobalt dans le Haut-Katanga entraîne le décapage de milliers d'hectares de miombo pour ouvrir des mines à ciel ouvert, installer des haldes et construire des usines hydrométallurgiques. Par ailleurs, l'érosion des sols marque la perte de la structure superficielle des terres. Le ruissellement pluvial agressif, combiné à l'absence de couvert végétal, entraîne un lessivage rapide des sols et la formation de ravines spectaculaires. Ces processus défigurent les paysages et compromettent la stabilité des écosystèmes.

La croissance démographique explosive de villes comme Lubumbashi crée une demande insoutenable en charbon de bois, poussant à une coupe rase de la forêt, combinée à l'agriculture sur brûlis. Cette crise énergétique illustre le dilemme entre besoins vitaux des communautés et préservation des écosystèmes.

La dégradation du miombo est au cœur de la problématique de la justice environnementale. Sa destruction prive les communautés rurales de leurs ressources de subsistance traditionnelles, en l'occurrence, du miel, des chenilles, des champignons, des fruits et des plantes médicinales indispensables à la pharmacopée traditionnelle, sans compensation adéquate. En revanche, cette situation aggrave le réchauffement microclimatique local et l'érosion des sols autour des sites miniers.

II. Risques de contamination de la chaîne alimentaire par des effluents miniers et des eaux d'exhaure

2.1. L'Irrigation maraîchère par des eaux d'exhaure : Un vecteur insidieux des éléments traces métalliques

- *La double réalité des eaux d'exhaure.*

Les eaux d'exhaure rejetées en grande quantité dans les rivières du Haut-Katanga, sont soumises aux critères de conformité du Règlement minier. Cependant, elles ne répondent pas aux exigences de potabilité définies par l'OMS ni aux standards de sécurité agricole à long terme de FAO. Cette ambivalence crée une zone grise où la conformité dite réglementaire expose les communautés locales à l'insécurité sanitaire et alimentaire.

- *La contamination par contact direct.*

L'arrosage direct des cultures maraîchères avec les eaux d'exhaure brutes entraîne une charge progressive des sols en Éléments Traces Métalliques (ETM) et en sédiments riches en sulfates. Ce phénomène favorise la bioaccumulation des contaminants dans les légumes et tubercules, qui deviennent des vecteurs invisibles de pollution pour les consommateurs.

2.2. Analyse quantitative de la pollution des terres arables et potagères

Le Professeur Michel Mpundu a exposé les résultats d'analyses menées dans deux zones stratégiques : **Kolwezi** et **Lubumbashi**. Les données révèlent des dépassements massifs des seuils de sécurité fixés par l'OMS, traduisant une pollution industrielle préoccupante.

- *Données de la zone de Kolwezi*

Élément	Concentration mesurée	Seuil OMS	Dépassement relatif
Cuivre (Cu)	3373,8 mg/kg	100 mg/kg	×33,7
Cobalt (Co)	61,0 mg/kg	10 mg/kg	×6,1
Cadmium (Cd)	10,0 mg/kg	2 mg/kg	×5,0

Interprétation :

Les sols de Kolwezi présentent une **contamination extrême en cuivre**, dépassant plus de trente fois la norme internationale. Le cobalt et le cadmium affichent également des niveaux critiques, révélant une **pollution systémique** liée aux rejets miniers. Ces concentrations exposent les populations locales à des risques sanitaires graves : toxicité rénale et hépatique, perturbations neurologiques, et effets cancérogènes du cadmium.

- *Données de Lubumbashi.*

Élément	Concentration mesurée	Seuil OMS	Dépassement relatif
Cuivre (Cu)	142 mg/kg	40 mg/kg	×3,5
Cobalt (Co)	321,1 mg/kg	100 mg/kg	×3,2

Interprétation :

Les jardins potagers de Lubumbashi, irrigués par les cours d'eau recevant les effluents d'exhaure, présentent des concentrations critiques en cobalt et en cuivre. La contamination est directement transférée aux cultures vivrières, créant un risque alimentaire immédiat. Les légumes et tubercules produits deviennent des vecteurs invisibles de pollution, favorisant la bioaccumulation des métaux lourds dans la chaîne alimentaire.

2.3. Analyse globale du rapport

Le Professeur Michel Mpundu a mis en évidence une **double vulnérabilité** : A Kolwezi, la pollution est d'origine industrielle massive, affectant directement les sols. A Lubumbashi, la contamination est transmise aux cultures vivrières, compromettant la sécurité alimentaire et la santé publique.

III. Transfert trophique et risques pour la santé humaine

Le professeur a insisté sur le fait que la contamination des sols ne se limite pas à une altération physique. Elle entraîne une **perturbation des cycles biologiques** et une **réduction de la biodiversité du sol**. Les micro-organismes, essentiels à la régénération de la fertilité, voient leur activité compromise.

Sur le plan agronomique, la présence de métaux lourds réduit la disponibilité des nutriments essentiels (azote, phosphore, potassium), ce qui affecte la croissance des plantes et diminue les rendements agricoles. Les cultures maraîchères, très répandues dans la région, deviennent des vecteurs de transmission de substances toxiques vers la chaîne alimentaire.

L'intervention a mis en lumière la **dimension sanitaire** de la contamination des sols. Les populations consomment des produits agricoles contaminés, ce qui entraîne des risques de maladies chroniques (atteintes rénales, hépatiques, neurologiques). Les enfants et les femmes enceintes sont particulièrement vulnérables.

Sur le plan social, cette situation accentue les inégalités : les communautés rurales, dépendantes de l'agriculture vivrière, sont les plus exposées. La contamination des sols devient ainsi une question de **justice environnementale et sociale**, car elle affecte directement les droits fondamentaux des populations à une alimentation saine et à un environnement équilibré.

IV. Techniques agricoles de remédiation : Purifier l'eau et isoler le sol

Le Professeur Michel Mpundu a proposé un ensemble de **techniques agricoles de remédiation** visant à réduire la contamination des sols et des cultures par les eaux d'exhaure. Ces solutions s'inscrivent dans une logique scientifique et pragmatique, combinant des approches biologiques,

chimiques et technologiques. Le processus repose sur les capacités biologiques naturelles des plantes, à travers trois mécanismes principaux ci-dessous.

4.1. La phytofiltration

La phytofiltration est une technique de biorestauration (ou phytotechnologie) qui consiste à utiliser des plantes vivantes (aquatiques ou semi-aquatiques) pour purifier l'eau contaminée. Elle permet d'extraire, absorber et concentrer les polluants, notamment les métaux lourds, dans leurs racines et leurs parties aériennes. C'est une variante de la phytoremédiation (la dépollution par les plantes). Cette technique suscite un immense intérêt scientifique pour décontaminer les eaux usées et les effluents des unités hydrométallurgiques, avant qu'ils ne se déversent dans le réseau hydrographique.

Le processus de traitement des eaux d'exhaure avant leur utilisation agricole est simple :

1. Installer des bassins de traitement ;
2. Utiliser des plantes aquatiques macrophytes ;
3. Extraire les métaux lourds des plans d'eau ;
4. Empêcher la contamination des champs agricoles.

Pour que la phytofiltration fonctionne, il faut des plantes dites hyperaccumulatrices ou hautement tolérantes aux métaux. Dans le Haut-Katanga, la nature offre une opportunité unique. La flore est cupricole, les plantes poussent naturellement sur les sols riches en cuivre et cobalt. L'Université de Lubumbashi (UNILU) étudie ces espèces locales pour concevoir des stations d'épuration naturelles.

La jacinthe d'eau ou la laitue d'eau sont de formidables filtres à métaux lourds. Mais elles peuvent devenir envahissantes. Des roseaux et des graminées locales sont testés pour être plantés dans des marécages artificiels (ou zones humides construites) à la sortie des usines minières.

4.2. La rhizofiltration

Le mot vient du grec *rhiza* (racine) et du latin *filtrare* (filtrer). La rhizofiltration est le mécanisme biologique précis qui permet à la phytofiltration de fonctionner. Si la phytofiltration désigne l'action globale de purifier l'eau par les plantes, la rhizofiltration qualifie spécifiquement le travail effectué au niveau de la rhizosphère (la zone d'influence directe des racines).

Dans les provinces minières du Haut-Katanga et du Lualaba, c'est le mécanisme le plus étudié pour traiter les eaux contaminées par le cuivre, le cobalt et d'autres métaux lourds. Le processus se déroule en trois étapes physiques et chimiques à la surface et à l'intérieur des racines :

- L'adsorption (La capture) : Les métaux lourds dissous dans l'eau (chargés positivement) se lient chimiquement aux parois des racines (chargées négativement). Les polluants se retrouvent « collés » à la surface externe des racines.
- L'absorption : La plante boit l'eau et, par le biais de transporteurs cellulaires, fait pénétrer une partie des contaminants à l'intérieur de ses propres cellules racinaires.
- L'accumulation (Le stockage) : La plante séquestre les toxines dans les vacuoles de ses cellules racinaires ou les précipite sous des formes chimiques non toxiques pour elle-même. Les polluants sont ainsi immobilisés et retirés de la colonne d'eau libre.

Contrairement à d'autres techniques où l'on attend que le polluant monte dans les feuilles (phytoextraction), la rhizofiltration cible uniquement les racines. Lorsque le système racinaire est saturé en métaux lourds, les plantes sont retirées du bassin de traitement, séchées et incinérées de manière sécurisée.

Cette technique idéale pour les effluents miniers est parfaitement adaptée aux grands volumes d'eau faiblement ou moyennement contaminés (comme les eaux de drainage ou les effluents de concentrateurs industriels avant rejet). L'incinération des racines saturées permet de concentrer les métaux dans les cendres, facilitant leur recyclage ou leur stockage sécurisé, ce qui évite la création de gigantesques volumes de boues toxiques.

4.3. La phytostabilisation

La phytostabilisation est un autre mécanisme de la phytoremédiation. Alors que la rhizofiltration est utilisée pour purifier l'eau, la phytostabilisation est principalement employée pour traiter et sécuriser les sols contaminés.

Dans le contexte minier du Haut-Katanga et du Lualaba, cette technique peut permettre à gérer l'impact environnemental des haldes (accumulations de stériles miniers), des bassins de résidus séchés et des anciens sites métallurgiques qui jonchent la région.

Le but de la phytostabilisation n'est pas de faire disparaître les polluants ou de nettoyer le sol à 100 %, mais de bloquer le déplacement des métaux lourds (cuivre, cobalt, plomb, arsenic) pour

les empêcher de contaminer l'environnement périphérique. La plante agit comme une « ancre » et un « bouclier » grâce à deux actions majeures :

- L'immobilisation chimique (dans la rhizosphère) : Les racines des plantes sécrètent des substances organiques (exsudats racinaires) qui modifient l'acidité (le pH) ou la composition chimique du sol environnant. Cette réaction transforme les métaux lourds en formes chimiques insolubles. Etant « bloqués » sous forme solide dans le sol, les métaux ne peuvent plus être dissous par les eaux de pluie ni s'infiltrer vers la nappe phréatique.
- La stabilisation physique (contre l'érosion) : Le réseau dense de racines retient mécaniquement la terre. Lors des fortes pluies tropicales, cela empêche le lessivage des sols pollués vers les rivières locales. Le couvert végétal (tiges et feuilles) protège le sol du vent (érosion éolienne), empêchant la formation de poussières toxiques qui se propagent dans l'air et retombent sur les habitations des communautés locales.

Contrairement à la phytoextraction, les plantes utilisées pour la phytostabilisation sont choisies parce qu'elles n'accumulent pas les métaux dans leurs parties aériennes (tiges, feuilles, fruits). Les contaminants restent strictement confinés au niveau des racines. C'est une sécurité indispensable. Si les métaux montaient dans les feuilles, les animaux herbivores (bétail sauvage ou domestique) ou les insectes s'intoxiqueraient, propageant la pollution dans toute la chaîne alimentaire.

Les scientifiques de l'Université de Lubumbashi mènent des recherches avancées sur la phytostabilisation des anciens sites miniers. Ils utilisent des graminées locales résistantes au cuivre (comme *Microchloa altera* ou *Loudetia simplex*) pour créer une « couverture verte » sur les digues de résidus miniers, transformant des zones industrielles toxiques et désertiques en espaces verdoyants et stables.

4.4. La phytoaccumulation (ou phytoextraction)

La phytoaccumulation (également appelée phytoextraction) est le troisième grand mécanisme de la phytoremédiation. Contrairement à la phytostabilisation (qui bloque les polluants dans le sol) et à la rhizofiltration (qui se limite aux racines dans l'eau), la phytoaccumulation consiste à utiliser des plantes pour absorber les polluants et les transférer activement vers leurs parties aériennes (tiges et feuilles).

Ce mécanisme permet de « nettoyer » littéralement les sols saturés en cuivre, cobalt ou nickel grâce à des plantes uniques appelées hyperaccumulatrices. Le processus se déroule en quatre étapes majeures :

- L'absorption racinaire : Les racines de la plante extraient les métaux lourds présents dans la solution du sol.
- La translocation : Grâce à la sève, la plante transporte activement ces métaux depuis les racines vers les tiges et les feuilles.
- Le stockage (Séquestration) : La plante accumule de très fortes concentrations de métaux dans ses tissus foliaires, souvent à des niveaux des milliers de fois supérieurs à ceux d'une plante normale, sans en mourir.
- La récolte et l'élimination : Une fois les plantes gorgées de métaux, leurs parties aériennes sont fauchées.

La biomasse récoltée est séchée, puis incinérée de manière hautement contrôlée. Les cendres obtenues, extrêmement concentrées en métaux, sont stockées dans des décharges industrielles sécurisées ou envoyées en usine de recyclage.

V. Recommandations

- 5.1. Renforcer le contrôle des rejets miniers et publier systématiquement les analyses des eaux d'exhaure et de rejets avant leur évacuation dans les bassins versants agricoles ;
- 5.2. Imposer aux entreprises minières un traitement de potabilisation ou d'épuration physique des eaux d'exhaure avant leur mise à disposition pour l'agriculture locale ;
- 5.3. Mettre en place des programmes de suivi des sols et renforcer les mécanismes de contrôle, afin de détecter précocement les niveaux de contamination ;
- 5.4. Recourir à la phytoremédiation, à l'amendement organique et à la gestion intégrée de la fertilité.
- 5.5. Sensibilisation des agriculteurs : Informer les communautés rurales sur les risques liés à la contamination et promouvoir des pratiques agricoles plus sûres ;
- 5.6. Responsabilisation des entreprises minières : Appliquer les principes de prévention, de précaution et pollueur-payeur.

VI. Conclusion

L'intervention du Professeur Michel Mpundu Mubemba Mulambi, Doyen de la Faculté des Sciences Agronomiques et de l'Environnement de l'UNILU a démontré comment la dégradation et la contamination des sols par les eaux d'exhaure constituent une menace multidimensionnelle. Elle menace l'agriculture, l'écologie, la santé publique et la vie sociale. Elle a souligné la nécessité d'une approche intégrée, combinant plusieurs domaines scientifiques, le Droit et les politiques publiques, dans le but de protéger les sols, garantir la sécurité alimentaire.

L'exposé a révélé une profonde asymétrie entre la richesse géologique des territoires et la vulnérabilité sanitaire de leurs populations. Dans les provinces minières, l'impact cumulé des exploitations à ciel ouvert, des unités hydrométallurgiques et des bassins de résidus, altère durablement les écosystèmes, à commencer par la forêt claire de miombo.

A cette pression industrielle s'ajoute une crise environnementale urbaine grandissante : L'absence d'une politique de gestion des déchets plastiques et la prolifération de fosses septiques non étanches saturent la capacité de filtration naturelle des sols, provoquant une contamination chimique et biologique directe des nappes phréatiques et des puits familiaux.

Face à ce double péril, l'application rigoureuse du principe de prévention inscrit dans la législation minière et environnementale congolaise ne doit plus se limiter à une conformité administrative. Elle doit imposer des technologies de rupture adaptées au contexte local. Parmi elles, la phytofiltration s'impose comme une solution d'ingénierie écologique particulièrement prometteuse.

En exploitant la résilience naturelle de la flore cupricolle locale pour extraire et immobiliser les métaux lourds (cuivre, cobalt) à la sortie des effluents industriels, cette méthode offre une alternative concrète, peu coûteuse et durable pour protéger le réseau hydrographique. Garantir la justice environnementale en RDC exige ainsi de concilier la force contraignante du Droit avec le déploiement de ces phytotechnologies, afin de restituer aux communautés locales leur droit fondamental à un environnement sain.

THEMATIQUE 4. IMPACTS DES METAUX LOURDS SUR **LA SANTE PUBLIQUE, DANS LE HAUT-KATANGA**

Par le **Professeur Ordinaire Banza Lubaba Nkulu Célestin**, MPH, PhD. Directeur de l'Unité de Toxicologie et Environnement – Faculté de Médecine Département de Santé Publique – UNILU. Point Focal de la « Task-Force Santé Environnement du Grand Katanga », Ministère de la Santé Publique, Hygiène et Prévoyance Sociale, RDC.



I. Introduction

Le Professeur Célestin Banza Lubaba a ouvert son intervention en rappelant que les métaux lourds constituent l'un des principaux risques sanitaires liés aux activités minières et industrielles dans la province du Haut-Katanga. La prolifération des mines à ciel ouvert, des usines hydrométallurgiques et l'accumulation de millions de tonnes de résidus toxiques exposent les milieux de vie à une pollution systémique. Contrairement aux polluants classiques, les éléments chimiques, tels que le plomb, le cadmium, l'arsenic, le mercure et le cuivre, possèdent une toxicité

cumulative. Ceci revient à dire qu'ils ne se dégradent pas dans l'environnement. Par contre, ils s'accumulent progressivement dans l'organisme humain, entraînant des effets délétères différés, à long terme.

C'est face à la dichotomie de la nécessité économique de l'exploitation minière et des impératifs de préservation des écosystèmes environnementaux et humains que s'inscrit la présente réflexion, intitulée : « **IMPACTS DES MÉTAUX LOURDS SUR LA SANTÉ PUBLIQUE DANS LE HAUT-KATANGA** ».



Loin d'être une simple préoccupation écologique, la dispersion environnementale des éléments traces métalliques (ETM) représente l'un des défis sanitaires les plus complexes et les plus urgents de notre époque. Les sols, l'air urbain, les ressources hydrographiques de surface ainsi que les nappes phréatiques subissent une contamination diffuse.

Par l'effet combiné de l'érosion éolienne, du lessivage des halles et du bio-enrichissement des chaînes alimentaires locales, ces toxiques pénètrent l'organisme humain, notamment, à travers l'agriculture et l'aquaculture périurbaines.

« Les rivières, les lacs, le Fleuve Congo et les nappes phréatiques sont devenus des poubelles des rejets toxiques des industries minières et métallurgiques ».

Les études toxicologiques et épidémiologiques contemporaines révèlent une imprégnation corporelle sans précédent des populations exposées, se traduisant par des anomalies congénitales, des pathologies respiratoires chroniques, des cancers, des dysfonctions rénales et des perturbations métaboliques sévères.

Face à cette menace invisible mais omniprésente, les approches traditionnelles de la médecine curative s'avèrent insuffisantes. La gestion de ce fardeau sanitaire exige un changement de paradigme dicté par la Santé Environnementale, une discipline transversale qui place le binôme « écosystème-santé » au centre des politiques publiques.

Ce chapitre introductif pose les jalons conceptuels, contextuels et méthodologiques indispensables pour appréhender l'ampleur de la crise toxicologique dans le Haut-Katanga. A travers les travaux menés par l'Unité de Toxicologie et Environnement (Faculté de Médecine, UNILU) et l'action stratégique de la Task-Force Santé Environnement du Grand Katanga, cet exposé ambitionne d'éclairer les décideurs, de conscientiser les exploitants miniers et de proposer des mécanismes de prévention durables pour matérialiser le droit constitutionnel de chaque citoyen congolais à vivre dans un environnement sain et propice à sa santé.

II. Voies et mécanismes d'intoxication chez l'être humain

L'évaluation de la menace sanitaire liée aux éléments traces métalliques (ETM) dans le Haut-Katanga exige de caractériser avec précision la cinétique de ces toxiques, depuis le milieu environnemental pollué jusqu'aux cibles cellulaires de l'organisme humain. Les métaux lourds (le cobalt, le cuivre, le plomb, l'arsenic, le cadmium) se distinguent par leur caractère non biodégradable : ils s'accumulent de manière persistante dans les tissus biologiques.

2.1. Les voies de pénétration

L'organisme humain est contaminé à travers trois voies d'absorption principales, intensifiées par la proximité des sites miniers et des unités hydrométallurgiques avec les zones résidentielles :

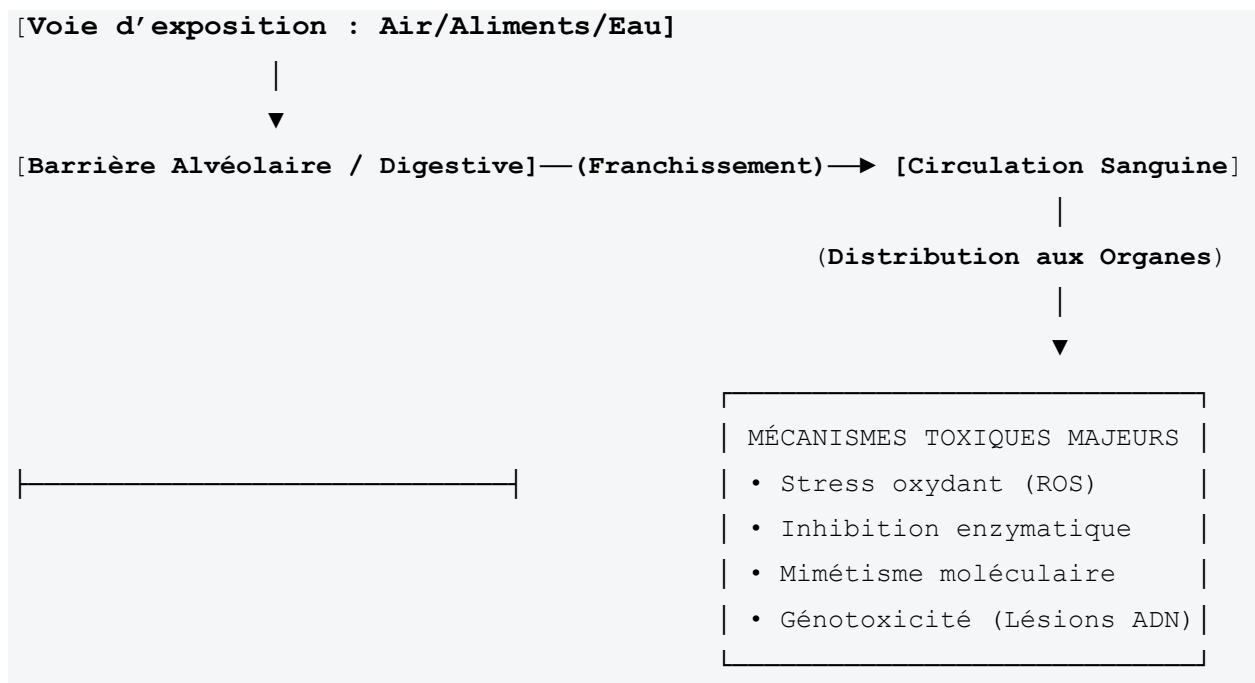
- La voie respiratoire (Inhalation) : C'est la voie prédominante pour les populations vivant à proximité des usines de traitement, des carrières et des réseaux de transport minier non asphaltés. L'érosion éolienne soulève de fines poussières minérales riches en métaux lourds. Une fois inhalées, les particules les plus fines (PM2.5 et PM10) franchissent la

barrière alvéolo-capillaire pour intégrer directement la circulation sanguine, provoquant en amont des inflammations pulmonaires chroniques.

- La voie digestive (Ingestion) : Elle s'opère par la consommation d'aliments produits localement et contaminés par transfert trophique (bioaccumulation dans les poissons, les légumes des potagers urbains comme les amarantes, ou les champignons de la forêt de miombo). L'ingestion involontaire de terre et de poussières de maison souillées joue également un rôle majeur, particulièrement chez les jeunes enfants en raison du comportement de pica (port des mains et d'objets à la bouche). L'eau des puits artisanaux peu profonds, infiltrée par les lixiviats industriels, constitue une autre source critique d'ingestion.
- La voie cutanée (Contact direct) : Bien que moins significative pour la toxicité systémique que les deux premières, elle concerne principalement les creuseurs artisanaux (*creuseurs*) et les travailleurs exposés sans équipements de protection individuelle (EPI) aux flux d'effluents acides ou aux boues de lavage des minerais.

2.2. Mécanismes pathophysiologiques de l'intoxication cellulaire

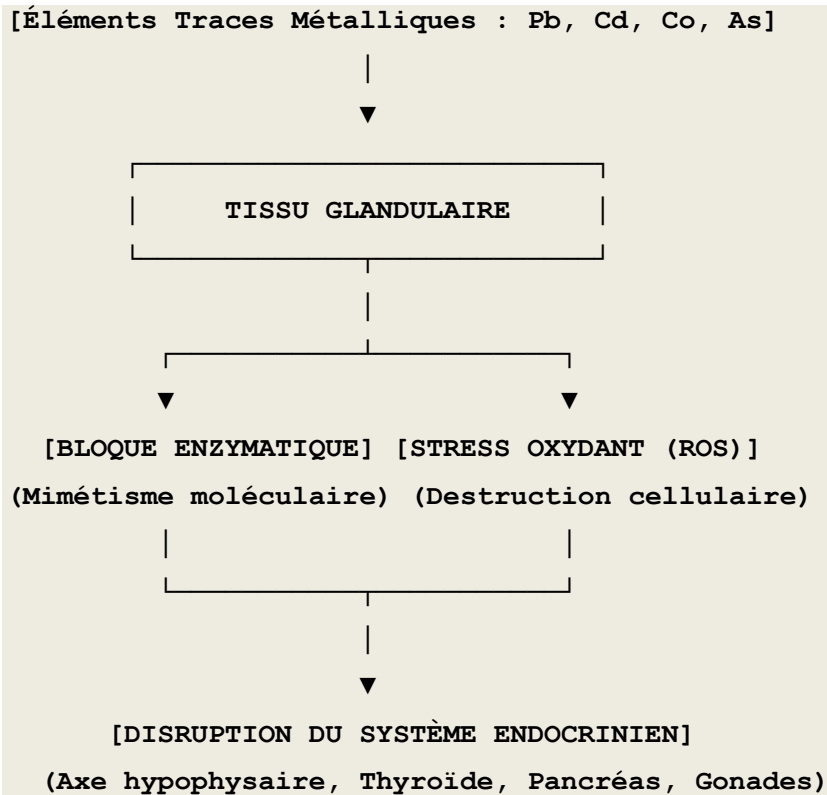
Une fois introduits dans le compartiment sanguin, les métaux lourds migrent vers leurs organes cibles (le foie, les reins, les os et le système nerveux) où ils déclenchent des cascades de réactions délétères à l'échelle moléculaire :



- Le Stress Oxydant et la Production de Radicaux Libres : Les métaux lourds (notamment le cuivre et le cobalt via des réactions de type Fenton) catalysent la production massive de dérivés réactifs de l'oxygène (ROS). Ces radicaux libres dépassent les défenses antioxydantes naturelles de la cellule, provoquant la peroxydation des lipides membranaires, la dénaturation des protéines et la destruction des structures cellulaires.
- L'Inhibition Enzymatique et le Blocus Métabolique : Les ETM possèdent une forte affinité pour les groupements thiols (-SH) présents sur de nombreuses enzymes vitales. En se liant à ces sites actifs, les métaux bloquent les fonctions enzymatiques normales. Par exemple, le plomb inhibe l'enzyme déshydratase de l'acide delta-aminolévulinique (ALAD), perturbant la synthèse de l'hémoglobine et conduisant à l'anémie.
- Le Mimétisme Moléculaire : Les métaux lourds « trompent » les cellules en se substituant à des ions essentiels indispensables au fonctionnement du corps. Le plomb ou le cadmium peuvent ainsi remplacer le calcium ou le zinc dans les transporteurs cellulaires et les structures osseuses, altérant la signalisation nerveuse, la densité osseuse et la régulation génétique.
- La Génotoxicité et la Mutagénèse : Les métaux interfèrent directement avec les mécanismes de réparation de l'ADN. Ils induisent des cassures de brins et des liaisons croisées ADN-protéines. Cette altération du code génétique explique la forte prévalence d'anomalies congénitales (tératogénicité) observée dans les maternités de la région minière, ainsi que le risque accru de cancers à long terme.

2.3. **Eléments Traces Métalliques (ETM) comme Perturbateurs Endocriniens Glandulaires**

Au-delà des lésions strictement tissulaires et mécaniques infligées aux organes de détoxification (foie et reins), les recherches contemporaines menées par l'**Unité de Toxicologie et Environnement (UNILU)** mettent en évidence un impact systémique majeur : les métaux lourds agissent comme de puissants **perturbateurs endocriniens (PE)**. Par leur capacité à franchir les barrières cellulaires protectrices, ils s'accumulent de manière sélective dans les **glandes endocrines**, altérant profondément la biosynthèse, la cinétique et la régulation des hormones indispensables à la vie.



Au-delà des lésions strictement tissulaires et mécaniques infligées aux organes de détoxification (foie et reins), les recherches contemporaines menées par l'**Unité de Toxicologie et Environnement (UNILU)** mettent en évidence un impact systémique majeur : les métaux lourds agissent comme de puissants **perturbateurs endocriniens (PE)**. Par leur capacité à franchir les barrières cellulaires protectrices, ils s'accumulent de manière sélective dans les **glandes endocrines**.

- Disruption de l'axe Hypothalamo-Hypophysaire. L'hypothalamus et l'hypophyse font office de glandes maîtresses, orchestrant la totalité de la production hormonale périphérique. Le plomb et le cadmium franchissent la barrière hémato-encéphalique et s'accumulent dans le système nerveux central. Par mimétisme moléculaire, ils dérèglent les récepteurs cellulaires et bloquent la sécrétion des hormones stimulatrices (LH, FSH, ACTH, TSH), provoquant un effondrement ou une surproduction hormonale en cascade chez les glandes cibles.
- Altération du Pancréas Endocrine et Diabète Environnemental. Le pancréas héberge les îlots de Langerhans, dont les cellules bêta synthétisent l'insuline. Le **cadmium**, l'**arsenic**

et le **cobalt** présentent une affinité d'absorption particulièrement élevée pour le tissu pancréatique.

- Mécanisme : L'accumulation de ces métaux déclenche une production massive de radicaux libres (stress oxydant) à laquelle les cellules bêta sont physiologiquement très vulnérables. Il s'ensuit une apoptose (mort cellulaire) de ces cellules ou un blocage de l'exocytose de l'insuline.
 - Impact en Santé Publique : Ce phénomène documenté explique l'émergence, dans le Haut-Katanga, d'une prévalence accrue de **diabètes de type 2 d'origine environnementale**, touchant des individus sans antécédents génétiques ni facteurs d'obésité classiques.
- Dysfonctionnement Thyroïdien. La glande thyroïde régule le métabolisme de base et le développement neurologique. Sa fonction dépend directement d'enzymes spécifiques (comme les désiodases) et de la captation de l'iode.
 - Mécanisme : Le cadmium et le plomb se lient préférentiellement aux groupements thiols (-SH) de ces enzymes, provoquant une **inhibition enzymatique fonctionnelle**. Ils bloquent ainsi la conversion de la thyroxine en sa forme biologiquement active, la triiodothyronine.
 - Impact en Santé Publique : Les populations exposées de la ceinture cuprifère manifestent une incidence anormalement élevée d'hypothyroïdies subcliniques, se traduisant par des syndromes de fatigue chronique, des troubles de la thermorégulation et des retards de croissance chez l'enfant.
- Toxicité Gonadique et Crise de la Reproduction. Les ovaires et les testicules sont des glandes exocrines et endocrines particulièrement sensibles à l'imprégnation métallique.
 - Chez l'homme : Le plomb et le cadmium lèsent les cellules de Leydig (responsables de la production de **testostérone**) et altèrent la barrière hémato-testiculaire. Les conséquences cliniques se déclinent en oligospermies sévères, en azoospermies et en chutes de la libido.
 - Chez la femme : Les métaux lourds s'accumulent dans le liquide folliculaire ovarien, perturbant la stéroïdogénèse (sécrétion d'oestrogènes et de

progestérone). Ce déséquilibre hormonal glandulaire est directement corrélé aux taux alarmants de dysménorrhées, d'avortements spontanés et de fausses couches à répétition enregistrés dans les zones à forte densité d'exploitation minière.

III. Dimension sociale et sanitaire

L'impact social des effets négatifs de l'environnement, et plus particulièrement de l'exposition aux perturbateurs endocriniens (PE), constitue un défi majeur pour nos sociétés. Ces substances chimiques, présentes dans notre quotidien (plastiques, cosmétiques, pesticides, alimentation), altèrent le fonctionnement de notre système hormonal et génèrent des conséquences qui dépassent largement le cadre de la santé individuelle.

L'exposition aux PE est directement liée à la recrudescence de plusieurs pathologies chroniques:

- Troubles du développement : Augmentation des troubles de l'apprentissage, du comportement (comme le TDAH) et baisse du quotient intellectuel (QI) moyen chez les enfants exposés in utero.
- Santé reproductive : Chute de la fertilité masculine (baisse de la qualité du sperme) et féminine, puberté précoce et augmentation des malformations congénitales.
- Maladies chroniques : Explosion des cas d'obésité, de diabète de type 2 et de cancers hormono-dépendants (sein, prostate, testicules).

Les populations les plus vulnérables sont souvent les plus exposées. Les familles à faible revenu ont moins accès aux alternatives biologiques ou sans plastique. Les travailleurs de l'industrie minière plastique subissent une exposition subie et prolongée. Les enfants et les fœtus subissent des dommages irréversibles qui hypothèquent leur avenir sanitaire et professionnel, créant un cycle de précarité.

Les conséquences des PE pèsent lourdement sur la cohésion économique. La prise en charge des maladies chroniques et des troubles neurodéveloppementaux représente des charges financières énormes par an, pour la sécurité sociale et les familles. Les arrêts maladie, l'invalidité précoce et les difficultés d'apprentissage réduisent la capacité de travail et d'innovation des communautés impactées.

La prise de conscience de cette pollution invisible génère de la méfiance envers les institutions de régulation (ACE, DPEM, OCC), les entreprises minières et même l'alimentation quotidienne. Le fait de devoir s'occuper d'enfants atteints de troubles lourds du développement ou de pathologies chroniques isole les familles et fragilise le tissu social local.

En conclusion, la lutte contre les perturbateurs endocriniens n'est pas seulement un enjeu écologique ou médical, c'est un impératif de justice sociale. Protéger l'environnement et réglementer strictement ces substances est indispensable pour préserver le capital humain, réduire les inégalités et garantir le développement durable de nos communautés.

IV. Normes du Règlement minier vs normes médicales

Le Professeur Banza a souligné la nécessité de distinguer la conformité aux seuils du Règlement minier de celle de la sécurité sanitaire réelle. Certes, des eaux d'exhaure peuvent respecter les limites de rejets fixées par le Règlement minier congolais. Cependant, elles ne répondent pas aux standards de potabilité définis par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et les Nations Unies.

Les métaux lourds sont des polluants persistants. Ils ne se dégradent jamais dans l'environnement. Même si une mine rejette du cuivre ou du cobalt en respectant scrupuleusement le seuil de 0,5 mg/L, ces métaux vont se déposer dans les sédiments des rivières. Ils sont ensuite absorbés par les algues, puis par les poissons, et enfin par l'homme (chaîne trophique). A la fin de la chaîne, la concentration dans l'organisme humain peut être des centaines de fois supérieure au seuil initialement rejeté dans l'eau.

Le Règlement minier évalue généralement les seuils métal par métal. Or, dans les régions minières, comme le Lualaba ou le Haut-Katanga, les populations ne sont pas exposées à un seul métal. Elles absorbent simultanément du cuivre, du cobalt, du plomb et parfois de l'uranium. Cette combinaison de plusieurs métaux lourds, appelée « effet cocktail », amplifie la toxicité globale sur le corps humain, même si chaque métal pris individuellement respecte son seuil réglementaire.

La différence conceptuelle entre la réglementation minière et la médecine est majeure. Le seuil environnemental (ex: 0,5 mg/L dans l'eau) définit ce qui peut sortir du tuyau de la mine. La Dose Journalière Admissible (DJA) est la quantité maximale d'une substance qu'un être humain peut

ingérer chaque jour de sa vie sans risque appréciable pour sa santé. Elle est calculée en milligrammes par kilogramme de poids corporel (mg/kg/j). Une entreprise peut affirmer qu'elle respecte le seuil tolérable du Règlement minier. Cependant, si la population locale utilise cette eau pour boire, cuisiner et arroser des champs, les métaux lourds s'accumulent dans les plantes et les poissons. Au moment du repas, le citoyen ingère une dose globale qui explose littéralement sa DJA. Le respect du seuil industriel ne garantit donc pas le respect de la DJA humaine.

Au cours des dernières années, plusieurs études scientifiques majeures, menées notamment par l'Université de Lubumbashi (UNILU, en collaboration avec des universités belges comme la KU Leuven, ont apporté des preuves indiscutables de l'impact sanitaire au Lualaba et dans le Haut-Katanga :

- Contamination néonatale et malformations congénitales (2020-2024) : Des chercheurs ont analysé le sang de cordon ombilical de nouveau-nés à Kolwezi et Lubumbashi. Les résultats ont montré des concentrations en cobalt et en plomb anormalement élevées chez les femmes enceintes vivant près des mines. Cette exposition est directement corrélée à une hausse statistique des malformations à la naissance (fentes palatines, anomalies du tube neural).
- L'étude sur les cheveux et les urines des enfants : Des prélèvements de biosurveillance humaine ont révélé que les enfants vivant à proximité des complexes miniers et des terrils présentaient des taux de cobalt dans les urines jusqu'à dix fois supérieurs aux seuils admissibles fixés par l'OMS.

V. Perspectives de gestion et recommandations

Face à la déconnexion entre les seuils réglementaires industriels et les impacts réels sur la santé humaine dans les zones d'extraction minière, les pistes de solutions devraient être globales. Elles associent des innovations technologiques, des réformes juridiques, le renforcement des contrôles et la gouvernance locale.

5.1. A l'Etat congolais

Les lois doivent évoluer pour protéger la biologie humaine et non plus seulement valider des rejets techniques :

- Créer des Zones de Surveillance Sanitaire Exclusives (ZSSE). L'Etat devrait cartographier et déclarer « zones à risques » les périmètres agricoles et résidentiels situés à moins de 5 km des grands complexes miniers de Kolwezi, Likasi et Lubumbashi ;
- Passer de normes de rejet à des normes de qualité du milieu récepteur : Au lieu de contrôler uniquement ce qui sort des usines (mg/L), l'État devrait imposer des seuils maximaux tolérables dans les rivières et les sols agricoles environnants, en tenant compte de la bioaccumulation ;
- Renforcer le pouvoir et les moyens de la DPEM (Direction de Protection de l'Environnement Minier) et de l'Agence Congolaise de l'Environnement (ACE) : Doter les inspecteurs environnementaux de laboratoires mobiles de terrain et de financements indépendants pour réaliser des contrôles inopinés sans dépendre de la logistique des entreprises minières.
- Allouer une fraction de la redevance minière directement aux laboratoires de la DPEM (Direction de Protection de l'Environnement Minier) pour garantir leur indépendance financière vis-à-vis des miniers.

5.2. Aux entreprises minières

Pour bloquer la dispersion des métaux lourds à la source, l'industrie minière devrait dépasser le simple stockage passif :

- Le traitement systématique du Drainage Acide Minier (DAM) : Généraliser l'installation de stations de traitement actif (neutralisation à la chaux et précipitation chimique des métaux) et passif (création de zones humides artificielles ou bioréacteurs utilisant des bactéries sulfato-réductrices pour piéger le cuivre et le cobalt).
- La phytostabilisation et la biorestauration : Planter des espèces végétales locales spécifiques (dites métallobytes), capables de survivre sur les terrils et de fixer les métaux lourds dans leurs racines afin d'empêcher le vent d'emporter les poussières toxiques vers les habitations.
- L'étanchéification des parcs à résidus : Imposer l'usage de géo-membranes imperméables pour doubler le fond des bassins de rétention afin d'interdire toute infiltration de cobalt ou de plomb vers les nappes phréatiques.

- Mettre en œuvre la norme *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM). Elles devraient intégrer la Norme industrielle mondiale pour la gestion des résidus pour auditer la stabilité et la lixiviation des digues et financer, via des organismes de santé indépendants, des campagnes annuelles de biosurveillance (analyses d'urines et de cheveux) des populations vivant en aval des points de rejet.

5.3. Responsabilisation du Marché Mondial et Vigilance

Le pouvoir économique des acheteurs internationaux (constructeurs automobiles, fabricants de batteries) est un puissant levier. Les organisations de la société civile devraient pousser pour :

- L'application stricte du Passeport Batterie européen : Bloquer l'accès au marché occidental pour tout cobalt ou cuivre n'apportant pas la preuve scientifique (via des audits tiers indépendants) que ses résidus sont gérés sans impact sur les populations en aval.
- L'intégration systématique de la biosurveillance humaine : Imposer, dans les cahiers des charges des certifications comme The Copper Mark, des analyses régulières de sang ou d'urine sur un échantillon de la population locale (et pas seulement sur les travailleurs de la mine) pour valider l'innocuité réelle des opérations.

VI. Conclusion

L'intervention du Professeur Ordinaire Célestin Banza Lubaba Nkulu a mis en évidence la gravité des impacts des métaux lourds sur la santé humaine dans le Haut-Katanga. Elle a montré que la contamination ne se limite pas à un problème environnemental, mais qu'elle constitue un enjeu majeur de santé publique et de justice sociale. Ce plaidoyer appelle à une mobilisation concertée des scientifiques, des décideurs politiques, des exploitants miniers et des acteurs de la société civile, afin de garantir la protection des populations et la durabilité des ressources naturelles.

L'orateur a estimé que la notion de « seuils de pollution tolérables » devrait être redéfinie sous le prisme de la santé publique et de la justice environnementale. L'avenir de la transition énergétique mondiale dépendra de la capacité des acteurs étatiques, des multinationales et des institutions internationales à transformer l'extraction du cuivre, du cobalt et d'autres minerais stratégiques en un modèle véritablement durable. Les bénéfices de la transition verte à l'échelle globale ne devraient plus être payés au prix d'une crise sanitaire locale silencieuse. Seule une gouvernance transparente, inclusive et rigoureuse permettra de concilier la prospérité économique des industries extractives et le droit fondamental des populations à vivre dans un environnement sain.

CONCLUSION GENERALE

Les quatre exposés de la conférence faisant l'objet du présent rapport, animée par des experts de l'Université de Lubumbashi (UNILU), dressent un **constat systémique et alarmant sur les impacts négatifs des activités minières** dans la province du Haut-Katanga. En croisant les perspectives de l'ingénierie minière, de l'aquaculture, de l'agronomie et de la médecine humaine, ces exposés mettent en lumière **le cycle complet de la contamination environnementale**, depuis sa source industrielle jusqu'à ses conséquences fatales sur l'organisme humain.

On peut synthétiser les contributions interconnectées d'experts, à travers trois grands axes :

1. L'eau d'exhaure comme l'une des sources et vecteur d'éléments traces métalliques.

L'intervention du Professeur Flory Kiseya a posé les bases physiques du problème en identifiant les eaux d'exhaure (les eaux pompées pour vider les mines) comme vecteur de polluants toxiques. Bien qu'essentiels aux opérations industrielles et potentiellement réutilisables, ces eaux deviennent des conductrices majeures, ou causes de dispersion d'éléments traces métalliques, à défaut d'un traitement et d'un contrôle rigoureux de leur potabilité.

2. Le transfert, la bioaccumulation et les perturbations des chaînes alimentaires.

Les Professeurs Bauchet Katemo et Michel Mpundu ont démontré comment les eaux d'exhaure et les effluents miniers s'infiltrent dans la biosphère. Les métaux lourds se bioaccumulent, d'abord, dans les milieux aquatiques. Ensuite, ils affectent la faune piscicole, avant de contaminer les sols agricoles et les cultures. Ce phénomène crée un risque critique de contamination qui remonte directement les chaînes alimentaires, piscicoles et agricoles, jusqu'au consommateur final qu'est l'homme.

3. L'impact ultime sur la santé publique

En bout de la chaîne, le Professeur Ordinaire Célestin Banza a exposé le coût humain de cette trajectoire. L'accumulation de ces métaux lourds dans l'organisme des populations du Haut-Katanga engendre de graves crises sanitaires, confirmant que la problématique de la pollution minière est devenue une urgence médicale majeure. Les perturbateurs endocriniens causes diverses pathologies, chez tout le monde. L'être humain périt à petit feu.

En somme, les travaux de ces quatre chercheurs ont mis en lumière une trajectoire de contamination continue et alarmante, partant de la source industrielle jusqu'à l'organisme humain. Les eaux d'exhaure et les effluents miniers, initialement identifiés comme des vecteurs physiques des éléments traces métalliques, s'infiltrant durablement dans la biosphère. En se bioaccumulant le long de la chaîne trophique, des milieux aquatiques aux cultures agricoles, ces polluants s'invitent inévitablement dans l'assiette des consommateurs. Cette crise environnementale ne peut plus être abordée sous le seul angle économique. Elle se mue en un drame sanitaire d'envergure, pour les populations du Haut-Katanga, érigeant la gestion des rejets miniers au rang d'urgence médicale absolue. L'interconnexion entre l'ingénierie minière, la restauration écologique des sols et des eaux et les politiques de santé publique appelle des perspectives de remédiation concrètes, ainsi que l'action de la « Task-Force Santé Environnement ». Une réponse holistique devra englober des voies indispensables pour concevoir une gestion durable des ressources, capable de protéger la biodiversité et de sauvegarder la santé des populations locales.

TABLE DES MATIERES

RESUME EXECUTIF	3
INTRODUCTION GENERALE.....	5
1. De l'organisation de la conférence.....	5
2. Problématique de la conférence	5
3. Contribution de la conférence à la recherche de la réponse.....	6
DEROULEMENT DES TRAVAUX.....	7
MOT DE BIENVENU DU DIRECTEUR GENERAL DE L'IRDH.....	10
1. Contexte de l'organisation de la conférence	11
2. Objectifs de la Conférence	11
3. Problématiques environnementales.....	12
4. Réponse de la science au problème social	12
5. Focus sur l'eau.....	14
THEMATIQUE 1. LES EAUX D'EXHAURE : ORIGINES, USAGES ET CONDITIONS DE POTABILITE	15
I. Définition, objectif et sécurité de l'exhaure minière.....	16
1.1. Définition	16
1.2. Objectif opérationnel de l'exhaure.....	17
1.3. Dimension sécuritaire de l'exhaure.	17
II. Origines, nature des eaux et système hydrogéologique d'exhaure	17
2.1. Modélisation hydrogéologique globale.	18
2.2. Types de séquence technique de l'exhaure en mine a ciel ouvert (Open Pit).19	
2.3. Le système d'exhaure souterrain complexe (Cas de la mine de Kipushi)	20
III. Usages et devenir des eaux d'exhaure.....	20
3.1. Usages industriels directs.....	20
3.2. Rejets environnementaux et ses dangers pour l'écosystème	20
3.3. Usages anthropiques (directs et indirects)	21
IV. Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'exhaure	21
4.1. Composition générale	21
4.2. Polluants anthropiques d'exploitation	21
4.3. Risques spécifiques : Transport potentiel de particules radioactives	22
4.4. Signature minière du sol du Katanga (Gisements de cuivre-Cobalt)	22
V. Variabilité physico-chimique des eaux d'exhaure selon les sites	22

5.1.	Secteur de Mutoshi	22
5.2.	Secteur de Kipushi.....	23
5.3.	Secteur de Kasumbalesa.....	23
VI.	Risques sanitaires des eaux d'exhaure et conditions de potabilité	23
6.1.	Risques sanitaires	24
6.2.	Risques sur le plan agronomique et alimentaire	24
6.3.	Risques sur le plan environnemental et social	24
VII.	Conclusion.....	25
THEMATIQUE 2. IMPACTS ECO-TOXICOLOGIQUES DES EFFLUENTS MINIERES ET DES EAUX D'EXHAURE : ENJEUX POUR LA BIODIVERSITE AQUATIQUE ET LA SECURITE DE LA CHAINE ALIMENTAIRE		26
I.	Introduction.....	26
II.	Mécanismes physiologiques de la toxicité aquatique chez les poissons	28
2.1.	Les voies d'exposition et d'absorption.....	28
III.	Les effets des effluents liés à l'eau d'exhaure, cascades de toxicité cellulaire et systémique.....	31
3.1.	Stress oxydant	31
3.2.	Inhibition enzymatique et métabolique.....	31
3.3.	Altération de la fonction respiratoire.....	32
3.4.	Perturbation ionique et osmoregulatrice.....	32
3.5.	Lésions tissulaires et neurotoxicité.....	32
IV.	Toxicité aiguë versus toxicité chronique et les effets subletaux chez les poissons.....	33
V.	Conséquences physiques et écologiques des eaux d'exhaure sur les rivières et les écosystèmes aquatiques.....	33
5.1.	L'envasement et les trois effets mortels du colmatage benthique par les sédiments fins.....	34
5.2.	La disparition du groupe EPT comme indicateur de la sante des cours d'eau	35
5.3.	Altération de la biodiversité globale comme indicateur	35
VI.	Transfert trophique, bioaccumulation, bioamplification et menaces sur la sécurité alimentaire.....	36
6.1.	La bioaccumulation	36
6.2.	La biomagnification ou la bioamplification	36
VII.	Cartographie du gradient de pollution : Le bassin de la rivière Lufira	37
7.1.	Suivi des teneurs en cuivre (Cu) de Likasi jusqu'au Lac Tshangalele 3:	37

7.2.	Le réseau trophique toxique du Lac Tshangalele (Kapolowe Mission)	38
7.3.	Modélisation de la bioamplification du Cuivre (Cu).....	38
7.4.	Modélisation de la bioamplification du Cobalt (Co).....	38
7.5.	Impacts sur la santé des poissons et indicateurs DELT	39
7.6.	Retard de croissance.....	42
VIII.	Risques pour la population humaine.....	42
8.1.	Limites maximales de consommation (Minimal Risk Level = MRL)	42
8.2.	Effets sur la reproduction humaine.....	43
IX.	Mesures de gestion, solutions de réhabilitation et de transition	44
9.1.	Traitement actif.....	44
9.2.	Traitement passif.....	44
9.3.	Phytoremédiation et biosorption	44
9.4.	Confinement des résidus	45
9.5.	Réhabilitation physique des sites	45
9.6.	Economie circulaire minière	45
X.	Conclusion.....	46
THEMATIQUE 3. RISQUES DE CONTAMINATION DE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE DANS LE HAUT-KATANGA ET PERSPECTIVES DE REMEDIATION.....		48
I.	Introduction.....	48
1.1.	Déchets urbains et emballages en plastique	49
1.2.	Des fosses septiques	51
1.3.	Conséquences immédiates	51
1.4.	La déforestation de la forêt de Miombo.....	52
II.	Risques de contamination de la chaîne alimentaire par des effluents miniers et des eaux d'exhaure	53
2.1.	L'Irrigation maraichère par des eaux d'exhaure : Un vecteur insidieux des éléments traces métalliques.....	53
2.2.	Analyse quantitative de la pollution des terres arables et potagères	53
2.3.	Analyse globale du rapport	55
III.	Transfert trophique et risques pour la santé humaine	55
IV.	Techniques agricoles de remédiation : Purifier l'eau et isoler le sol.....	55
4.1.	La phytofiltration	56
4.2.	La rhizofiltration.....	56
4.3.	La phytostabilisation	57
4.4.	La phytoaccumulation (ou phytoextraction)	58

V. Recommandations.....	59
VI. Conclusion.....	60
THEMATIQUE 4. IMPACTS DES METAUX LOURDS SUR LA SANTE PUBLIQUE, DANS LE HAUT-KATANGA.....	61
I. Introduction.....	61
II. Voies et mécanismes d'intoxication chez l'être humain.....	63
2.1. Les voies de pénétration.....	63
2.2. Mécanismes pathophysiologiques de l'intoxication cellulaire.....	64
2.3. Eléments Traces Métalliques (ETM) comme Perturbateurs Endocriniens Glandulaires.....	65
III. Dimension sociale et sanitaire.....	68
IV. Normes du Règlement minier vs normes médicales.....	69
V. Perspectives de gestion et recommandations.....	70
5.1. A l'Etat congolais.....	71
5.2. Aux entreprises minières.....	71
5.3. Responsabilisation du Marché Mondial et Vigilance.....	72
VI. Conclusion.....	72
CONCLUSION GENERALE	73
1. L'eau d'exhaure comme l'une des sources et vecteur d'éléments traces métalliques.....	73
2. Le transfert, la bioaccumulation et les perturbations des chaînes alimentaires.	73
3. L'impact ultime sur la santé publique	74
TABLE DES MATIERES	75
.....	79



Institut de Recherche en Droits Humains

RECHERCHE | FORMATION | PLAIDOYER

**RAPPORT DE CONFERENCE
LUBUMBASHI,
LE 04 SEPTEMBRE 2026**

Info@irdh.org

+243 981 520 193

www.irdh.org

1068/66, Avenue Kapenda,
Lubumbashi, Haut-Katanga (Rdc)