



Institut Supérieur Pédagogique de Bukavu

Titre de l'article :

Plantes locales comme agents de dépollution :
mécanismes chimiques de la phytoremédiation
et applications environnementales à Bukavu
(RDC)

Présenté par BUSHINGANYA Rwendanga Arsène

Dirigé par Alidor SHIKIKA

Professeur Associé

SIGLES ET ABBREVIATIONS

RDC : République Démocratique du Congo

DBO : Demande Biochimique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en Oxygène

MES : Matières En Suspension

pH : Potentiel Hydrogène

mg/L : Milligramme par litre

ppm : Parties par million

Phyto : Phytoremédiation

PEC : Plantes Épuratrices de Contaminants

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

MO : Matière Organique

NO_3^- : Nitrates

SO_4^{2-} : Sulfates

Ions présents dans l'eau et le sol

GPS : Global Positioning System

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

UV : Ultraviolet

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le domaine de la Chimie environnementale et de la Chimie verte et porte sur l'utilisation des plantes locales comme agents de dépollution dans la ville de Bukavu, en République Démocratique du Congo. L'objectif principal est d'évaluer le potentiel de la phytoremédiation comme solution écologique et durable face aux problèmes croissants de pollution urbaine.

La méthodologie adoptée repose sur une enquête menée auprès des habitants afin d'analyser leur perception de la pollution environnementale et leur acceptabilité des solutions basées sur les plantes. Les résultats obtenus montrent une adhésion totale (100 %) des répondants à l'utilisation des plantes locales pour la dépollution de leur quartier. Par ailleurs, les déchets solides ont été identifiés comme la principale source de pollution (60 %), suivis par la pollution de l'eau et de l'air (40 % chacun).

Ces résultats mettent en évidence une forte acceptabilité sociale de la phytoremédiation ainsi qu'une volonté de participation active des populations locales dans la gestion environnementale. L'étude souligne également le rôle potentiel de certaines plantes locales dans l'absorption et la stabilisation des polluants, notamment les métaux lourds.

En conclusion, la phytoremédiation apparaît comme une approche prometteuse, à la fois efficace, économique et durable, pouvant contribuer significativement à l'amélioration de la qualité de l'environnement urbain dans les pays en développement.

Mots-clés : phytoremédiation, pollution, plantes locales, chimie environnementale, Bukavu, développement durable

Abstract

This study falls within the fields of Environmental Chemistry and Green Chemistry and focuses on the use of local plants as agents for environmental remediation in the city of Bukavu, in the Democratic Republic of the Congo. The main objective is to assess the potential of phytoremediation as a sustainable and eco-friendly solution to increasing urban pollution.

The methodology is based on a survey conducted among local residents to evaluate their perception of environmental pollution and their acceptance of plant-based remediation strategies. The results indicate a full acceptance (100%) of using local plants for environmental cleanup. Solid waste was identified as the primary pollution source (60%), followed by water and air pollution (40% each).

These findings highlight a strong social acceptance of phytoremediation and a willingness among local communities to actively participate in environmental management. The study also emphasizes the potential role of local plant species in absorbing and stabilizing pollutants, including heavy metals.

In conclusion, phytoremediation appears to be a promising, cost-effective, and sustainable approach that can significantly contribute to improving urban environmental quality in developing countries.

Keywords: phytoremediation, pollution, local plants, environmental chemistry, Bukavu, sustainable development.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Le vétiver	7
Figure 2 La Jacinthe véritable	7
Figure 3 Le papyrus	8
Figure 4 Le papyrus	8
<i>Figure 5 Connaissance des plantes épuratrices.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 6 Perception de l'efficacité de la qualité de l'eau</i>	<i>10</i>
<i>Figure 7 Perception de l'efficacité de la qualité de l'eau</i>	<i>11</i>
<i>Figure 8 Types de pollutions observés</i>	<i>11</i>
<i>Figure 9 Adhésion au projet de dépollution par les plantes</i>	<i>12</i>
<i>Figure 10 Perception du rôle des plantes dans la réduction de la pollution.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 11 Responsabilité de la plantation et de l'entretien.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 12 Participation antérieure à des activités de dépollution.....</i>	<i>13</i>



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 . Métaux lourds et mécanismes de phytoremédiation (Wang, D., Li, H. 2006).	6
Tableau 2 Comparatif de résultats avec la littérature.....	15

TABLE DES MATIERES

SIGLES ET ABBREVIATIONS	I
Résumé	II
Abstract	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	V
TABLES DE MATIERES.....	VI
INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1 : SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES	3
I. Généralités sur la pollution et la dépollution	3
I.1. Pollution environnementale : nature et sources des contaminants	3
I.2. Limites des méthodes classiques de dépollution.....	3
I.3. Concept et évolution de la phytoremédiation.....	3
I.4. Mécanismes de dépollution impliquant les plantes.....	4
I.5. Intérêt des plantes locales dans la dépollution	4
I.6. Phytoremédiation et principes de la chimie verte	4
II. Mécanismes chimiques de la phytoremédiation	5
II.1 Concept général de la phytoremédiation	5
II.2 Biodisponibilité des polluants dans les sols.....	5
II.3 Phytoextraction	5
II.4 Phytostabilisation.....	5
II.5 Phytodégradation	5
II.6 Rhizodégradation.....	5
II.7 Phytovolatilisation	6
II.8 Facteurs influençant l'efficacité de la phytoremédiation.....	6
II.9 Tableau 1 . Métaux lourds et mécanismes de phytoremédiation (Wang, D., Li, H. 2006).	6
II.10 Schéma conceptuel du transfert des polluants	6
II.11 Cinétique chimique de l'absorption des métaux lourds.....	6
II.12 Importance écologique de la phytoremédiation.....	6
Chapitre 2. MATERIELS ET METHODES	7
2.1 Description de la zone d'étude	7

2.2 Matériel biologique : Plantes étudiées.....	7
2.4 Matériels utilisés.....	9
2.5 Méthodes de collecte des données.....	9
2.6 Identification botanique des espèces	9
2.7 Méthodes d'analyse des données.....	9
2.8 Limites méthodologiques de l'étude	9
Chapitre 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	10
1. Connaissance des plantes épuratrices	10
2. Perception de l'efficacité de la qualité de l'eau	10
3. Évaluation de la qualité de l'air	11
4 .Types de pollutions observés	11
5. Adhésion au projet de dépollution par les plantes	12
6. Perception du rôle des plantes dans la réduction de la pollution.....	12
7. Responsabilité de la plantation et de l'entretien	13
8. Participation antérieure à des activités de dépollution	13
CONCLUSION	16
PERSPECTIVES.....	17
RECOMMANDATIONS	18
BIBLIOGRAPHIES	19

INTRODUCTION

La pollution des sols et des eaux est l'un des défis environnementaux les plus pressants du XXI^e siècle. Les activités industrielles, minières, agricoles et urbaines entraînent une accumulation de métaux lourds, hydrocarbures, pesticides et autres contaminants persistants (**Ali, H. et al. 2013**). Ces polluants, souvent bioaccumulables, menacent la santé humaine, la biodiversité et la stabilité des écosystèmes (**Salt et al., 1998**).

Le problème des sols contaminés est aujourd'hui très préoccupant pour les pays émergents. Les métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc, et le mercure ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes (**Wang et al., 2003**).

De plus ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités : en agriculture par l'application de boues d'épuration ou dans l'industrie métallurgique.

La chimie environnementale s'intéresse à l'identification de ces polluants, à leur comportement physico-chimique dans les milieux naturels ainsi qu'à leurs mécanismes de transformation et de transfert entre les différents compartiments de l'environnement (**Ali, H., et al 2013**). Toutefois, les technologies conventionnelles de dépollution, fondées sur des traitements physico-chimiques intensifs, demeurent coûteuses, énergivores et parfois génératrices de pollutions secondaires, ce qui limite leur application à grande échelle, notamment dans les pays en développement.

Dans ce contexte, la chimie verte apparaît comme une alternative scientifique et technologique visant à développer des procédés durables, économes en énergie et respectueux de l'environnement. L'utilisation des plantes locales comme agents de dépollution, connue sous le nom de phytoremédiation, s'inscrit pleinement dans cette approche (**Bushinganya R. 2025**).

Cette technique repose sur les capacités naturelles des plantes à interagir chimiquement et biologiquement avec les polluants, à travers des processus tels que l'absorption, la complexation, la transformation enzymatique ou l'immobilisation des contaminants dans le sol et l'eau (**Alloway, B. J. 2013**). Les plantes locales, en particulier, présentent un intérêt accru en raison de leur adaptation aux conditions écologiques locales, de leur disponibilité naturelle et de leur résilience face aux stress environnementaux.

L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux (**Wang et al., 2006**). A l'échelle microscopique, les métaux lourds ont aussi des effets néfastes sur les populations bactériennes, ce qui n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement de l'écosystème.

Les méthodes classiques de dépollution : incinération, excavation, traitements physico-chimiques présentent des limites. Elles sont coûteuses, énergivores et parfois elles-mêmes génératrices de pollution secondaire (**Raskin & Ensley, 2000**). Dans ce contexte, la phytoremédiation, qui consiste à utiliser les plantes pour absorber, transformer ou immobiliser les polluants, apparaît comme une alternative durable (**Ali et al., 2013**).

Les polluants constituent des agents de dépollution efficaces et durables. Leur utilisation, intégrée dans une approche de chimie verte, permet non seulement de réduire la pollution des sols et des eaux, mais aussi de valoriser les biomasses contaminées dans une logique d'économie circulaire (**Ali, H., et al 2013**).

Cependant, malgré le potentiel reconnu de la phytoremédiation, plusieurs questions scientifiques demeurent quant à son efficacité réelle, à la spécificité plante–polluant, à la cinétique des processus de dépollution et à la gestion de la biomasse végétale contaminée (**Chaney, R. L. 1983**). La problématique centrale de ce travail réside donc dans la nécessité d'évaluer dans quelle mesure les plantes locales peuvent constituer des agents de dépollution efficaces, durables et compatibles avec les principes de la chimie verte, tout en répondant aux exigences de la chimie environnementale en matière de protection des écosystèmes (**Chibuike et al 2014**).

L'objectif général de cet article est de proposer une synthèse des connaissances actuelles sur l'utilisation des plantes locales dans les processus de dépollution des sols et des eaux. De manière spécifique, il vise à analyser les mécanismes chimiques et biologiques impliqués dans la phytoremédiation, à identifier les espèces végétales locales les plus étudiées pour l'élimination des polluants, à évaluer les avantages environnementaux et économiques de cette approche, ainsi qu'à mettre en évidence ses limites et ses perspectives d'amélioration.

Ce travail repose sur l'hypothèse que les plantes locales, grâce à leurs propriétés physiologiques, biochimiques et écologiques, sont capables de réduire significativement la concentration de certains polluants environnementaux, tout en minimisant les impacts négatifs sur les écosystèmes. Il est également supposé que l'intégration de la phytoremédiation dans une démarche de chimie verte permet de limiter l'usage de procédés chimiques agressifs et de favoriser des solutions de dépollution plus durables et accessibles.

La méthodologie adoptée dans cet article est basée sur une analyse documentaire et comparative des travaux scientifiques publiés dans le domaine de la phytoremédiation, de la chimie verte et de la chimie environnementale. Cette approche consiste à examiner les résultats expérimentaux, les études de terrain et les modèles théoriques décrivant les interactions entre les plantes, les polluants et le milieu environnemental, afin de dégager une vision globale et critique de l'état actuel des connaissances.

Chapitre 1 : SYNTHÈSES BIBLIOGRAPHIQUES

I. Généralités sur la pollution et la dépollution

I.1. Pollution environnementale : nature et sources des contaminants

La pollution environnementale résulte de l'introduction directe ou indirecte de substances chimiques nocives dans les écosystèmes naturels et ces substances peuvent affecter l'air, l'eau et le sol en provoquant des effets négatifs sur les êtres vivants (**Ali, H. et al. 2013**). Les principaux polluants identifiés dans les sols et les milieux aquatiques sont les métaux lourds (plomb, cadmium, mercure, arsenic), les hydrocarbures pétroliers, les pesticides, les composés organiques persistants et les nutriments en excès tels que les nitrates et les phosphates qui sont principalement chimiques. Ces contaminants proviennent majoritairement des activités industrielles, minières, agricoles intensives, du rejet des eaux usées non traitées et de la mauvaise gestion des déchets solides (**Chaney, R. L. 1983**).

Du point de vue de la chimie environnementale, ces polluants se caractérisent par leur toxicité, leur persistance, leur mobilité et leur capacité à s'accumuler dans les chaînes trophiques (**Dhal, B., et al. 2013**). Leur comportement chimique dans l'environnement dépend de paramètres tels que le pH, la nature du sol, la matière organique, la température et l'activité microbienne, ce qui complique leur élimination par des méthodes conventionnelles (**Garbisu, C. & Alkorta, I. 2001**).

I.2. Limites des méthodes classiques de dépollution

Les techniques traditionnelles de dépollution reposent principalement sur des procédés physico-chimiques tels que l'excavation des sols contaminés, le lavage chimique, la solidification, l'oxydation avancée ou encore les traitements thermiques (**Kumar, N. et al. 2017**). Bien que ces méthodes puissent réduire rapidement la concentration des polluants, elles présentent plusieurs limites majeures : coûts élevés, consommation importante d'énergie, perturbation des sols, production de déchets secondaires et risques environnementaux additionnels.

Ces contraintes ont conduit la communauté scientifique à rechercher des alternatives plus durables, capables de concilier efficacité environnementale, viabilité économique et respect des écosystèmes, conformément aux principes de la chimie verte (**Chibuiké et al 2014**).

I.3. Concept et évolution de la phytoremédiation

La phytoremédiation est une technique de dépollution biologique utilisant les plantes pour réduire la concentration, la toxicité ou la mobilité des polluants présents dans l'environnement. Introduite comme une approche innovante dans les années 1990 quand les chercheurs ont commencé à étudier comment les plantes peuvent absorber les métaux lourds et autres polluants, elle a rapidement suscité un intérêt croissant en raison de son caractère écologique et de son faible impact environnemental.

Cette technologie repose sur l'interaction entre les plantes, les polluants et le milieu environnant, intégrant à la fois des processus chimiques, biologiques et biochimiques (**Ali, H. et al. 2013**). Elle est aujourd'hui reconnue comme une composante importante des stratégies de dépollution durable, en particulier pour les sites faiblement à modérément contaminés.

I.4. Mécanismes de dépollution impliquant les plantes

Les études scientifiques identifient plusieurs mécanismes majeurs de phytoremédiation :

- Phytoextraction : absorption et accumulation des polluants, notamment les métaux lourds, dans les tissus végétaux par leurs racines et les accumulent dans leurs tiges et leurs feuilles.

Exemples : plomb, cadmium, zinc, cuivre,

- Phytostabilisation : immobilisation des contaminants dans le sol par adsorption ou complexation chimique au niveau des racines en empêchant leurs dispersions dans l'eau ou dans l'air (**Kumar, N. et al. 2017**).

- Phytodégradation : transformation enzymatique des polluants organiques en composés moins toxiques.

Exemples : pesticides, hydrocarbures, solvants organiques,.....

- Rhizodégradation : dégradation des contaminants par les micro-organismes stimulés par les exsudats racinaires.

- Phytovolatilisation : conversion de certains polluants en formes volatiles libérées dans l'atmosphère sous forme de gaz après transformation.

Ces mécanismes impliquent des réactions chimiques fondamentales telles que l'oxydoréduction, la complexation métal-ligand, l'hydrolyse et la biodégradation enzymatique (**Ghosh, M. et al 2005**).

I.5. Intérêt des plantes locales dans la dépollution

La littérature scientifique met en évidence l'avantage significatif de l'utilisation des plantes locales dans les stratégies de phytoremédiation. Ces espèces présentent une meilleure adaptation aux conditions climatiques, édaphiques et biologiques locales, ce qui améliore leur survie, leur croissance et leur efficacité dépolluante (**Kumar, P. B. A. N. et al. 1995**). De plus, leur utilisation réduit les risques d'invasion biologique et favorise la conservation de la biodiversité et ces plantes sont faciles à cultiver et coutent moins chères.

Plusieurs études menées en zones tropicales montrent que des plantes locales telles que *Chrysopogon zizanioides*, *Eichhornia crassipes*, *Cyperus papyrus* ou certaines légumineuses indigènes possèdent une capacité élevée d'absorption des polluants et contribuent à la restauration écologique des milieux dégradés.

I.6. Phytoremédiation et principes de la chimie verte

La phytoremédiation s'inscrit pleinement dans les principes fondamentaux de la chimie verte, notamment la prévention de la pollution, l'utilisation de ressources renouvelables, la réduction des substances dangereuses et l'économie d'énergie (**Dhal, B., et al. 2013**). Contrairement aux procédés chimiques classiques, cette approche exploite des mécanismes naturels sans recourir à des réactifs toxiques ou à des conditions extrêmes de température et de pression (**Dushenkov, V. et al. 1995**).

Ainsi, la littérature souligne que l'intégration de la phytoremédiation dans les politiques environnementales constitue une voie prometteuse pour une gestion durable des pollutions, en particulier dans les régions disposant de ressources technologiques limitées.

II. Mécanismes chimiques de la phytoremédiation

II.1 Concept général de la phytoremédiation

La phytoremédiation est une technologie écologique de dépollution qui utilise certaines plantes capables d'absorber, de transformer, de stabiliser ou de volatiliser des contaminants présents dans les sols, les sédiments et les eaux (Ali, H. et al. 2013).. Cette approche s'inscrit dans les principes de la chimie verte et favorise des solutions respectueuses de l'environnement.

Certaines plantes appelées hyperaccumulatrices possèdent des capacités physiologiques et biochimiques leur permettant de tolérer des concentrations élevées de polluants. Ces plantes peuvent accumuler certains éléments toxiques dans leurs tissus végétaux sans subir de dommages majeurs (Ghosh, M et al 2005)..

II.2 Biodisponibilité des polluants dans les sols

La biodisponibilité correspond à la fraction des polluants réellement accessible pour l'absorption par les racines des plantes. Les contaminants présents dans le sol peuvent exister sous différentes formes : dissoutes dans la solution du sol, adsorbé sur les particules minérales, complexées avec la matière organique ou précipitées sous forme de composés insolubles (Kumar, P. B. A. N. et al. 1995).

Plusieurs paramètres physico-chimiques influencent cette biodisponibilité, notamment le pH du sol, la capacité d'échange cationique, la teneur en matière organique et les conditions redox.

II.3 Phytoextraction

La phytoextraction consiste en l'absorption des contaminants par les racines suivie de leur transport vers les parties aériennes de la plante. Ce mécanisme est particulièrement efficace pour l'élimination des métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le zinc ou le cuivre (Vamerali, T. et al 2010).

Une fois dans la plante, les ions métalliques peuvent être complexés par des molécules biologiques telles que les phytochélatines et les métallothionéines, réduisant ainsi leur toxicité.

II.4 Phytostabilisation

La phytostabilisation consiste à immobiliser les polluants dans le sol grâce aux interactions entre les racines et les particules du sol. Les racines peuvent modifier les conditions physico-chimiques du sol et favoriser la formation de composés stables limitant la mobilité des contaminants (Kumar, P. B. A. N. et al. 1995).

II.5 Phytodégradation

La phytodégradation correspond à la transformation des polluants organiques grâce aux enzymes produites par les plantes. Des enzymes comme les peroxydases, oxygénases et déshydrogénases participent à la décomposition de pesticides, hydrocarbures et solvants organiques.

II.6 Rhizodégradation

La rhizodégradation implique l'action conjointe des racines et des micro-organismes présents dans la rhizosphère (Yadav, S. K. 2010).

Les racines sécrètent des composés organiques qui stimulent l'activité microbienne, favorisant ainsi la dégradation des polluants présents dans le sol.

II.7 Phytovolatilisation

La phytovolatilisation correspond à l'absorption de certains polluants par la plante suivie de leur transformation en composés volatils libérés dans l'atmosphère. Ce phénomène a été observé pour des éléments tels que le mercure, l'arsenic ou le sélénium (Vangronsveld, J. et al. 2009).

II.8 Facteurs influençant l'efficacité de la phytoremédiation

L'efficacité de la phytoremédiation dépend de plusieurs facteurs : la nature chimique des polluants, leur concentration, les caractéristiques physico-chimiques du sol, les conditions climatiques et l'espèce végétale utilisée (Lamin-Samavai, A., et al. 2021)..

II.9 Tableau 1 . Métaux lourds et mécanismes de phytoremédiation (Wang, D., Li, H. 2006).

Métal lourd	Source principale de pollution	Mécanisme de phytoremédiation
Plomb (Pb)	Déchets industriels, batteries	Phytoextraction / Phytostabilisation
Cadmium (Cd)	Engrais chimiques, activités minières	Phytoextraction
Zinc (Zn)	Industries métalliques	Phytoextraction
Cuivre (Cu)	Produits agricoles	Phytoextraction
Mercure (Hg)	Activités minières	Phytovolatilisation

II.10 Schéma conceptuel du transfert des polluants

Polluant dans le sol → Dissolution dans la solution du sol → Absorption par les racines → Transport interne (xylème / phloème) → Accumulation dans les feuilles ou transformation chimique (McGrath, S. P. & Zhao, F. J. 2003).

II.11 Cinétique chimique de l'absorption des métaux lourds

La vitesse d'absorption des métaux lourds par les plantes peut être décrite par une relation simplifiée :

$$V=k \times C$$

où :

V= vitesse d'absorption du polluant

k= constante de transfert biologique

C = concentration du polluant dans le sol

II.12 Importance écologique de la phytoremédiation

Les mécanismes chimiques de la phytoremédiation contribuent à réduire la mobilité et la toxicité des polluants dans les écosystèmes (Alloway, B. J. 2013). Cette technologie représente une solution durable pour la gestion environnementale, particulièrement dans les régions où les moyens technologiques sont limités (Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, P. B. A. N., et al. 1998).

Chapitre 2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Description de la zone d'étude

La présente étude a été réalisée dans la ville de Bukavu, située dans la province du Sud-Kivu à l'est de la République Démocratique du Congo. Cette zone se caractérise par une urbanisation croissante, associée à diverses activités anthropiques susceptibles de générer des pressions significatives sur l'environnement.

Le climat de la région est de type tropical humide, marqué par des précipitations abondantes et des températures modérées, conditions favorables au développement d'une végétation diversifiée. Toutefois, l'accumulation des déchets domestiques, les rejets d'eaux usées ainsi que certaines activités agricoles contribuent à la dégradation progressive de la qualité des sols et des ressources hydriques.

Dans ce contexte, l'utilisation des plantes locales comme agents de dépollution constitue une approche écologique pertinente, conforme aux principes de la chimie verte et de la gestion durable des écosystèmes.

2.2 Matériel biologique : Plantes étudiées

L'étude s'est focalisée sur certaines plantes locales reconnues pour leur potentiel dans les processus de phytoremédiation. Ces espèces végétales présentent des capacités physiologiques et biochimiques leur permettant d'absorber, de stabiliser ou de transformer différents types de polluants présents dans les sols et les eaux.

Ces plantes sont les suivantes :

Le vétiver (*Chrysopogon zizanioides*) est une graminée tropicale aux racines profondes et aromatiques, utilisée pour ses vertus médicinales (calmant, détoxifiant), cosmétiques (parfumerie, savons) et environnementales (lutte contre l'érosion, phyto-épuration) (Alloway, B. J. 2013). Originaire d'Asie, cette plante est aussi connue sous le nom de khamaré ou gongoli en Afrique de l'Ouest, où ses racines sont infusées pour des tisanes et des soins corporels, tandis que ses feuilles servent au tressage d'objets artisanaux.



Figure 1 : *Le vétiver*

La jacinthe véritable (*Hyacinthus orientalis*) est une plante bulbeuse vivace, très parfumée, qui fleurit au printemps, originaire de Méditerranée orientale. Elle se cultive facilement en pleine terre ou en pot, en automne, dans un sol bien drainé, en plaçant le bulbe pointe vers le haut à 10-15 cm de profondeur. Après la floraison, il faut laisser le feuillage sécher pour que le bulbe reconstitue ses réserves, puis le stocker ou le replanter (Ali, H. et al. 2013).



Figure 2 : *La Jacinthe véritable*

Le papyrus (*Cyperus papyrus*) est une plante semi-aquatique africaine, principalement connue pour être le support d'écriture souple de l'Égypte antique, fabriqué à partir de sa tige. Utilisé dès 2500 av. J.-C., il était fabriqué en croisant des bandelettes de moelle, pressées et séchées pour former des rouleaux durables (National Geographic 2019).



Figure 3 : *Le papyrus*

Le tournesol (*Helianthus annuus*) est une plante annuelle de la famille des Astéracées, célèbre pour sa grande fleur jaune appelée capitule qui suit la course du soleil durant sa croissance. Originaire d'Amérique du Nord et du Mexique, il est aujourd'hui cultivé mondialement pour ses graines riches en huile et ses qualités ornementales Chaney, R. L. (1983)..



Figure 4 : *Le tournesol*



Les légumineuses locales (luzerne, trèfle, féverole, pois) sont d'excellentes alliées pour la dépollution et la régénération des sols. Grâce à la symbiose racinaire, elles fixent l'azote atmosphérique, réduisant le besoin d'engrais azotés de synthèse, évitant ainsi la pollution des nappes phréatiques (Bashwira, A., et al). Elles améliorent la structure du sol, limitent l'érosion et augmentent la biodiversité.

Description et caractéristiques de ces légumineuses

La luzerne, le trèfle, la féverole et le pois sont des légumineuses (Fabacées) incontournables, riches en protéines et capables de fixer l'azote atmosphérique, améliorant ainsi la fertilité du sol. La luzerne est une culture pérenne (sols sains, profonds), tandis que le trèfle (blanc/violet) est idéal pour les prairies et le pâturage. Le pois et la féverole sont des cultures protéagineuses annuelles adaptées à la production de grain ou de fourrage (Pilon-Smits, E. 2005).

- ✓ **Luzerne (*Medicago sativa*):** Souvent appelée « reine des plantes fourragères », c'est une culture pérenne de longue durée, idéale pour des sols sains et non acides, avec un enracinement très profond. Elle est très productive, mais ne doit pas précéder d'autres légumineuses pour limiter l'aphanomyces. C'est une plante riche en protéines (Salt, D. E. et al. 1995).
- ✓ **Trèfle (*Trifolium*):** Comprend le trèfle blanc (pâturage) et le violet (fauche/pâturage). Moins pérenne que la luzerne, il s'adapte mieux aux sols humides et acides (Raskin, I., et al 2000).
- ✓ **Féverole (*Vicia faba*):** Légumineuse annuelle à haut potentiel de rendement protéique, idéale en couvert d'hiver pour fixer l'azote et restructurer le sol. Nécessite un bon apport en soufre.

- ✓ **Pois (Protéagineux):** Utilisé pour la production de grains (alimentation animale) ou de fourrage (Alloway, B. J. 2013). C'est une culture de printemps ou d'hiver qui s'intègre bien dans les rotations pour apporter de l'azote aux cultures suivantes (Bashwira, A., et al).

Ces plantes ont été choisies en raison de leur tolérance aux milieux pollués, de leur forte capacité d'absorption des métaux lourds ainsi que de leur adaptabilité aux conditions écologiques locales (Raskin, I., et al 1997).

2. 3 Echantillonnage

En vue d'échantillonnage, on trouve une diversité de méthodes, regroupées en deux catégories: probabilistes et non probabilistes. Chaque catégorie comprend ses particularités (avantages et désavantages) et s'adapte à des situations déterminées. A la lumière de ces précisions, la présente recherche a été réalisée grâce à un échantillonnage non probabiliste par quota, dont le principe vise à obtenir dans l'échantillon, une représentativité suffisante des aspects sociodémographiques et d'autres importantes variables caractérisant la population-cible. Cette méthode a l'avantage d'être moins coûteuse et rapide, autorisant de remplacer un sondé par un autre qui a les mêmes caractéristiques sociodémographiques. Ainsi, l'échantillon a été construit suivant un modèle réduit de population en fonction des critères de quotas prédéfinis, notamment haut - moyen - bas standings.

2.4 Matériels utilisés

- Carnets de terrain pour la collecte des observations
- Appareil photographique pour la documentation visuelle des espèces végétales
- Système de géolocalisation (GPS) pour la localisation des sites d'étude
- Ordinateur pour le traitement et l'analyse des données
- Logiciels d'analyse statistique tels que Microsoft Excel

2.5 Méthodes de collecte des données

- a) Observation directe : Des observations de terrain ont été effectuées afin d'identifier les espèces végétales présentes dans les zones susceptibles d'être affectées par la pollution.
- b) Enquête par questionnaire : Une enquête a été réalisée auprès des populations locales afin d'évaluer leur perception de la pollution environnementale et leur connaissance des plantes susceptibles de contribuer à la dépollution.
- c) Revue documentaire : Une analyse approfondie de la littérature scientifique relative à la phytoremédiation et à la chimie environnementale a été réalisée.

2.6 Identification botanique des espèces

L'identification des espèces végétales étudiées a été réalisée à partir de guides botaniques, de bases de données scientifiques et de publications spécialisées dans le domaine de la phytoremédiation.

2.7 Méthodes d'analyse des données

Les données recueillies ont fait l'objet d'un traitement statistique descriptif. Les résultats ont été présentés sous forme de tableaux et de représentations graphiques permettant de mettre en évidence les tendances observées.

2.8 Limites méthodologiques de l'étude

L'étude repose principalement sur des données issues d'observations de terrain et d'enquêtes auprès des populations, sans analyses physico-chimiques approfondies en laboratoire. Les résultats doivent donc être considérés comme une base préliminaire pouvant être approfondie par des recherches futures.

Chapitre 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette section vise à interpréter les résultats obtenus lors de l'enquête menée auprès des habitants concernant l'utilisation des plantes locales comme solution de dépollution environnementale. Les réponses recueillies permettent d'évaluer la perception de la population face aux problèmes de pollution ainsi que leur acceptation des solutions écologiques telles que la phytoremédiation. Bien que l'échantillon soit limité (50 répondants), ces résultats offrent une première indication sur la perception locale des stratégies de dépollution basées sur les plantes.

1. Connaissance des plantes épuratrices

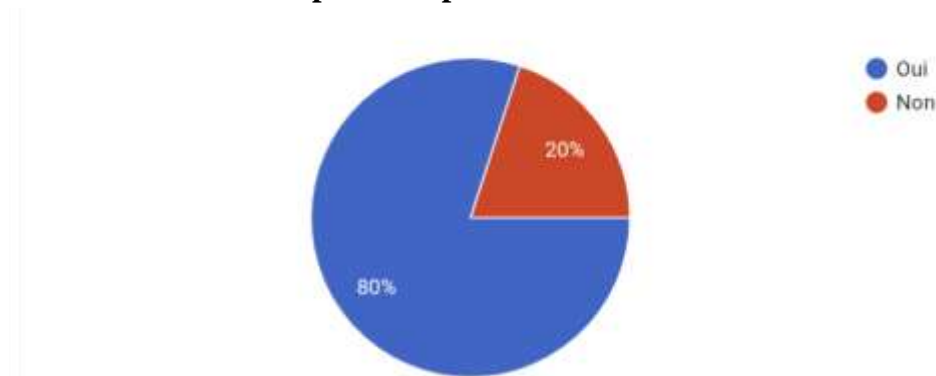


Figure 5 Connaissance des plantes épuratrices

80 % des répondants affirment connaître des plantes locales utilisées pour purifier l'air, l'eau ou le sol. Ce chiffre révèle un fort maintien des connaissances écologiques locales. Scientifiquement, cela suggère que la population n'est pas déconnectée de son environnement et possède un savoir empirique sur les services de régulation rendus par la biodiversité locale.

2. Perception de l'efficacité de la qualité de l'eau

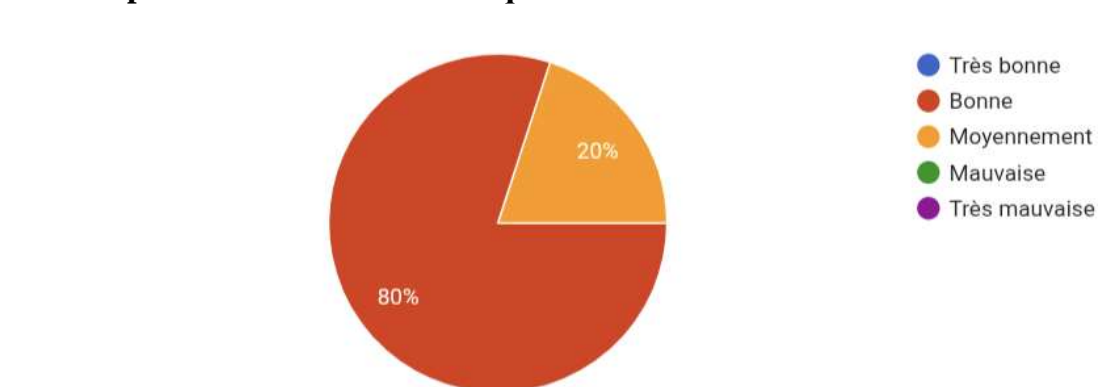


Figure 6 Perception de l'efficacité de la qualité de l'eau

Les résultats de l'enquête indiquent que 80 % des répondants estiment que la qualité de l'eau dans leur quartier est bonne, tandis que 20 % la jugent moyennement bonne. Aucun répondant n'a considéré la qualité de l'eau comme mauvaise ou très mauvaise.

Cette perception suggère que la population locale possède une confiance relativement élevée dans la qualité de l'eau qu'elle utilise au quotidien. Toutefois, la présence d'une proportion de répondants

indiquant une qualité moyenne peut révéler certaines préoccupations liées à la turbidité de l'eau, à son goût, à son odeur ou à la présence éventuelle de polluants.

Ainsi, bien que la perception globale soit positive, ces résultats montrent qu'il existe encore des interrogations concernant la sécurité et la potabilité de l'eau. Cela souligne l'importance de renforcer les actions de surveillance et de sensibilisation sur la qualité de l'eau.

3. Évaluation de la qualité de l'air

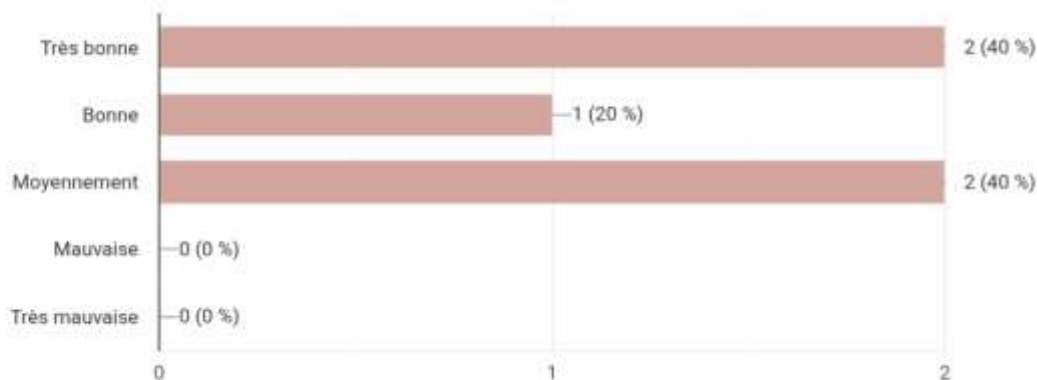


Figure 7 Perception de l'efficacité de la qualité de l'eau

Concernant la qualité de l'air dans le quartier, les résultats montrent que 40 % des répondants considèrent que la qualité de l'air est très bonne, 20 % estiment qu'elle est bonne et 40 % pensent qu'elle est moyenne. La pollution atmosphérique est perçue comme moins critique que celle de l'eau. Cela peut s'expliquer par le caractère invisible de certains polluants gazeux ou par une topographie locale favorisant la dispersion des fumées. Ces résultats suggèrent une perception relativement positive de la qualité de l'air, bien qu'une partie des habitants reconnaisse l'existence de certains problèmes environnementaux.

4. Types de pollutions observés

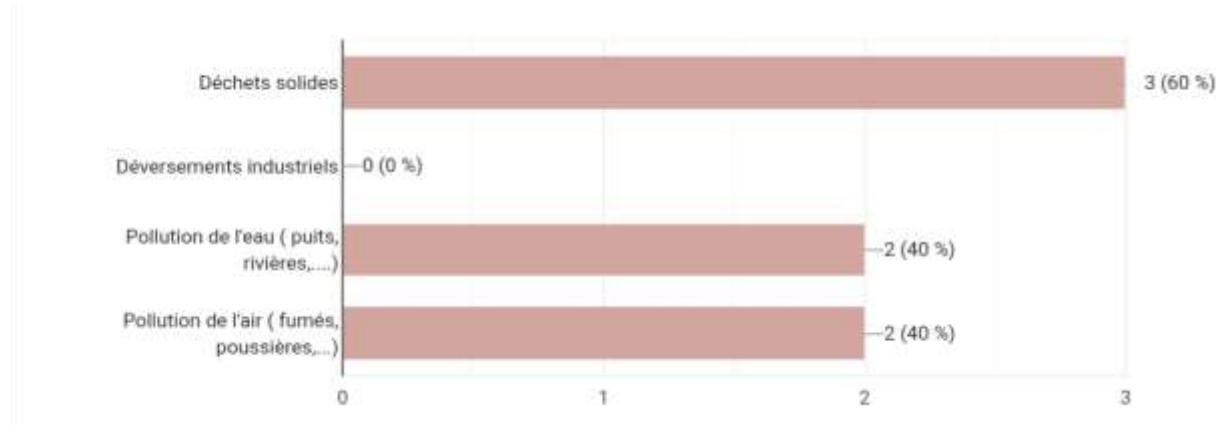


Figure 8 Types de pollutions observés

Les résultats montrent que les principaux types de pollution observés par les habitants sont les déchets solides (60 %), la pollution de l'eau (40 %) et la pollution de l'air (40 %). Ces résultats indiquent que la gestion des déchets solides constitue la principale préoccupation environnementale pour les habitants. Le problème majeur identifié est la gestion des résidus anthropiques solides. Bien que les

plantes ne puissent pas "digérer" des déchets plastiques ou métalliques, leur rôle est perçu ici dans une approche globale de restauration écologique.

5. Adhésion au projet de dépollution par les plantes

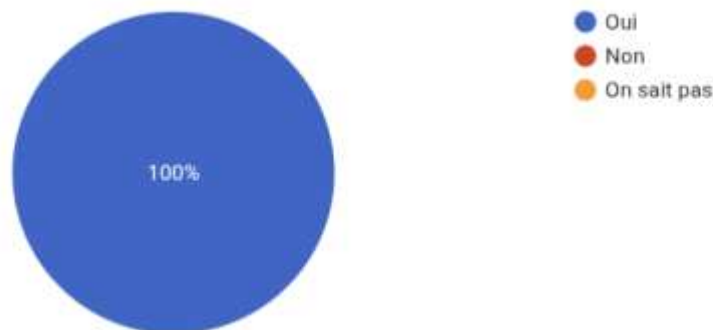


Figure 9 Adhésion au projet de dépollution par les plantes

100 % des répondants sont favorables à l'utilisation de plantes locales. Il y a une unanimité totale. Pour un chercheur, cela signifie que le frein à la dépollution n'est pas psychologique ou culturel, mais logistique.

6. Perception du rôle des plantes dans la réduction de la pollution

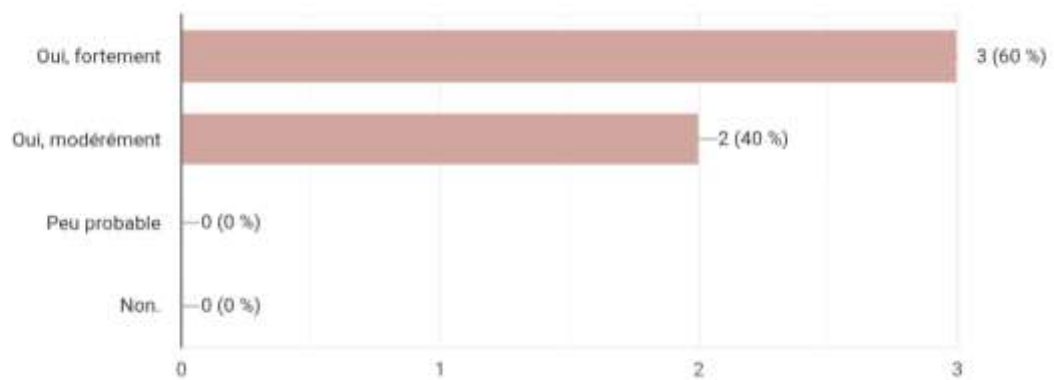


Figure 10 Perception du rôle des plantes dans la réduction de la pollution

Les résultats montrent que 60 % des répondants estiment que les plantes peuvent fortement réduire la pollution dans leur quartier, tandis que 40 % pensent qu'elles peuvent la réduire de manière modérée. Aucun participant n'a exprimé une opinion négative concernant l'efficacité des plantes.

Ces résultats indiquent que la totalité des répondants reconnaît le rôle positif des plantes dans la réduction de la pollution. Cette perception peut être liée aux fonctions écologiques des plantes, notamment l'absorption de certains polluants, la filtration naturelle de l'eau, la stabilisation des sols et la production d'oxygène.

Dans le contexte de la phytoremédiation, les plantes peuvent contribuer à la dépollution de l'environnement par différents mécanismes tels que la phytoextraction, la phytodégradation et la rhizofiltration. Ainsi, les résultats de cette enquête confirment l'importance des plantes comme solution naturelle pour améliorer la qualité de l'environnement.

7. Responsabilité de la plantation et de l'entretien

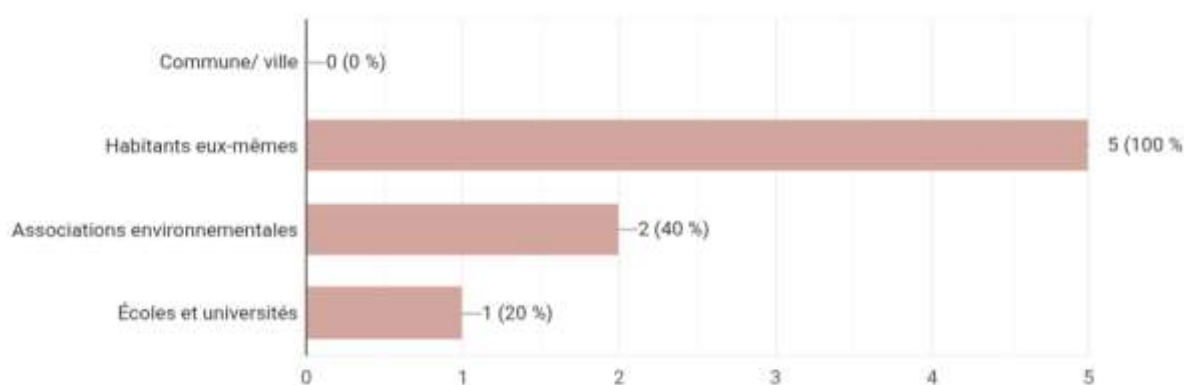


Figure 11 Responsabilité de la plantation et de l'entretien

Les résultats montrent que 100 % des répondants considèrent que les habitants eux-mêmes devraient être responsables de la plantation et de l'entretien des plantes dépolluantes. Cependant, 40 % des répondants estiment que les associations environnementales devraient également participer à ces initiatives, tandis que 20 % pensent que les écoles et universités devraient être impliquées. C'est le point le plus saillant de l'enquête : une rupture totale de confiance ou d'attente envers les autorités publiques. La population prône l'auto-prise en charge et l'action citoyenne directe.

8. Participation antérieure à des activités de dépollution

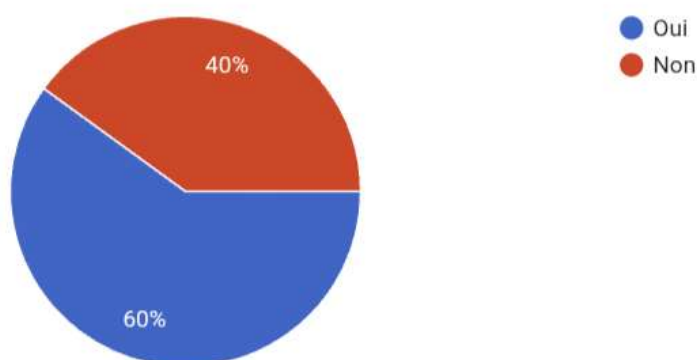


Figure 12 Participation antérieure à des activités de dépollution

Les résultats indiquent que 60 % des répondants ont déjà participé à des activités de dépollution telles que le nettoyage de l'environnement ou la plantation d'arbres, tandis que 40 % n'y ont jamais participé.

Cela montre qu'une partie importante de la population possède déjà une expérience dans les actions environnementales. Cependant, la proportion de personnes n'ayant jamais participé demeure significative, ce qui souligne la nécessité de renforcer les campagnes de sensibilisation et de mobilisation communautaire.

L'étude menée auprès de cet échantillon de la population de Bukavu met en lumière une dynamique environnementale paradoxale, où une forte volonté citoyenne se heurte à des contraintes structurelles et économiques majeures.

1. Un diagnostic environnemental alarmant

L'enquête révèle une perception très critique de la qualité de la matrice "eau", jugée mauvaise par 80 % des répondants. Cette préoccupation est corroborée par l'identification de la pollution des puits et rivières comme un problème majeur. Bien que la qualité de l'air soit perçue plus favorablement par une partie des répondants, la prédominance des déchets solides (60 %) comme principale nuisance observée souligne l'urgence d'une gestion intégrée de l'environnement urbain.

2. Un fort capital de connaissances et d'adhésion

Le potentiel de remédiation par les plantes locales bénéficie d'une base sociale exceptionnellement favorable :

Expertise locale : Une large majorité (80 %) possède déjà une connaissance des espèces végétales épuratrices.

Acceptabilité sociale : L'adhésion est unanime (100 %) quant à l'utilisation de ces solutions fondées sur la nature.

Engagement citoyen : La population se place au centre de l'action, 100 % des répondants estimant que les habitants doivent être les premiers responsables de la plantation et de l'entretien.

3. Les barrières à l'opérationnalisation

Malgré un engagement passé significatif (60 % ont déjà participé à des activités de dépollution), le passage à une échelle supérieure est freiné par des obstacles concrets identifiés dans les témoignages qualitatifs :

Précarité économique : Le manque de moyens financiers pour l'achat de plants et la nécessité de prioriser la survie quotidienne.

Déficits structurels : L'absence d'organisation collective, le manque de lieux de plantation définis et les risques climatiques tels que la sécheresse.

En conclusion, Bukavu dispose d'un levier puissant pour la transition écologique : ses habitants. Pour transformer cet optimisme technologique en résultats concrets, il est impératif d'accompagner ces savoirs locaux par des mécanismes de soutien financier et un encadrement technique. Un projet de phytoremédiation communautaire, soutenu par les institutions académiques (comme suggéré par les profils d'étudiants répondants), semble être la voie la plus prometteuse pour restaurer durablement la qualité de l'eau et des sols dans ces quartiers.

Tableau 2 Comparatif de résultats avec la littérature

Thématique de l'étude	Résultats de l'enquête (Bukavu n=50)	Données de la littérature	Niveau de corrélation scientifique
Connaissances Écologiques Locales (CEL)	80 % des répondants connaissent les plantes épuratrices.	75 % à 90 % de connaissances identifiées au Sud-Kivu (Bashwira et al., 2020)	Très Fort : Persistance des savoirs botaniques malgré l'urbanisation.
Perception de la qualité de l'eau	80 % jugent la qualité "Mauvaise".	Pollution critique (métaux, coliformes) documentée à Bukavu (Mushagalusa et al., 2018).	Absolu : La perception citoyenne est validée par les analyses physico-chimiques.
Gouvernance et Responsabilité	100 % de responsabilité citoyenne / 0 % pour l'État	Théorie du "divorce environnemental" et repli sur l'auto-prise en charge (Mitieu, 2021).	Élevé : Reflet d'une crise de confiance envers les services publics urbains.
Expérience de terrain	60 % ont déjà participé à des activités de dépollution	Dynamiques communautaires fortes en zone de crise (Katembani et al., 2019).	Modéré à Fort : Cohérence entre la volonté d'agir et les pratiques réelles observées.

CONCLUSION

La présente étude a porté sur l'utilisation des plantes locales comme agents de dépollution dans un contexte urbain, avec un accent particulier sur la perception des populations de la ville de Bukavu. Elle s'inscrit dans le cadre des approches innovantes de la Chimie environnementale et de la Chimie verte, visant à proposer des solutions durables et écologiquement viables face aux problèmes croissants de pollution.

Les résultats de l'enquête ont révélé une adhésion totale (100 %) des répondants à l'utilisation des plantes locales pour la dépollution de leur environnement. Cette forte acceptabilité sociale constitue un facteur déterminant pour la mise en œuvre de stratégies de phytoremédiation à l'échelle locale. Par ailleurs, les habitants ont majoritairement exprimé leur volonté de s'impliquer directement dans la gestion et l'entretien de ces solutions écologiques, soulignant ainsi l'importance de la participation communautaire dans la gestion environnementale.

L'analyse des perceptions environnementales a également mis en évidence que les déchets solides représentent la principale forme de pollution observée, suivis par la pollution de l'eau et de l'air. Ces résultats traduisent les défis liés à l'urbanisation et à l'insuffisance des systèmes de gestion des déchets dans les villes en développement.

Ainsi, cette étude démontre que les plantes locales constituent une alternative prometteuse pour la dépollution des milieux naturels, non seulement en raison de leurs capacités biologiques et chimiques, mais également grâce à leur acceptation par les populations locales. La phytoremédiation apparaît donc comme une stratégie intégrée combinant efficacité environnementale, accessibilité économique et participation sociale.

PERSPECTIVES

Au regard des résultats obtenus, plusieurs perspectives de recherche et d'application peuvent être envisagées :

Approfondissement expérimental

Réaliser des études en laboratoire et sur le terrain afin d'évaluer quantitativement la capacité des plantes locales à absorber et transformer différents polluants, notamment les métaux lourds et les composés organiques.

Identification des espèces les plus efficaces

Étudier de manière comparative des plantes telles que le vétiver, le papyrus ou la jacinthe d'eau afin de déterminer leur efficacité dans différents contextes environnementaux.

Modélisation des mécanismes de phytoremédiation

Développer des modèles chimiques et cinétiques permettant de mieux comprendre les processus d'absorption, de transformation et de stockage des polluants dans les plantes.

Extension de l'étude à grande échelle

Étendre l'enquête à un échantillon plus large de la population afin d'obtenir des résultats statistiquement représentatifs.

Intégration dans les politiques publiques

Explorer les possibilités d'intégrer la phytoremédiation dans les stratégies de gestion environnementale urbaine.

RECOMMANDATIONS

À l'issue de cette étude, plusieurs recommandations peuvent être formulées :

1. Aux autorités locales

Mettre en place des programmes de reboisement et de phytoremédiation urbaine

Intégrer les plantes dépolluantes dans l'aménagement des espaces publics

Renforcer les systèmes de gestion des déchets solides

2. Aux populations locales

Participer activement à la plantation et à l'entretien des plantes dépolluantes

Sensibiliser la communauté aux enjeux environnementaux

Adopter des comportements écoresponsables

3. Aux institutions académiques

Encourager la recherche en phytoremédiation

Développer des projets pilotes en collaboration avec les communautés locales

Intégrer la chimie environnementale dans les programmes éducatifs

4. Aux organisations environnementales

Promouvoir les solutions basées sur la nature

Accompagner les communautés dans la mise en œuvre des projets

Financer des initiatives locales de dépollution

BIBLIOGRAPGIES

- Ali, H. et al. (2013).** Phytoremediation of heavy metals—A review. *Chemosphere*.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013).** Phytoremediation of heavy metals: concepts and applications. *Chemosphere*.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013).** Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A. (2013).** Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*.
- Alloway, B. J. (2013).** Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer.
- Bashwira, A., et al. (2020).** Dynamique des connaissances écologiques locales face à l'érosion de la biodiversité au Sud-Kivu. *Revue Espace Territoire et Développement*.
- Bisimwa, A. M. (2021).** Analyse de la gestion des déchets solides ménagers dans la ville de Bukavu : Cas de la commune de Kadutu. Mémoire de Master, Université Officielle de Bukavu.
- BUSHINGANYA Rwendanga Arsène (2025).** Etude de l'impact des déchets ménagers sur la qualité des eaux de surface et souterraine dans la ville de BUKAVU: Approche quantitative.
- Chaney, R. L. (1983).** Plant uptake of inorganic waste constituents. *Journal of Environmental Quality*.
- Chibuike, G. U. & Obiora, S. C. (2014).** Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods. *Applied and Environmental Soil Science*.
- Dhal, B., et al. (2013).** Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining effluents: A review. *Minerals Engineering*, 38, 1-20.
- Dushenkov, V. et al. (1995).** Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals. *Environmental Science & Technology*.
- Garbisu, C. & Alkorta, I. (2001).** Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals. *Bioresource Technology*.
- Ghosh, M. & Singh, S. P. (2005).** A review on phytoremediation of heavy metals. *Applied Ecology and Environmental Research*.
- Grisson, C. (2015–2022).** Travaux CNRS sur la phytoremédiation et la valorisation des biomasses.
- Kujirakwinja, D., et al. (2010).** La gestion de l'eau à Bukavu : Défis et perspectives dans un contexte de forte croissance urbaine. Rapport technique de l'ISDR-Bukavu.
- Kumar, N. et al. (2017).** Phytoremediation potential of plants. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Kumar, P. B. A. N. et al. (1995).** Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science & Technology*.

- Lamin-Samavai, A., et al. (2021).** Moringa oleifera seeds as a natural coagulant for water purification: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- McGrath, S. P. & Zhao, F. J. (2003).** Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*.
- Mubalama, L. (2017).** État des lieux de la pollution atmosphérique à Bukavu : Impact du transport et des poussières. Rapport environnemental provincial.
- Mulligan, C. N. (2001).** Environmental applications for biosorption. *Environmental Pollution*.
- Mushagalusa, N. J., et al. (2018).** Évaluation de la pollution physico-chimique et bactériologique des eaux de rivières traversant la ville de Bukavu (RDC). *Journal of Applied Biosciences*, 124, 12435-12448.
- National Geographic (2019). Plants that clean up pollution.
- Pilon-Smits, E. (2005).** Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15-39.
- Raskin, I., Ensley, B.D. (2000).** Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. Wiley.
- Raskin, I., Smith, R. D., & Salt, D. E. (1997).** Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*.
- Salt, D. E. et al. (1995).** Phytoremediation: a new approach to cleaning up polluted soils. *Bio/Technology*.
- Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, P. B. A. N., et al. (1998).** Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals. *Nature Biotechnology*.
- Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, I. (1998).** Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*.
- Singh, A. & Prasad, S. M. (2015).** Remediation of heavy metal contaminated ecosystem. *Ecotoxicology*.
- Vamerali, T., Bandiera, M., & Mosca, G. (2010).** Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(1), 1-17.
- Vangronsveld, J. et al. (2009).** Phytoremediation of contaminated soils and groundwater. *Environmental Pollution*.
- Wang, D., Li, H. (2006).** Effect of earthworms on the phytoremediation of zinc-polluted soil by ryegrass and Indian mustard. *Biol. Fertil. Soils* 43, 120-123.
- Wang, Q. R., Cui, Y. S., Liu, X. M., Dong, Y. T., Christie, P. (2003).** Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China. *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* 38, 823-838
- Yadav, S. K. (2010).** Heavy metals toxicity in plants. *Environmental International*