



HAL
open science

Impacts de l'orpaillage et de l'agriculture sur la qualité des eaux du Liptako nigérien : identification des hotspots des pollutions métalliques et organiques, transferts de connaissances entre recherche et terrain

Oumar El Farouk Maman Illatou

► To cite this version:

Oumar El Farouk Maman Illatou. Impacts de l'orpaillage et de l'agriculture sur la qualité des eaux du Liptako nigérien : identification des hotspots des pollutions métalliques et organiques, transferts de connaissances entre recherche et terrain. Ingénierie de l'environnement. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom; Université Abdou Moumouni, 2021. Français. NNT : 2021EMAL0014 . tel-03624770

HAL Id: tel-03624770

<https://theses.hal.science/tel-03624770>

Submitted on 30 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR
DE L'INSTITUT MINES-TELECOM (IMT) –
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES D'ALÈS (IMT MINES ALÈS)
&
UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI DE NIAMEY**

En Sciences de la Terre et de l'Eau (STE)

Écoles doctorales

GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau – portée par l'Université de Montpellier
SVT – Sciences de la Vie et de la Terre – portée par l'Université Abdou Moumouni de Niamey

Unité de recherche HydroSciences Montpellier

**Impacts de l'orpillage et de l'agriculture sur la qualité
des eaux du Liptako nigérien : identification des hots
spots des pollutions métalliques et organiques, transferts
de connaissances entre recherche et terrain**

**Présentée par Oumar El Farouk MAMAN ILLATOU
Le 16 décembre 2021**

Sous la direction de Marc VINCHES, Moussa KONATE, et Ousmane BOUREIMA

Devant le jury composé de

| | |
|---|-------------------|
| Mme. Laurence MAURICE, DR IRD, GET Toulouse, France | Rapporteuse |
| M. Serigne FAYE, Professeur, Université Cheikh Anta Diop, Sénégal | Rapporteur |
| Mme. Juliette CERCEAU, Maître de Conférence, IMT Mines Alès, France | Examinatrice |
| M. Yann GUNZBERGER, Professeur, Université de Lorraine, France | Examinateur |
| M. Séverin PISTRE, Professeur, Université de Montpellier, France | Président du jury |
| Mme. Haoua Seyni SABO, Professeur, Université Abdou Moumouni, Niger | Examinatrice |
| M. Moussa KONATE, Professeur, Université Abdou Moumouni, Niger | Co-Directeur |
| M. Marc VINCHES, Professeur, IMT Mines Alès, France | Co-Directeur |



A mon père, à ma mère, aux membres de ma famille,
et à chacune des personnes qui m'ont aidé.

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé après mon parcours de mastère spécialisé en « Exploitation et Environnement Miniers » à IMT Mines Alès. Il est le fruit de nombreuses collaborations et rencontres avec différentes personnes et institutions en France et au Niger.

J'adresse donc ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse le Professeur Marc VINCHES pour m'avoir accueilli au CREER à l'IMT Mines Alès après m'avoir enseigné en géostatistique lors de mon mastère. Au-delà de ses conseils scientifiques, techniques et diplomatiques et ses contributions, je note également sa disponibilité à répondre à mes sollicitations durant toutes les étapes de la thèse et son sens de l'écoute et de l'accompagnement. Je lui exprime toute ma gratitude.

Je rends hommage à mon directeur de thèse, feu le Professeur Ousmane BOUREIMA, décédé au cours de ma deuxième année de thèse et avec qui nous avons commencé le premier travail de cadrage de la thèse, notamment du plan d'échantillonnage. Je n'oublierai pas sa disponibilité pour mon accompagnement et ses conseils notamment sur la partie hydrogéologie de la thèse.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse le Professeur Moussa KONATE, qui a pris les travaux en cours et m'a apporté une aide scientifique inestimable et de précieux conseils dans l'interprétation des résultats et l'amélioration du manuscrit. Je lui exprime toute ma gratitude pour son attention, sa disponibilité et son soutien moral durant la thèse.

Ayant travaillé sur trois thématiques différentes, j'ai bénéficié d'un encadrement de diverses personnes et plusieurs laboratoires. Je tiens donc à remercier la Docteur Juliette CERCEAU qui m'a apporté une nouvelle énergie grâce à son encadrement, et du fait de ses connaissances expertes en sciences sociales et humaines. Elle m'a donné les clefs scientifiques d'application des sciences sociales, qui m'ont permis de travailler directement avec les parties prenantes de l'orpaillage au Liptako nigérien, et de co-construire un dispositif de transfert de connaissance rechercher-terrain. Je lui exprime ma gratitude pour sa disponibilité et ses contributions à la cohérence de l'ensemble du document.

Mes remerciements s'adressent à l'équipe CREER notamment pour mes travaux sur les polluants organiques. Merci à la Professeure Catherine GONZALEZ pour son encadrement sur la connaissance des pesticides, les techniques d'échantillonnage et les analyses. J'exprime particulièrement mes remerciements à Sylvie SPINELLI, Murielle AVEZAC et Marine BERTRAND pour la préparation des campagnes d'échantillonnage et les analyses au laboratoire.

Un grand merci à HSM pour son appui financier lors de mon séjour de soutenance et à son personnel pour l'accueil, le soutien et la sympathie dont j'ai bénéficié lors de la préparation des campagnes d'échantillonnage et d'analyses des échantillons. Merci à Corinne CASIOT pour son soutien scientifique dans le domaine de l'hydrogéochimie et sa disponibilité. Je remercie également Jacques GARDON pour son soutien dans l'obtention de la bourse du SCAS de l'ambassade de France à Niamey. Je tiens également à remercier Patrick LACHASSAGNE, Emmanuelle CADOT, Remi FREYDIER, Sophie DELPOUX, Eléonore RESONGLES et Mylène MARIE.

Je remercie l'Ambassade de France à Niamey de m'avoir accordé la bourse de mobilité avec le soutien de Campus France en particulier Régis GUILLAUME, Barira IBRAHIM, Issa MAHAMAN, Sylvain CLOUPET et Arielle MICHEL. Un grand merci à IMT Mines Alès pour son appui financier en particulier à Monsieur Thierry DE MAZANCOURT, et au laboratoire CREER pour l'accueil et le soutien des travaux. Merci particulièrement à la directrice du laboratoire la Professeure Anne JOHANNET, à Noémie FAYOL, Pierre-Alain AYRAL, Guillaume JUNQUA, Miguel LOPEZ-FERBER, et à tout le personnel.

Je remercie également le LMI Minerwa, notamment David BARATOUX et Odile BRUNEEL, pour le soutien financier dont j'ai bénéficié pour la finalisation de la thèse.

Merci aux enseignants chercheurs des universités du Niger pour leurs conseils : Professeur Yacoubou BAKASSO, Professeur Moussa HAROUNA, Docteur Yahaya NAZOU MOU, Docteur Issoufou

SANDAO, Docteur Abdoukader MOUSSA ISSAKA, Docteur Maman Sani ABDOU BABAYE, Docteur Ibrahim WAGANI et Docteur Mahamadou ILLOU.

J'adresse mes sincères remerciements aux rapporteurs qui ont accepté d'évaluer ce travail : Madame Laurence MAURICE, Directrice de Recherche IRD, au Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET), Toulouse et Monsieur Serigne FAYE, Professeur à l'Université Cheikh Anta Diop au Sénégal. Merci à Monsieur Séverin PISTRE, Professeur à l'Université de Montpellier d'avoir accepté de présider le Jury. Merci également à l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté d'examiner cette thèse : Madame Juliette CERCEAU, Maître de conférences à IMT Mines Alès, Monsieur Yann GUNZBERGER, Professeur à l'Université de Lorraine et Madame Haoua Seyni SABO, Professeur à l'Université Abdou Moumouni de Niamey. Je souhaite également exprimer ma reconnaissance aux membres de mon comité de thèse : Monsieur Christian LEDUC et Madame Véronique MERRIEN.

Je remercie très chaleureusement la représentation de l'IRD Niamey, Monsieur Guillaume FAVREAU, pour mon accueil dans ses locaux, son appui pour les missions de terrain et la mise à disposition d'un espace d'extraction des molécules. J'exprime ma gratitude à l'ancien représentant de l'IRD à Niamey, Monsieur le Professeur Oumarou MALAM ISSA pour ses encouragements lors de la sélection. Merci également aux personnels de l'IRD Niamey et aux doctorants pour l'accueil, la sympathie et l'accompagnement qu'ils m'ont réservés : Marie, Maïnassara, Farida, David, Tahirou, Koné, Abass, Aliko, Oumou, Bodo, Boukari, Rabilou, Hadjara, Ali et Abdramani.

Mes sincères remerciements au Directeur Général du bureau d'étude KRB Ingénieurs Conseils, Amadou Roufai INTCHI, pour ses conseils et son soutien financier et logistique lors des travaux de terrain. Merci également au personnel de KRB pour ses conseils et la reproduction des documents : tantie Kounni, Adamou, Mahamadou, Hamani, Boureima, Djido, Judith et Kader stagiaire du PRRIA.

Je remercie l'ONG EIRENE Sahel pour son appui financier et son accompagnement ainsi que son personnel, notamment le coordinateur, Joroen, le responsable du programme, Boniface, et l'assistant technique, Emmanuel. Merci particulièrement à Tchougoune pour sa disponibilité lors des missions de terrain et les entretiens avec les orpailleurs. Merci également aux responsables des cadres de concertation des sites d'orpillage pour leur accompagnement bienveillant et efficace lors des missions d'échantillonnage : Adamou, Ali, Djibo et Idde.

Merci à Boubacar Djafarou pour son accompagnement dans la prise de notes, la traduction et la transcription des verbatims lors de l'atelier des orpailleurs.

La réalisation de ce travail a permis d'effectuer une partie du chemin avec plusieurs personnes. A Alès, je remercie Philippe-Lionel EBENGUE-ATEGA, avec qui nous avons échangé sur les pollutions minières. Merci également à Ahmed DEBELA, Bob SAINT-FLEUR, Cagri-Alperen INAN, Antoine FRICARD et Fabienne-Emilie ERRERO. Au Niger, je remercie les personnes qui m'ont assisté lors des périodes de collecte de données : Ibrahim Mahadaou, Balkissa ZOUBEIROU, Bachir AMBARKA, Abdoulaye BACHARD et Oumou Kaltoum HAMA.

Enfin, je tiens à remercier ma maman Hadjia Saâdé SOULEY pour ses prières, ses conseils et ses encouragements ; ma femme Halima HADI SOULEY pour sa patience, son amour et sa disponibilité à s'occuper de la famille ; mes enfants Ahmed, Zoubeida et Ousmane pour leur patience face à mes multiples absences. Merci également à mes frères et sœurs : Oum Koulssoum, Ibrahim dit Papa, Abdoukarim, Zoubeida, Soueba et Nadia pour leur soutien à la réalisation de cette thèse. Je vous adresse mes sentiments de gratitude et de reconnaissance.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| REMERCIEMENTS..... | 4 |
| LISTE DES TABLEAUX | 8 |
| RESUME..... | 12 |
| CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE | 14 |
| 1.1 Etat de l’art sur les pollutions métalliques et organiques..... | 14 |
| 1.1.1 Pollutions métalliques liées à l’exploitation artisanale de l’or..... | 14 |
| 1.1.2 Pollutions organiques liées à l’utilisation des pesticides..... | 17 |
| 1.2 Principaux enjeux liés à la pollution des eaux dans le Liptako nigérien..... | 24 |
| 1.2.1 Enjeux liés à la pollution métallique | 25 |
| 1.2.2 Enjeux liés à la pollution organique | 26 |
| 1.3 Problématique de la thèse..... | 27 |
| 1.4 Hypothèses de travail | 27 |
| 1.5 Objectifs et structuration de la thèse | 27 |
| CHAPITRE II : CONTEXTE DE LA ZONE D’ETUDE | 31 |
| 2.1 Contexte géographique..... | 31 |
| 2.1.1 Présentation de la zone d’étude | 31 |
| 2.1.2 Démographie et activités économiques | 33 |
| 2.2 Contexte géologique du Liptako nigérien | 33 |
| 2.2.1 Socle précambrien | 34 |
| 2.2.2 Continental terminal (Ct) | 35 |
| 2.2.3 Levé de coupe géologique..... | 36 |
| 2.3 Contexte hydrogéologique et hydrologique du Liptako nigérien..... | 36 |
| 2.3.1 Contexte hydrogéologique | 36 |
| 2.3.2 Contexte hydrologique | 37 |
| 2.3.3 Qualité des ressources en eau..... | 38 |
| 2.3.4 Levé de coupe hydrogéologique..... | 39 |
| 2.4 Techniques d’extraction, contexte socio-économique de l’exploitation aurifère dans le Liptako nigérien..... | 40 |
| 2.4.1 Ressources aurifères et techniques d’extraction..... | 40 |
| 2.4.2 Contexte socio-économique de l’exploitation aurifère | 41 |
| 2.5 Contexte socio-économique de l’utilisation de pesticides dans le bassin hydrographique du fleuve Niger..... | 43 |
| CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES : échantillonnage et techniques analytiques | 46 |
| 3.1 Techniques analytiques | 46 |
| 3.1.1 Prélèvement et préparation des échantillons | 46 |
| 3.1.2 Méthodes analytiques | 58 |
| 3.2 Méthodologie d’enquête sur les pratiques agricoles et utilisation des pesticides | 62 |
| CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION | 64 |
| 4.1 Résultats | 64 |
| 4.1.1 Composition minéralogique et chimique des roches..... | 64 |
| 4.1.2 Concentration en éléments traces dans les eaux souterraines | 68 |
| 4.1.3 Concentration en éléments majeurs dans les eaux souterraines | 80 |
| 4.1.4 Concentration en métaux et en métalloïdes des rivières | 89 |
| 4.1.5 Concentration en pesticides polaires des eaux du fleuve Niger et la rivière Mékrou | 92 |
| 4.2 Discussion | 102 |
| 4.2.1 Analyse de l’hydrochimie des eaux de la zone d’étude | 102 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.2 Statistiques descriptives multidimensionnelles et origines des métaux et métalloïdes dans les eaux..... | 103 |
| 4.2.3 Risque d'exposition à l'arsenic et aux autres éléments traces des ressources en eau | 114 |
| 4.2.4 Évaluation des risques d'exposition humaine à l'arsenic..... | 116 |
| 4.2.5 Origine de la contamination des eaux par les pesticides | 120 |
| CHAPITRE V : TRANSFERT DE CONNAISSANCE RECHERCHE – TERRAIN SUR LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ET SANITAIRES DE LA POLLUTION DES EAUX PAR LES ACTIVITES HUMAINES AU LIPTAKO NIGERIEEN | 129 |
| 5.1 Enjeux du transfert de connaissances recherche – terrain..... | 129 |
| 5.1.1 Etat des lieux des actions de sensibilisation sur les pollutions de l'eau et la santé environnementale au Liptako nigérien | 129 |
| 5.1.2 Portée et limites de ces actions sur la prise de conscience et le changement des pratiques | 131 |
| 5.1.3 Préoccupations socio-environnementales et sanitaires : observations de terrain..... | 132 |
| 5.2 Préalables épistémologique et méthodologique à la conception d'un dispositif de transfert de connaissance recherche-terrain..... | 135 |
| 5.2.1 Posture épistémologique | 135 |
| 5.2.2 Parti-pris méthodologique | 136 |
| 5.3 Modélisation..... | 137 |
| 5.3.1 Acteurs - Modélisation d'un village typique..... | 138 |
| 5.3.2. Acteurs – Cartographie des principaux acteurs..... | 139 |
| 5.3.3 Interactions et Dynamiques sociales | 140 |
| 5.3.4. Ressources : modélisation d'un socle géologique aurifère | 140 |
| 5.3.5. Dynamiques techniques d'orpaillage – impacts sur les ressources territoriales | 142 |
| 5.3.6. Dynamique technique d'orpaillage – Santé humaine : création d'indicateur des risques sanitaires..... | 143 |
| 5.3.7. Un premier effort de modélisation : discussion sur la simplification/amplification | 147 |
| 5.3.8. Du modèle au jeu sérieux « LIPTAKOR » | 149 |
| 5.4. Evolution du modèle et accompagnement | 151 |
| 5.4.1 Première étape : le jeu numérique | 151 |
| 5.4.2 Deuxième étape : le jeu de plateau | 156 |
| 5.5 Atelier de formation et de sensibilisation des acteurs de l'orpaillage avec « LIPTAKOR » et un dispositif d'animation et d'observation..... | 163 |
| 5.5.1 Description de l'atelier des orpailleurs..... | 163 |
| 5.5.2 Animation et déroulement de l'atelier..... | 164 |
| 5.5.3 Description du dispositif d'observation | 169 |
| 5.5.4 Evolution des connaissances et des pratiques des orpailleurs..... | 170 |
| CHAPITRES VI : CONCLUSION GENERALE | 178 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 182 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 : Quelques familles chimiques de pesticides et leurs cibles principales (INSERM. 2013)..... | 19 |
| Tableau 2 : Bilan des campagnes d'échantillonnage des rivières et forages..... | 49 |
| Tableau 3 : Bilan des sites échantillonnés..... | 55 |
| Tableau 4 : Bilan des campagnes de prélèvements. | 57 |
| Tableau 5 : Limite de détection (LOD) et de quantification (LOQ) obtenues par HPLC/MS et limite de quantification (LOQ) calculée pour les échantillons d'eau (Poulier et al., 2014) et les taux d'accumulation déterminés au laboratoire. | 59 |
| Tableau 6 : Concentration en éléments majeurs et traces dans les échantillons de roches des zones d'orpaillage..... | 67 |
| Tableau 7 : Résultat des analyses statistiques des concentrations en éléments traces métalliques. | 68 |
| Tableau 8 : Valeurs guides et limites de qualité de certains éléments traces recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé. | 70 |
| Tableau 9 : Résultat des analyses statistiques des paramètres physico-chimiques principaux (pH, conductivité) et des concentrations (en mg/L) en éléments majeurs et en éléments traces métalliques. | 80 |
| Tableau 10 : Résultat des statistiques élémentaires des métaux et métalloïdes des eaux des rivières dissous dans les eaux des rivières (en µg/L). | 89 |
| Tableau 11 : Résultat des statistiques élémentaires des métaux et des métalloïdes dans les matières en suspension (µg/g de matière sèche)..... | 90 |
| Tableau 12 : Résultat des statistiques élémentaires des métaux et des métalloïdes dans les sédiments (µg/g de matière sèche). | 91 |
| Tableau 13 : Résultat des concentrations en arsenic des rivières Sirba, Dargol et Goroubi en µg/L..... | 109 |
| Tableau 14 : Hypothèses du calcul d'évaluation de risque d'exposition à l'arsenic par voie orale..... | 117 |
| Tableau 15 : Résultat des calculs d'exposition. | 118 |
| Tableau 16 : Les différentes Valeur Toxicologique de Référence (VTR). | 119 |
| Tableau 17 : Inventaire des substances actives utilisées dans l'agriculture le long du fleuve Niger à Niamey. | 121 |
| Tableau 18 : Quotient des risques écologiques de sites d'échantillonnage sur la base d'atrazine et de diuron sur trois niveaux trophiques. | 128 |
| Tableau 19 : Aspect démographique et activités des habitants du village au démarrage du jeu..... | 138 |
| Tableau 20 : Répartition des emplois entre les agricultures et les orpailleurs. | 139 |
| Tableau 21 : Répartition de l'or par parcelle du socle géologique..... | 141 |
| Tableau 22 : Répartition de la population exposée sur le territoire. | 143 |
| Tableau 23 : Répartition des femmes enceintes et enfants vulnérables à la pollution. | 144 |
| Tableau 24 : Calcul d'indicateur de risque d'exposition des populations (Intensité de l'aléa)..... | 145 |
| Tableau 25 : Calcul d'indicateur de risque d'exposition des populations (Probabilité). | 145 |
| Tableau 26 : Enjeux sur l'eau et l'air au premier tour. | 146 |
| Tableau 27 : Echelle des niveaux de risque. | 146 |
| Tableau 28 : Répartition des cartes d'acteurs et les ressources attribués au démarrage du jeu. | 152 |
| Tableau 29 : Eléments verbaux et non verbaux. | 161 |
| Tableau 30 : Données utilisées pour le calibrage du jeu et les hypothèses de calcul..... | 201 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Structuration générale de la thèse | 30 |
| Figure 2 : Carte de localisation de la zone d'étude. | 31 |
| Figure 3 : Zones agro-climatiques du Niger (source : DMN, pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1975-2004). | 33 |
| Figure 4 : Carte géologique simplifiée de la dorsale de Man (Milési et al., 1989). | 34 |
| Figure 5 : Coupe géologique NNW – SSE du Liptako nigérien montrant la succession des plutons granitoïdiques et des ceintures de roche vertes. | 36 |
| Figure 6 : Coupe hydrogéologique NNW – SSE montrant l'aquifère des altérites dans le pluton d'Ayorou. | 39 |
| Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la zone d'étude montrant la localisation des sites de prélèvement, la grille d'échantillonnage et les sites d'orpillage. Les traits de coupes géologique et hydrogéologique A-B et CD sont représentés en pointillés. | 48 |
| Figure 8 : Prélèvement des échantillons d'eau dans les puits et les forages. | 50 |
| Figure 9 : Localisation des sites d'échantillonnage des eaux de surface sur la grille d'échantillonnage. | 51 |
| Figure 10 : Prélèvement des échantillons d'eau dans la rivière Sirba. | 53 |
| Figure 11 : Echantillons par POCIS | 56 |
| Figure 12 : Dispositif d'extraction installé à IRD Niamey..... | 57 |
| Figure 13 : Déroulement des enquêtes de terrain sur le périmètre irrigué de Liboré | 63 |
| Figure 14 : Image au MEB du basalte avec un exemple de spectre EDS correspondant à la pyrite. | 65 |
| Figure 15 : Image au MEB de la diorite avec un exemple de spectre EDS correspondant à la chalcopyrite. | 65 |
| Figure 16 : Image au MEB du basalte avec un exemple de spectre EDS correspondant à la chalcopyrite. | 65 |
| Figure 17 : Image au MEB des schistes de Doumba avec un exemple de spectre EDS correspondant à la chalcocite..... | 66 |
| Figure 18 : Image au MEB du basalte avec un exemple de spectre EDS correspondant à la pentlandite.... | 66 |
| Figure 19 : Images au MEB de la veine de diorite quartzique du pluton de Torodi avec un exemple de spectre EDS correspondant à du dioxyde de manganèse. | 67 |
| Figure 20 : Images au MEB du basalte avec un exemple de spectre EDS correspondant à de la barytine. | 67 |
| Figure 21 : Variation des concentrations en arsenic dans la zone d'étude. | 71 |
| Figure 22 : Carte de distribution des concentrations en arsenic. | 72 |
| Figure 23 : Variation des concentrations en manganèse dans la zone d'étude..... | 73 |
| Figure 24 : Carte de distribution des concentrations en manganèse..... | 74 |
| Figure 25 : Concentrations en cobalt dans les eaux souterraines. | 75 |
| Figure 26 : Carte de distribution et des concentrations en cobalt..... | 75 |
| Figure 27 : Concentration en nickel dans les eaux souterraines..... | 76 |
| Figure 28 : Variation des concentrations en Baryum. | 77 |
| Figure 29 : Carte de distribution des concentrations en Baryum. | 78 |
| Figure 30 : Variation des concentrations en bore..... | 79 |
| Figure 31 : Carte de distribution des concentrations en Bore. | 79 |
| Figure 32 : Variation de la conductivité électrique des eaux souterraines | 81 |
| Figure 33 : Variation du pH des eaux souterraines. | 82 |
| Figure 34 : Variation des concentrations en nitrates. | 83 |

| | |
|--|-----|
| Figure 35 : Carte de localisation des sites ayant les concentrations les plus élevées en nitrates..... | 83 |
| Figure 36 : Variation des concentrations en bromure dans les eaux souterraines. | 84 |
| Figure 37 : Localisation des sites où les concentrations en bromure dans les eaux ont été mesurées..... | 85 |
| Figure 38 : Variation de la concentration en fluor des sites investigués. | 86 |
| Figure 39 : Carte de distribution des concentrations en fluor. | 86 |
| Figure 40 : Diagramme de Piper du secteur d'étude | 87 |
| Figure 41 : Diagramme de corrélation entre le bicarbonate et le magnésium..... | 88 |
| Figure 42 : Fréquence de détection des herbicides et fongicides de la zone d'étude. | 93 |
| Figure 43 : Fréquence de quantification des herbicides et fongicides de la zone d'étude..... | 93 |
| Figure 44 : Site F1 sur le fleuve Niger, en provenance du Mali. | 97 |
| Figure 45 : Résultat des analyses du site F1..... | 97 |
| Figure 46 : Résultat des analyses du site F2..... | 98 |
| Figure 47 : Site F3 sur le fleuve Niger, en amont de la ville de Niamey. | 98 |
| Figure 48 : Résultat des analyses du site F3..... | 99 |
| Figure 49 : Site F4 sur le fleuve Niger, en aval de la ville de Niamey..... | 99 |
| Figure 50 : Résultat des analyses du site F4..... | 100 |
| Figure 51 : Site F6, à la confluence entre le Fleuve Niger et la rivière Mékrou. | 100 |
| Figure 52 : Résultat des analyses du site F6..... | 101 |
| Figure 53 : Site F7, dans la partie aval du fleuve Niger en territoire nigérien. | 101 |
| Figure 54 : Résultat des analyses du site F7..... | 102 |
| Figure 55 : Projection des caractéristiques physico-chimiques et des concentrations en éléments traces métalliques des eaux souterraines sur le plan factoriel F1-F2..... | 105 |
| Figure 56 : Concentration en arsenic en fonction de la conductivité dans les eaux de surface des rivières Sirba, Dargol et Goroubi. | 109 |
| Figure 57 : Résultat en facteur d'enrichissement dans les MES. | 111 |
| Figure 58 : Résultat en facteur d'enrichissement dans les sédiments. | 111 |
| Figure 59 : Projection des caractéristiques physico-chimiques et des concentrations en éléments traces métalliques des eaux des rivières sur le plan factoriels F1-F2. | 113 |
| Figure 60 : Concentration du diuron par rapport à la hauteur d'eau et aux précipitations. | 124 |
| Figure 61 : Concentration de l'atrazine par rapport à la hauteur d'eau et aux précipitations..... | 124 |
| Figure 62 : Extraction de l'or par les femmes avec la méthode gravimétrique sur le site de Komabangou. | 133 |
| Figure 63 : Evacuation des bassins de cyanuration et manipulation de cyanure sans équipement de protection..... | 133 |
| Figure 64 : Récupération de l'or dans le village de Nbanga et à proximité des écoles..... | 134 |
| Figure 65 : Quelques maladies dermatologiques notifiées par le CSI de Komabangou. | 134 |
| Figure 66 : Eaux d'eau utilisées pour la consommation humaine..... | 135 |
| Figure 67 : Relation possible entre les différents acteurs..... | 140 |
| Figure 68 : Identification des impacts de l'exploitation artisanale de l'or par phase d'extraction et de traitement..... | 142 |
| Figure 69 : Modèle des dynamiques et des interactions entre acteurs et ressources du territoire. | 147 |
| Figure 70 : Dialectique réduction – amplification (Latour, 1993). | 148 |
| Figure 71 : Transposition des données en éléments du jeu. | 150 |
| Figure 72 : Présentation du plateau numérique du jeu « LIPTAKOR »..... | 151 |
| Figure 73 : Carte « acteurs » comme élément de jeu et d'observation..... | 152 |

| | |
|---|-----|
| Figure 74 : Catalogue des choix technologiques..... | 152 |
| Figure 75 : Session du jeu numérique « LIPTAKOR »..... | 154 |
| Figure 76 : Plateau physique du jeu. | 157 |
| Figure 77 : Cartes de filon..... | 158 |
| Figure 78 : Session du jeu de plateau « LIPTAKOR ». | 159 |
| Figure 79 : Présentation d'un jeu de 28 images. | 165 |
| Figure 80 : Classement des principaux risques par les participants. | 167 |
| Figure 81 : Vote par couleur..... | 167 |
| Figure 82 : Dispositif du jeu..... | 169 |
| Figure 83 : Comptoir d'achat du choix technologique et divers matériel. | 169 |

RESUME

Dans le Liptako nigérien, la qualité des eaux est mise en péril par le développement des exploitations artisanales d'or et par l'utilisation accrue de pesticides. Aussi, il apparaît important de mener des investigations pour identifier les sources de pollution des eaux, afin de préserver la santé des populations et les équilibres des écosystèmes. Cette thèse a pour objectif 1/ d'évaluer la qualité des eaux du Liptako nigérien, 2/ de déterminer les sources des contaminations éventuelles, et 3/ de favoriser l'émergence de nouvelles pratiques en proposant un outil de transfert de connaissances.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs techniques analytiques ont été utilisées. Il s'agit notamment de : l'ICP/MS, la chromatographie ionique, l'analyse au MEB-EDS et HPLC/MS.

Les résultats d'analyse des eaux souterraines ont révélé des concentrations en arsenic et en baryum significativement supérieures aux valeurs guides de l'OMS. Les concentrations excédant les limites de qualité dans les deux environnements géologiques sont relatives au manganèse, au nickel et au bore. Les méthodes de statistique descriptive ont permis de distinguer un faciès principal de type bicarbonaté calcique et magnésien. Les résultats de la MEB-EDS ont montré la présence de minéraux sulfurés et des oxydes de manganèse. L'origine de l'arsenic, dans les eaux souterraines, semble être associée à l'altération des minéraux sulfurés et aux conditions légèrement alcalines et oxydantes favorisant la désorption de l'arséniate de la surface des oxydes de fer et de manganèse. La consommation des eaux souterraines riches en arsenic et en certains métaux traces présente des risques graves pour la santé humaine dans les zones d'orpaillage.

Les analyses en pesticides des eaux ont permis de détecter, localement, les composés présentant des concentrations largement supérieures aux valeurs guides de l'OMS et de la directive EU : pour le diuron, l'atrazine et l'acétochlore. Des mauvaises pratiques d'application des pesticides entraînent la contamination des eaux : 70% des pesticides utilisés ne sont pas homologués par le CILSS. La principale source de pesticides dans les eaux de rivières est liée à leur utilisation intensive dans l'agriculture urbaine, près de Niamey, et pour la production du coton, pour la Mékrou. Ces concentrations élevées en diuron, atrazine, et acétochlore, soulèvent des questions pour la santé des maraîchers.

Pour sensibiliser les populations sur les problèmes de la contamination des eaux, un dispositif de transfert de connaissances recherche – terrain a été élaboré. Ce dispositif, basé sur les principes de la modélisation d'accompagnement, a permis la co-construction des savoirs sur les dispositions à prendre pour atténuer la contamination des eaux.

Mots clés : Liptako nigérien, Arsenic, Eléments traces métalliques, Pollution, Eau, Pesticides, Fleuve Niger, Rivière Mékrou, Jeu sérieux, Modélisation d'accompagnement, POCIS

SUMMARY

In Niger's Liptako region, water quality is endangered by the development of artisanal gold mining and by the increased use of pesticides. Therefore, it appears important to carry out investigations to identify the sources of water pollution, in order to preserve the health of the populations and the balance of the ecosystems. The objectives of this thesis are 1/ to evaluate the quality of the waters of the Niger Liptako, 2/ to determine the sources of possible contamination, and 3/ to promote the emergence of new practices by proposing a knowledge transfer tool.

To achieve these objectives, several analytical techniques were used. These include: ICP/MS, ion chromatography, SEM-EDS and HPLC/MS.

The results of the groundwater analysis revealed arsenic and barium concentrations significantly above the WHO guideline values. Concentrations exceeding the quality limits in both geological environments were for manganese, nickel and boron. Descriptive statistics methods allowed to distinguish a main facies of calcic and magnesian bicarbonate type. SEM-EDS results showed the presence of sulfide minerals and manganese oxides. The origin of the arsenic in the groundwater appears to be associated with alteration of the sulfide minerals and slightly alkaline and oxidizing conditions favoring desorption of arsenate from the surface of iron and manganese oxides. The consumption of groundwater rich in arsenic and certain trace metals poses serious risks to human health in gold mining areas.

Pesticide analyses of the water have made it possible to detect, locally, compounds with concentrations well above the guide values of the WHO and the EU directive: for diuron, atrazine and acetochlor. Poor pesticide application practices lead to water contamination: 70% of the pesticides used are not registered by the CILSS. The main source of pesticides in river water is related to their intensive use in urban agriculture, near Niamey, and for cotton production, for the Mekrou. These high concentrations of diuron, atrazine, and acetochlor raise questions about the health of market gardeners.

To sensitize the population to the problems of water contamination, a research-field knowledge transfer system was developed. This device, based on the principles of companion modeling, allowed the co-construction of knowledge on the provisions to be taken to mitigate water contamination.

Key words: Niger Liptako, Arsenic, Trace metals, Pollution, Water, Pesticides, Niger River, Mékrou River, Serious game, Accompanying modeling, POCIS

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

1.1 Etat de l'art sur les pollutions métalliques et organiques

1.1.1 Pollutions métalliques liées à l'exploitation artisanale de l'or

L'orpaillage, une source de pollution des eaux

Le développement des exploitations minières industrielles et artisanales en général, est une source possible de pollution, et de rupture locale d'équilibres chimiques des terrains de surface. Ce qui peut entraîner des déplacements de polluants métalliques comme l'arsenic et certains métaux lourds, nocifs à la santé humaine. Les techniques d'extraction utilisées sont différentes selon le type de gisement. Qu'elles soient superficielles ou par puits, par amalgamation ou cyanuration, elles génèrent des impacts environnementaux et sanitaires dans les zones d'exploitation artisanale d'or.

Dans la zone du Liptako nigérien, l'exploitation artisanale de l'or est réalisée selon les phases suivantes : extraction, prétraitement, traitement et récupération de l'or. Les impacts environnementaux et sanitaires peuvent être générés au cours de chacune des phases.

En phase d'extraction, les potentiels impacts sur l'environnement sont : (i) la destruction du paysage et des habitats fauniques, (ii) la dégradation du sol et du couvert végétal, (iii) la disparition des terres de culture, (iv) la modification des lits de certains cours d'eau et (v) le dénoyage intensif des nappes d'eau souterraines. L'impact sanitaire le plus important est lié à la consommation de l'eau issue du dénoyage, sans connaissance sur sa qualité. En phase de prétraitement, le broyage se fait dans des mortiers à une granulométrie de moins de 150 micromètres nécessitant beaucoup d'efforts physiques et entraînant un important dégagement de poussière. Le minerai est ensuite tamisé à travers un linge léger à trame serrée. Le refus du tamisage est ensuite soumis au broyage à l'aide de moulins à grains. Les impacts sanitaires sont donc liés à l'émission de poussières qui peut engendrer des maladies pulmonaires, touchant en majorité les femmes et des enfants, ainsi que des blessures des ouvriers.

La phase de traitement et de récupération de l'or avec l'utilisation de mercure lors de l'amalgamation, et le cyanure lors de la cyanuration, constitue la plus grande préoccupation pour l'environnement et la santé dans les zones d'orpaillage. Une quantité de 141 kg de cyanure est nécessaire pour traiter 1 kg d'or et 1.3 kg de mercure est rejeté dans la nature pour 1 kg d'or récupéré. La cyanuration se fait dans des bacs cimentés de 3 m³, destinés à recevoir le minerai. Le minerai traité ici est constitué de résidus issus du traitement gravimétrique. Le concentré est aspergé par un fluide lixiviant (solution de cyanure) et inhibé pendant 4 à 6 jours, afin de collecter

le jus à travers des tubes collecteurs contenant des feuilles de zinc. Une fois que les copeaux de zinc sont suffisamment chargés, les collecteurs sont retirés pour subir la cémentation à travers des séries d'attaque à l'acide sulfurique et à l'acide nitrique conduisant à la récupération de l'or.

Selon les statistiques sanitaires de 2003 dans les zones d'orpaillage du Liptako nigérien, les maladies les plus courantes enregistrées sont : le paludisme, les infections respiratoires aiguës, les traumatismes, les diarrhées, les dermatoses et les maladies sexuellement transmissibles.

Focus sur l'arsenic dans les ressources en eau et ses impacts sur la santé humaine

L'arsenic est un contaminant dangereux dans l'organisme à des concentrations très élevées. Sa présence dans les ressources en eau peut être d'origine naturelle, ou anthropique suite aux activités industrielles ou minières (Smedley et Kinniburgh, 2002) ou parfois liée à l'utilisation des pesticides dans les activités agricoles. L'ingestion d'arsenic suite à la consommation d'une eau contaminée ou d'une nourriture sur une longue période entraîne une intoxication appelée arsénicose (effet de l'intoxication par l'arsenic), qui constitue une réelle menace pour la santé humaine (Ravenscroft *et al.*, 2009). Cette exposition peut être aiguë entraînant des symptômes immédiats comme des vomissements, des douleurs abdominales et des diarrhées. Si elle est chronique, elle entraîne diverses maladies comme : (i) des problèmes de peau (dépigmentation et apparition de plaques rugueuses sur la paume des mains et la plante des pieds), (ii) des cancers : de la peau, de la vessie, des reins et des poumons, (iii) des maladies des vaisseaux sanguins, des jambes et des pieds (conduisant à la gangrène et connue sous le nom de « maladie du pied noir »), (iv) du diabète et des troubles de la reproduction (Ravenscroft *et al.*, 2009 ; Naujokas *et al.*, 2013 ; OMS, 2017). Les premiers symptômes peuvent apparaître après 5 à 10 ans d'exposition.

L'arsenic présente aussi des effets sur les végétaux à travers la présence de composés arséniés dans les sols. Les facteurs physico-chimiques du sol jouent un rôle important car ils affectent la disponibilité de l'arsenic et ainsi son transfert dans la plante. La présence de phosphate PO_4^{3-} qui présente des propriétés chimiques proches de l'arséniate AsO_4^{3-} , augmente la résistance de la plante à As(V) en inhibant son absorption. Lorsqu'elles sont dans un milieu déficient en phosphate et en présence d'As(V), certaines plantes (telles que le maïs, la tomate, le melon) sont capables de réduire l'As(V) et de le méthyler en MMA et DMA (Molénat *et al.*, 2000). L'arsenic est accumulé dans les racines et dans les feuilles, suivant un mécanisme de résistance mis en place par le végétal (Tlustõs *et al.*, 2002).

Une connaissance des impacts de l'orpaillage sur l'eau qui reste à améliorer

On note une insuffisance des études sur la connaissance de la qualité des ressources en eau souterraine dans les zones d'exploitation. L'arsenic peut être présent à de fortes proportions dans différents minerais métalliques (Cu, Pb, Co et Au) : 20 à 30 g/kg dans les minerais de cuivre, jusqu'à 110 g/kg dans certains minerais d'or (Lombi *et al.*, 2000b). Sa source peut être naturelle liée au fond géochimique naturel des zones cristallines. Selon l'UNESCO dans le cadre du Programme Mondial pour l'Évaluation des Ressources en Eau (WWAP), la pollution naturelle à l'arsenic de l'eau potable est maintenant considérée comme une menace globale affectant près de 140 millions de personnes dans 70 pays, sur tous les continents (UNESCO, 2009). Des concentrations très fortes en arsenic sont relevées dans les aquifères de nombreuses régions du monde. Divers processus biogéochimiques peuvent favoriser la dissolution de l'arsenic dans l'eau et parvenir ainsi dans les aquifères, les sources et les cours d'eau (Kim *et al.*, 2003 ; Hug *et al.*, 2001 ; Smedley et Kinniburgh, 2002 ; Mandal et Suzuki, 2002).

En Afrique de l'Ouest, les investigations ont révélé des concentrations élevées d'arsenic dans certains sols, eaux de surface et eaux souterraines. Au Ghana, Howell (1994) a rapporté des concentrations élevées (189 – 1 025 mg kg⁻¹) dans les sols au-dessus du substratum des roches minéralisées de la région entourant la mine d'Ashanti, dans le centre du Ghana. Smedley *et al.* (1996) ont mis en évidence des concentrations allant jusqu'à 175 µg/l dans des eaux de surface utilisées pour la boisson dans la même région d'Ashanti, et un maximum de 64 µg/l dans les eaux souterraines des forages ruraux d'approvisionnement en eau de la même région. Aussi, des concentrations allant jusqu'à 141 µg/l ont été mises en évidence dans les eaux souterraines associées à la minéralisation des sulfures d'or dans la région du Haut-Orient du Nord du Ghana. Des effets néfastes sur la santé ont été liés à la culture vivrière dans les zones contaminées par les mines au Ghana (Obiri *et al.*, 2006).

Dans le Liptako, une étude menée en 2005, dans trois villages au Burkina, en terrains volcano-sédimentaires, riches en sulfures, a mis en évidence un cas d'intoxication des populations, avec des pathologies associées à l'utilisation d'une eau de consommation riche en arsenic (Smedley *et al.*, 2007). En 2006, une contamination de nappes phréatiques à l'arsenic avec des teneurs supérieures aux normes de l'OMS a été observée dans la région Nord du Burkina, à Essakane. Dans cette même région, une étude réalisée sur la population a montré des manifestations cutanées dominées par les hyperkératoses palmo plantaires et les hyperpigmentations (77,8 % chacune), qui sont des problèmes de santé liés directement à l'arsenic (Barro-Traoré *et al.*, 2008). Ces études ont conduit à la fermeture de certains puits et forages dans la région nord, déjà en grave déficit d'eau. Dans la localité de Ouahigouya où s'exerce une exploitation artisanale de l'or (orpaillage), des

hautes teneurs en arsenic ont également été observées dans des forages. Des concentrations anormales en arsenic ont été mises en évidence dans les puits, dans la nourriture ainsi que dans les urines des habitants de la province de Yatenga au Burkina Faso (Somé *et al.*, 2012).

Au Mali, une étude sur la concentration en arsenic au niveau des eaux de surfaces et souterraines dans la ville de Bamako et la commune rurale d'Ouelessebougou a montré l'existence d'une corrélation entre l'arsenic et le nitrate dans certains puits, alors que l'arsenic et le phosphate étaient non-corrélatifs, suggérant que le nitrate est plus efficace à déplacer l'arsenic du fait de sa mobilité plus élevée. L'étude a aussi montré une corrélation entre le fer et l'arsenic, tandis que l'arsenic et le sulfate étaient non-corrélatifs (GARCIA *et al.*, 2011).

Au Niger, le rapport du Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement (RAF7011, 2017) a montré la présence de nitrates et de l'arsenic dans les eaux des aquifères discontinus du socle du Liptako notamment, au niveau de la frontière Burkina Faso-Niger. En 2012, une étude sur le diagnostic de la contamination des eaux par les éléments traces métalliques dans la zone aurifère de Komabangou (Tillabéri, Niger) a révélé l'existence d'une contamination importante de ces éléments dans les eaux d'extraction d'or par cyanuration et par gravimétrie. Elle souligne également une variabilité significative des concentrations des ETM en fonction du métal analysé (Tankari *et al.*, 2014). Ibrahim *et al.*, (2019) ont étudié la distribution des éléments traces dans les sols de la zone aurifère de Komabangou. Ils ont montré une importante concentration des éléments tels que l'As, le Cd, le Pb et le Zn au centre de la zone aurifère. Tankari *et al.*, (2019) ont mis en évidence les impacts de l'exploitation artisanale d'or du site de Komabangou sur les ressources en eau et sur les sols avec des concentrations de l'ordre de 555 mg/kg pour l'As et 458 mg/kg pour le Zn dans les sols, et 540 mg/l pour le Zn, 7.4 mg/l pour le Cu et 4.27 mg/l pour l'Al dans les ressources en eau.

1.1.2 Pollutions organiques liées à l'utilisation des pesticides

1.1.2.1 Quelques définitions

Pesticides

Le terme « *pesticide* » dérive du mot anglais et désigne toute substance ou association de substances chimiques ou biologiques, qui est destinées à repousser, à détruire ou à combattre les organismes nuisibles ou à être utilisées comme régulateur de croissance des plantes (FAO/WHO,

2013). Selon Schiffers (2012), ces substances peuvent être utilisées comme : régulateurs de croissance des plantes, défoliants, agent de dessiccation, agents d'éclaircissage des fruits ou pour empêcher la chute prématurée des fruits. Elles peuvent être appliquées sur les cultures, avant ou après la récolte, pour protéger les produits contre la détérioration durant l'entreposage et le transport.

Substance active

La substance active (ou matière active ou molécule) désigne le composé actif biologiquement (exemple : la deltaméthrine) et de « *formulation* » pour désigner le produit commercial prêt à l'emploi ou à être dilué dans l'eau (exemple : le DECIS EC 25). La substance active qui est, le plus souvent une substance chimique, issue de la synthèse, porte un nom commun (exemple : le chlorpyrifos-éthyl, l'andosulfan etc.) qui correspond à une formulation chimique particulière (Schiffers 2012).

Formulation

La *formulation* est un produit commercial qui contient une ou plusieurs substances actives (produits binaires, produits ternaires, etc.) à des concentrations bien définies, exprimées en g/L ou en % selon que les formulations soient liquides (SL, UL, EC, SC) ou des solides (DP, WP, WG). Elle contient la (ou les) substances actives et des substances ajoutées ou co-formulants (solvants, poudre, émulsifiant, mouillants, biocides, colorant, masque, etc.) pour améliorer la stabilité du produit, l'efficacité et pour en faciliter l'emploi (Schiffers, 2012).

1.1.2.2 Classification des pesticides

Les pesticides peuvent être classés de plusieurs façons, notamment en fonction de leur cible, conduisant à différentes catégories (Eldrige B., 2008 ; INSERM. 2013) :

- Les fongicides : pour le traitement des maladies fongiques des plantes principalement, et aussi les maladies bactériennes et virales ;
- Les insecticides : pour lutter contre les insectes en les tuant ou les empêchant de se reproduire ;
- Les herbicides : pour lutter contre certains végétaux entrant en concurrence avec les cultures ;
- Les acaricides : pour lutter contre les acariens en éliminant ou affectant le fonctionnement vital.

Les autres pesticides classés selon leur cible sont constitués par les molluscicides (contre les escargots et les limaces), les rodenticides (contre les rongeurs), les nématicides (contre les vers du groupe de nématodes parasites des végétaux) etc.

Les principaux groupes de pesticides classés selon leur famille chimique et leurs cibles sont donnés dans le tableau ci-dessous (tableau 1).

Tableau 1 : Quelques familles chimiques de pesticides et leurs cibles principales (INSERM. 2013).

| Familles chimiques | Exemples de substances | Classement selon la cible |
|---------------------------|---|---------------------------|
| Organochlorés | DDT, Chlordane, Lindane, Dieldrine, Heptachlore | Insecticides |
| Organophosphorés | Malathion, Parathion, Chlorpyrifos, Diazinon | Insecticides |
| Pyréthrinoïdes | Perméthrine, Deltaméthrine | Insecticides |
| Carbamates | Aldicarbe, Carbaryl, Carbofuran, Méthomyl | Insecticides |
| | Asulame, Diallate, Terbucarbe, Triallate | Herbicides |
| | Benthiavalicarbe | Fongicides |
| Dithiocarbamates | Mancozèbe, Manèbe, Thirame, Zinèbe | Fongicides |
| Phtalimides | Folpel, Captane, Captafol | Fongicides |
| Triazines | Atrazine, Simazine, Terbutylazine | Herbicides |
| Phénoxyherbicides | MCPA, 2,4-D, 2,4,5-T | Herbicides |
| Chloroacétamides | Alachlore, Métolachlore | Herbicides |
| Pyridines-bipyridiliums | Paraquat, Diquat | Herbicides |
| Aminophosphonates glycine | Glyphosate | Herbicides |

1.1.2.3 Devenir des pesticides dans le milieu aquatique

Selon leurs propriétés physiques et les conditions abiotiques (température, humidité, vent, pluie, occupation des sols etc.), les pesticides peuvent être dispersés dans les compartiments de l'environnement et pénétrer dans les organismes (Barbash, 2014). Dans certains cas, une partie de la dose appliquée pourrait se retrouver dans l'atmosphère (Bedos *et al.*, 2002).

Pour les sédiments et les sols, les pesticides peuvent s'adsorber en fonction de leur coefficient d'adsorption (K_d) qui est déterminé en laboratoire. Cette adsorption correspond à des interactions de type van der Waals, des liaisons hydrogènes et apolaires, des complexations ou des échanges d'ion avec le sorbant (Bollag *et al.*, 1992). Une fois appliqués sur les sols, les pesticides peuvent se retrouver dans les eaux de surface par ruissellement, ce qui constitue un facteur d'érosion et de pollutions diffuses (Poulard *et al.*, 2015). Dépendant du contexte local et des conditions climatiques, les eaux de ruissellement peuvent drainer de grandes quantités de contaminants dans les eaux et impacter sur la qualité des rivières. Les zones les plus concernées par ces contaminations sont celles situées à proximité des parcelles agricoles traitées avec les pesticides et où les conditions climatiques sont favorables. L'évaporation des pesticides pendant et après l'application, notamment à partir des cultures traitées et du sol, peut être à l'origine de sa volatilisation dans l'atmosphère, puis du transport et du dépôt par les précipitations ou par les particules (Branchet *et al.*, 2018). Ce processus participe également à la contamination des eaux de surface et des eaux souterraines.

L'affinité entre les pesticides et les matrices apolaires se fait en fonction de la valeur du coefficient de partage octanol-eau (K_{ow}). S'il est élevé, la molécule aura tendance à s'accumuler dans les sédiments et le tissu adipeux des organismes vivants (Branchet *et al.*, 2018).

En fonction des compartiments dans lesquels ils se trouvent, les pesticides subissent des modifications qui peuvent aboutir à des produits de dégradation par des processus abiotiques (hydrolyse, photolyse) et biotique (biodégradation) (Mamy *et al.*, 2015). La dégradation ultime des pesticides correspond à des composés minéraux comme CO_2 , H_2O , HCl , SO_2 etc. et sa persistance dans l'environnement dépend du temps de demi-vie (TD_{50}). Leur devenir dans le sol est fonction de plusieurs facteurs comme le climat, le type de sol, les pratiques agricoles, les propriétés physico-chimiques des matières actives etc. (Opel *et al.*, 2011 ; Pinto *et al.*, 2016). Certaines zones sont favorables aux biodégradations, comme l'interface entre l'eau et les sédiments et dans les zones humides en fonction de l'humidité, de la température et de la disponibilité en nutriments (Wilkinson *et al.*, 2017).

1.1.2.4 Evolution des connaissances sur les impacts environnementaux et sanitaires des pollutions organiques

L'utilisation des pesticides profite aux cultures mais impose également un impact négatif sur l'environnement, les écosystèmes et les êtres humains, notamment à cause de leur toxicité et leur pouvoir biocide. Selon l'OMS, les pesticides sont potentiellement toxiques pour les êtres humains et peuvent avoir des effets sanitaires chroniques et aigus, selon le niveau et voie d'exposition. Ainsi, la population la plus à risque concerne les personnes directement exposées (OMS/PNUE, 1989). Les principaux indicateurs de la dangerosité de l'utilisation des pesticides sont : les troubles de la reproduction chez les oiseaux, la perte de la biodiversité, la contamination des eaux et des sols cultivés, ainsi que de nombreuses intoxications ou même de décès des utilisateurs (Schiffers, 2012). La prise de conscience des conséquences de l'utilisation de pesticides et sa prise en compte dans les réglementations ont commencé depuis les années 1970, suite à la pression du public. La Belgique fait partie des premiers pays à prendre des mesures d'interdiction du DDT, en 1974, de l'aldrine et l'heptachlore en 1976 et les composés organochlorés persistants (POPs) en 1981 (Schiffers, 2012). Ce n'est qu'en juillet 1993, que la directive 91/414/CEE concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques a été mise en application (Schiffers, 2012). Les pesticides sont d'une part des produits phytopharmaceutiques au sens du règlement (CE) n° 1107/2009 et d'autre part des produits biocides au sens du règlement (CE) n° 528/2012. Pour les produits phytopharmaceutiques, les substances actives sont soumises à une approbation d'une durée de 10 à 15 ans par la Commission Européenne.

En 1990, un groupe de travail de l'OMS a estimé qu'environ 1 million de personnes seraient intoxiquées chaque année, entraînant environ 20 000 décès (WHO, 1990). Plusieurs travaux ont mis en évidence des cas d'intoxications par les pesticides, mais il n'existe pas d'estimations mises à jour pour les intoxications à l'échelle mondiale (Boedeker *et al.*, 2020). Selon WHO (1990) « *il n'existe pas de données correctes sur le nombre d'intoxications par les pesticides à toxicité aiguë et les cas d'intoxication sont sous-notifiés, en raison d'une réglementation insuffisante, de la faiblesse des structures agricoles et d'une mauvaise définition des maladies professionnelles* ».

Actuellement, plusieurs études ont démontré les effets cancérigènes de certains pesticides, de perturbateurs endocriniens et reprotoxiques, génotoxiques sur différents niveaux trophiques (Palma *et al.*, 2016 ; Truhaut, 1977) ou même des effets comportementaux sur les organismes aquatiques (Graymore *et al.*, 2001). Certains pesticides peuvent se lier aux récepteurs des hormones androgéniques même à faibles concentrations et activer ou inhiber leurs effets.

La question de la contamination en pesticides est devenue une préoccupation majeure pour le monde entier.

1.1.2.5 Pollution des eaux et toxicité

La pollution des nappes et des cours d'eau peut s'effectuer par l'infiltration des pesticides dans les sols, suivis d'un transfert vers les cours d'eau. A partir de leur point d'application, les pesticides peuvent être mobilisés et transportés vers les eaux de surface. Ce transfert se fait lors du ruissellement (pendant la saison des pluies) après un déversement direct de pesticides et par le ruissellement sur les surfaces imperméables préalablement traitées (Bucheli *et al.*, 1998a, Burkhardt *et al.*, 2007). Ces dernières années, on constate un remplacement du sol et de la végétation par des surfaces imperméables engendrant la diminution de l'infiltration de l'eau dans les nappes phréatiques et une augmentation de la quantité d'eau et de polluants introduits dans les cours d'eau. La contamination des eaux de surface peut ainsi être directe (par absorption ou adsorption) ou indirecte (dispersion des gouttelettes lors de l'application).

L'exposition aux pesticides peut occasionner des effets aigus à court terme ou des effets chroniques sur la santé humaine (OMS/PNUE, 1989 ; Girard *et al.*, 2020). Les effets aigus sont connus sous le nom d'intoxication et les conséquences sont le plus souvent immédiates, alors que les effets chroniques se développent sur une longue période. Dans les deux cas, les conséquences sont désastreuses pour la victime et les conséquences les plus redoutables sont liées en grande partie aux potentialités cancérigènes à long terme de ses substances (Girard *et al.*, 2020).

1.1.2.6 Cadre réglementaire et utilisation des pesticides en agriculture

L'utilisation des pesticides dans les pays de la zone sahélienne, faisant partie du Comité Inter-états de Lutte Contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) créé en 1973 (Burkina Faso, Bénin, Cap vert, Côte d'Ivoire, Gambie, Guinée, Guinée Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad, et Togo) est réglementée dans un document datant de 1999. Au sein du CILSS, existe un Comité Sahélien des Pesticides (CSP) (RECA, 2013). La réglementation sur l'homologation des pesticides se base sur les directives de la FAO ainsi que sur les conventions internationales. L'homologation d'un pesticide au sein du comité est valable pour 5 ans après une autorisation provisoire de vente (APV). Les molécules interdites au sein du CILSS sont les suivantes : acétochlore, carbofuran, carbosulfan, endosulfan, fipronil, hexazinone, méthamidophos, monocrotophos, paraquat (gramoxone), triazophos (RECA, 2013).

La principale activité consommatrice de pesticides est l'agriculture. L'intensification des activités agricoles à l'échelle mondiale et la multiplication de prédateurs justifient la nécessité de traiter les cultures. Depuis plusieurs années, les pesticides ont été jugés efficaces, de faible coût et d'emploi facile par les agriculteurs. Depuis la seconde moitié du 20^e siècle, les activités de production agricole ont profité d'une sous-évaluation des conséquences environnementales et sanitaires et ont considéré les pesticides comme un progrès pour l'agriculture. .

1.1.2.7 Impacts de la contamination par les pesticides des eaux du bassin hydrographique du fleuve Niger, au Niger

L'agriculture, une source de pollutions des eaux avec des conséquences sur la santé humaine

En Afrique, le développement des activités agricoles occupe une place importante pour l'alimentation des populations et contribue au PIB national. La réponse à cette demande croissante en produits agricoles et l'amélioration des rendements impliquent aussi l'usage systématique des pesticides chimiques pour lutter contre les bioagresseurs des cultures (Ahouangninou *et al.* 2011 ; Andres et Lebailly, 2011 ; Kanda *et al.*, 2013). Plusieurs études ont mis en évidence des concentrations élevées en pesticides avec une fréquence des pyréthrinoïdes, de la dieldrine et des pesticides organophosphorés (Donald *et al.*, 2016) dans les eaux, les sédiments, les sols, les aliments, l'air et les organismes aquatiques dans les pays concernés par le bassin du fleuve Niger notamment : en Guinée (Traoré et Haggblade, 2017), au Mali (Berthe Dem *et al.*, 2007 ; Le Bars *et al.*, 2020), au Burkina (Gnankiné *et al.*, 2013 ; Lehmann *et al.*, 2017, 2018 ; Son *et al.*, 2017 ; Tarnagda *et al.*, 2017), au Bénin (Okoumassoun *et al.*, 2002 ; Agbohessi *et al.*, 2011, 2012 ; Agboyi *et al.*, 2016, Gouda *et al.*, 2018), au Nigéria (Adeyemi *et al.*, 2011 ; Ogbeide *et al.*, 2015 ; Ojo 2016 ; Gushit *et al.*, 2017), au Niger (Mamadou *et al.*, 2008 ; Mamane *et al.*, 2016 ; Zabeirou *et al.* 2018), au Cameroun (Ahmadou *et al.*, 2016 ; Norbet *et al.*, 2017 ; Branchet *et al.*, 2018), en Côte d'Ivoire (Traoré *et al.*, 2006 ; Doumbia et Kwadjo 2009 ; Coulibaly *et al.*, 2012 ; Traoré A. *et al.*, 2015) et au Tchad (Sougnabe *et al.*, 2010).

L'utilisation des pesticides présente des conséquences sur l'environnement et des risques d'intoxication pour la santé humaine. Plusieurs travaux ont mis en évidence les risques environnementaux et sanitaires notamment les atteintes à la fonction de reproduction, des troubles neurologiques et des pathologies cancéreuses (Multigner 2006 ; Ahouangninou *et al.* 2011 ; Mamane *et al.*, 2015 ; Gouda *et al.*, 2018 ; Le Bars *et al.*, 2020). Selon l'OMS, il y a environ un million d'intoxications sévères dues aux pesticides dans le monde avec quelques 200 000 décès (OMS/PNUE 1989).

Les études réalisées au Niger sur l'utilisation des pesticides et les expositions humaines ont montré une application des organophosphorés, des pyréthriinoïdes, et des avermectines dans les cultures maraichères de l'oignon, du chou et de la tomate dans le Département de Madaoua et de 25 formulations de pesticides, toutes non homologuées par le Comité Sahélien des Pesticides (Zabeirou *et al.* 2018). Ces cultures mobilisent onze matières actives dont 2 appartenant aux classes de danger de l'Organisation Mondiale de la Santé à savoir les classes Ia (extrêmement dangereux) et Ib (très dangereux). Les travaux de Mamadou *et al.*, (2005, 2008) ont mis en évidence des effets nocifs de chlorpyrifos éthyle et fénitrothion utilisés contre le criquet pèlerin sur les deux espèces de pimelia (Coleoptera, tenebrioniadae) dans la vallée de Tafidet (région d'Agadez) et l'exposition professionnelle aux organophosphorés et aux carbamates en milieu rural nigérien.

Sur le *Fleuve Niger*, l'exposition du régime alimentaire de la ville de Niamey aux résidus de produits phytopharmaceutiques pendant la saison sèche chaude et froide sèche a été mis en évidence et a montré que le risque d'exposition était plus élevé chez les enfants que chez les adultes pour tous les résidus détectés et quel que soit le produit (Illyassou *et al.* 2018). Ces risques d'exposition concernent également les petits agriculteurs avec un niveau d'exposition supérieurs au niveau d'exposition acceptable pour toutes les substances actives et varient de 0,0013 mg / kg pc / jour à 0,4125 mg / kg pc / jour (Illyassou *et al.* 2017). Le résultat des enquêtes réalisées sur le risque de troubles respiratoires chez les adultes et les enfants liés à la culture au Niger a montré que les personnes vivant dans les zones agricoles ont un risque accru de symptômes respiratoires chez les adultes (respiration sifflante, dyspnée, essoufflement soudain et toux sans fièvre) et chez les enfants (toux sans fièvre) par rapport à celles des zones pastorales (Mamane *et al.*, 2014, 2016).

1.2 Principaux enjeux liés à la pollution des eaux dans le Liptako nigérien

L'eau étant une ressource vitale pour tout être vivant, elle revêt une importance capitale pour d'innombrables activités humaines. Au Sahel et précisément au Niger, les conditions climatiques aléatoires et la forte demande entraînent un amenuisement des ressources en eau. En plus de ces conditions climatiques défavorables à l'accumulation des réserves d'eau, la nature du substratum, servant d'encaissant, influence significativement la réserve d'eau.

Le problème de la disponibilité en eau au Niger est bien connu dans le Liptako nigérien, qui est une zone de socle. Ainsi, pour assurer le besoin quotidien en eau, les populations sont obligées de rechercher des réserves d'eau de la nappe profonde. En plus de la disponibilité de la ressource, sa

qualité aura sans doute un impact sur l'approvisionnement en eau potable de la population. Les concentrations en certains éléments traces dans ces eaux sont nuisibles à la santé et à l'environnement.

1.2.1 Enjeux liés à la pollution métallique

Le Liptako nigérien est très riche en or et le développement de son exploitation est une source possible de pollution. Parmi ces polluants métalliques, l'arsenic apparaît de plus en plus comme un élément polluant de première importance éco toxicologique (Culioli *et al.* 2008). Il est semi-métal et présent dans toutes les eaux mais généralement à des concentrations très faibles uniquement (norme OMS : 0,01 mg/litre). L'exposition à l'arsenic dans l'eau de boisson sur une longue période ou son absorption par l'alimentation ou l'air cause de véritables soucis de santé qualifiés d'arsenicisme (cancer, maladies pulmonaires, cutanées, etc.). Des voies d'exposition multiples contribuent à l'intoxication chronique.

L'arsenic peut s'associer à d'autres éléments pour former des composés arsenicaux organiques et inorganiques, ces derniers étant généralement plus toxiques et plus prévalent dans l'eau. Cette forme inorganique de l'arsenic, étudiée dans le cadre de cette thèse peut avoir deux modes de libération : naturelle ou anthropique.

➤ La libération naturelle

La région du Liptako est constituée de formations birimiennes (bordure NE de la Dorsale de Man) qui présentent une alternance de ceintures de roches vertes et de plutons granitoïdiques orientés NE-SW. Ces terrains couvrent de vastes régions au Niger, au Mali, au Burkina, en Côte d'Ivoire, au Ghana, et en Guinée. La majeure partie de ces terrains renferment des minéralisations aurifères. Sous l'effet des agents géodynamiques et de la température (eau et vent), la roche source de l'arsenic s'altère (physiquement et chimiquement). Cette désorganisation de la roche va se poursuivre jusqu'à la rupture des liaisons entre les différents éléments de la roche. Ceci va permettre aux agents géodynamiques (eau) de les mobiliser soit par dissolution directe (Kim *et al.*, 2003 ; Hug *et al.*, 2001 ; Smedley et Kinniburgh, 2002 ; Mandal et Suzuki, 2002) - c'est le cas des puits dans des roches sources - soit par transport, pour aller les déposer vers les sources d'eau (mares, les puits, retenues d'eau, etc.) ;

➤ La libération anthropique

L'exploitation industrielle et artisanale de l'or et l'utilisation des pesticides dans l'agriculture peuvent être à l'origine de la libération anthropique de l'arsenic et de certains métaux traces.

Une fois libéré, l'arsenic se retrouvera par la suite dans les eaux de surface dont l'hydrodynamisme le conduira aux nappes (continues ou même discontinues) exploitées pour les activités quotidiennes des populations. Dans ces zones d'exploitations minières et agricoles qui sont des zones potentielles sources d'arsenic, la qualité des eaux ne peut être que douteuse.

Des mesures ponctuelles effectuées dans la zone du Liptako ont relevé des traces d'arsenic dans les eaux de surface et dans certaines nappes discontinues du socle que le Niger partage avec le Burkina Faso (RAF/7/011, 2017). Au Burkina Faso, de fortes concentrations d'arsenic atteignant 1630 µg/l ont été mises en évidence au niveau de la ville de Ouahigouya (Smedley *et al.*, 2007). Les travaux de Somé *et al.*, (2012) ont révélé des cas de mélanose (19.3%) et de kératose (46.3%) chez 240 personnes réparties dans 20 villages.

Dans le Liptako nigérien, on note néanmoins une insuffisance des travaux sur la qualité des ressources en eau, notamment par rapport aux pollutions de métaux et de métalloïdes, de leur source et de leur répartition spatiale. Pour l'instant, les travaux réalisés au niveau du Liptako nigérien concernent uniquement l'ancien site d'orpaillage de Komabangou et aucun cas d'intoxication de la population lié à l'arsenic n'a été mis en évidence au Niger à ce jour.

1.2.2 Enjeux liés à la pollution organique

L'économie du Niger repose essentiellement sur l'agriculture et l'élevage qui emploient plus de 80% de la population. La récente augmentation de la production agricole au Niger est accompagnée de l'utilisation accrue des pesticides pour protéger les cultures des ravageurs. Ces pesticides sont, pour leur majorité, importés des pays voisins et non homologués par le Conseil Sahélien des pesticides (CSP) ou même interdits sur le territoire nigérien (CSP INSAH, 2015). Cela constitue une source de pollution environnementale et sanitaire dans le bassin hydrographique du Fleuve Niger. Bien que les travaux réalisés aient mis en évidence les risques d'exposition de certains producteurs par l'utilisation des pesticides, il n'existe actuellement pas de travaux d'évaluation de la qualité des eaux aux pesticides le long du Fleuve Niger et sur la rivière Mékrou. L'utilisation de ces pesticides, principalement non homologués pour les usages agricoles, peut être une source de problèmes environnementaux et sanitaires dans le bassin hydrographique du Fleuve Niger.

Ainsi, il apparaît urgent d'améliorer la connaissance de la qualité des ressources en eau du Liptako nigérien afin de réduire les risques de contamination des populations. A cet effet, il est important de rechercher, d'une part, les sources de contamination des eaux en éléments traces métalliques, dans les zones d'exploitation artisanale de l'or, et d'autre part, de faire

un état des lieux des contaminations en pesticides dans les zones agricoles. C'est ainsi qu'un sujet de thèse portant sur : « *les impacts de l'orpaillage et de l'agriculture sur la qualité des eaux du Liptako nigérien : identification des hots spots des pollutions métalliques et organiques, transferts de connaissance entre recherche et terrain* », a été proposé.

1.3 Problématique de la thèse

Les éléments de contexte sur les possibilités d'existence des pollutions métalliques dans les zones d'orpaillage du Liptako nigérien et les pollutions organiques liées à l'utilisation des pesticides dans le bassin du *Fleuve Niger* ont été posés précédemment. Leurs conséquences sur la santé et l'environnement d'une part, et les insuffisances relevées sur la caractérisation et les processus de transferts de ces polluants sur le territoire d'autre part, ont été énumérées. Nous en venons ainsi à la formulation de la problématique de recherche qui a guidé ce travail de thèse : « **dans quelles mesures une bonne connaissance de la qualité des ressources en eau du Liptako nigérien peut permettre de réduire les risques de contamination des populations ?** ».

1.4 Hypothèses de travail

A partir de cette problématique, nous avons formulé cinq hypothèses de travail constituant ainsi les principaux jalons de notre travail de recherche :

- Les connaissances sur la qualité des ressources en eau du Liptako nigérien n'est pas suffisante aujourd'hui ;
- L'analyse de la qualité des ressources en eau permet de déterminer leur degré de vulnérabilité naturelle et anthropique à la pollution ;
- Les impacts des activités anthropiques dépendent des pratiques agricoles et des techniques artisanales d'orpaillage ;
- Les populations n'ont qu'une connaissance partielle des risques environnementaux et sanitaires liés à leurs pratiques d'orpaillage et agricoles ;
- Des outils de transfert de connaissances entre recherche et terrain peuvent contribuer à accroître cette connaissance et à transformer leurs pratiques.

1.5 Objectifs et structuration de la thèse

Objectifs

Pour travailler ces hypothèses, nous nous donnons comme objectifs de la présente thèse :

- **Objectif 1** – Améliorer les connaissances sur la qualité des eaux dans le Liptako nigérien et dans le bassin hydrographique du *Fleuve Niger* ;
 - o **Objectif 1.1** Faire la synthèse des données disponibles sur le territoire, en termes de chroniques hydrologiques, données géologiques, hydrogéologiques, socio-économiques, et sanitaires ;
 - o **Objectif 1.2.** Acquérir de nouvelles de connaissances en réalisant des mesures de prélèvements d’eaux, de sédiments et de roches, et aussi en menant des enquêtes auprès des acteurs principaux concernant les impacts de leurs activités aurifères et agricoles sur les ressources en eau.
- **Objectif 2** – Déterminer les origines possibles de ces contaminations et cartographier leur évolution spatiale
- **Objectif 3** – Développer et mettre en place, en lien avec les différents acteurs du territoire, un outil de transfert de connaissances sur les risques environnementaux et sanitaires liés à la présence des contaminants, afin de favoriser l’émergence de nouvelles pratiques d’orpaillage.

En plus de leurs portées théoriques, les objectifs de cette thèse ont une portée opérationnelle qui aura un impact sur toute la zone du Liptako-Gourma. Les objectifs de cette thèse sont cohérents avec le cadre du développement durable, tel que défini par les Nations Unies, correspondant aux objectifs 3, 6, 11 et 13, à savoir :

Objectif 3 - Bonne santé et bien-être : Permettre à tous de vivre en bonne santé et de promouvoir le bien-être de tous à tout âge.

Objectif 6 - Eau propre et assainissement : Garantir la disponibilité et la gestion durable de l’eau et de l’assainissement pour tous.

Objectif 11 - Villes et communautés durables : Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables.

Objectifs 13 - Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques : Prendre d’urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions.

Structuration

La structuration de la thèse donne l’architecture générale et les différentes phases suivies pour parvenir à un inventaire de toutes les formes de pollution (métalliques et organiques) observées dans la zone d’étude, afin de définir une stratégie d’intervention (Figure 1). Elle permet de s’assurer de la cohérence des résultats obtenus avec les objectifs fixés. Pour répondre aux

l'objectifs fixés pour cette thèse, le présent manuscrit se décline en cinq chapitres qui correspondent aux grandes phases du travail de recherche :

Le **Chapitre I** présente l'état de l'art sur les pollutions métalliques liées à l'exploitation minière et sur les pollutions organiques liées à l'utilisation des pesticides dans l'agriculture. Il met en évidence les enjeux de la contamination des eaux sur le territoire du Liptako nigérien et définit la problématique, les hypothèses et objectifs de la thèse.

Le **Chapitre II** est consacré aux contextes géographique, géologique et hydrogéologique dans la zone d'étude ainsi que les aspects socio-économique, environnemental et sanitaire de l'exploitation artisanale de l'or dans la Liptako nigérien et l'utilisation des pesticides dans la bassin hydrographique u fleuve Niger.

Le **Chapitre III** présente le matériel et méthodes analytiques utilisées. Il décrit les techniques analytiques mobilisées, le choix des sites et techniques de prélèvement des eaux, de sols, des roches et des matières en suspension ainsi que la méthodologie d'enquête mise en œuvre sur les pratiques agricoles et l'utilisation des pesticides.

Le **chapitre IV** donne un état des lieux des résultats obtenus sur la composition minéralogique et chimique des roches, les concentrations en éléments traces métalliques et majeurs des eaux de surface et souterraines, les concentrations en pesticides polaires des eaux du fleuve Niger et de la rivière Mékrou ainsi que ceux des pratiques agricoles et l'utilisation des pesticides. Il intègre les explications sur les interactions géochimiques qui ont été à l'origine de ces pollutions métalliques et organique, ainsi que leurs transferts dans le milieu naturel.

Le **Chapitres V** permet d'aborder les enjeux du transfert de connaissance entre les travaux de recherche et le terrain. A visée opérationnelle, elle retrace l'approche méthodologique qui conduit à proposer une solution permettant de transférer les connaissances produites dans le cadre de cette thèse auprès des orpailleurs. Elle se base sur une analyse ARDI (Acteurs, Ressources, Dynamiques et Interactions) pour modéliser les interactions socio-écologiques en termes de diffusion des polluants sur le territoire, les actions réalisées et leurs limites et le positionnement des acteurs parties prenantes. Sur la base de ces éléments de diagnostic territorial, elle détaille l'approche de développement d'un outil de sensibilisation co-construit et expérimenté avec des orpailleurs et parties prenantes de l'orpaillage au Liptako nigérien.

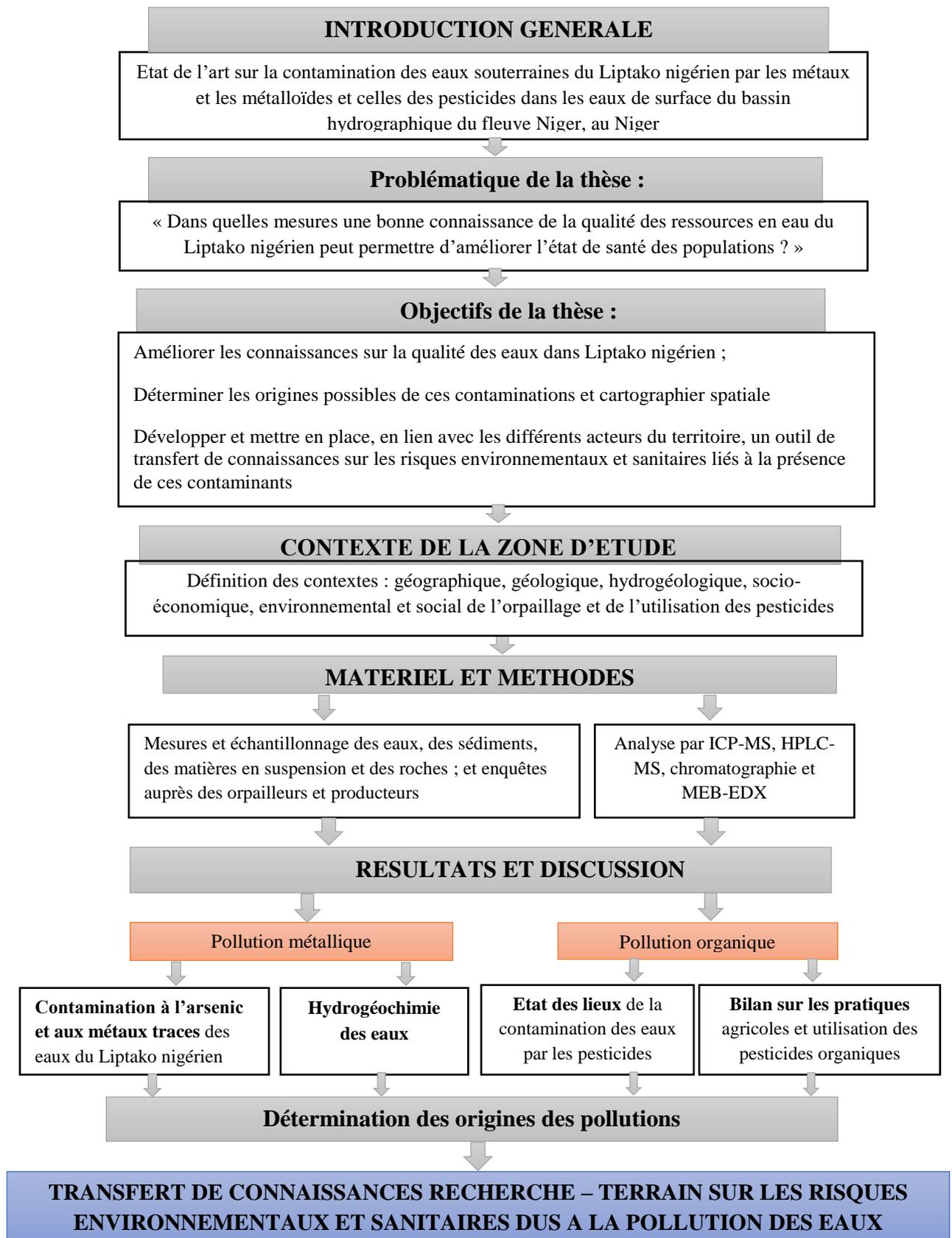


Figure 1 : Structuration générale de la thèse

CHAPITRE II : CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE

2.1 Contexte géographique

2.1.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située dans la partie Sud-Ouest du Niger, à la frontière commune entre le Burkina, le Mali et le Bénin. Elle est comprise entre les longitudes 0°50' Ouest et 3°65' Est et les latitudes 12°35' Sud et 15° Nord. Elle occupe la partie Est du Liptako nigérien et la bordure Ouest du bassin des Iullemmeden. Le bassin hydrographique du *Fleuve Niger* couvre la partie nigérienne sur les 550 km, de la frontière avec le Mali au Nord jusqu'à la frontière avec le Bénin et le Nigéria au Sud. Il traverse la région de Tillabéry sur 420 km et celle de Dosso sur 130 km (Figure 2). Les affluents du Fleuve Niger de la rive droite comprennent : le Gorouol, le Dargol, la Sirba, le Goroubi, le Diamangou, la Tapoa et le Mékrou. Tandis que ceux de la rive gauche sont représentés par : le Kori de Ouallam, le Dallol Bosso et le Dallol Maouri, qui sont des cours d'eaux temporaires. Plusieurs aménagements rizicoles sont localisés le long du *Fleuve Niger* dans les deux régions, couvrant une superficie d'environ 8500 ha. Ils sont mis en valeur par plus de 2000 tributaires (Ehrnrooth *et al.*, 2011). Plusieurs aménagements hydro-agricoles (AHA) ont été réalisés par l'Etat du Niger sur une superficie de 13000 ha dont la gestion a été confiée à l'Office National des Aménagements Hydro-Agricoles (ONAHA) (Baron *et al.*, 2010).

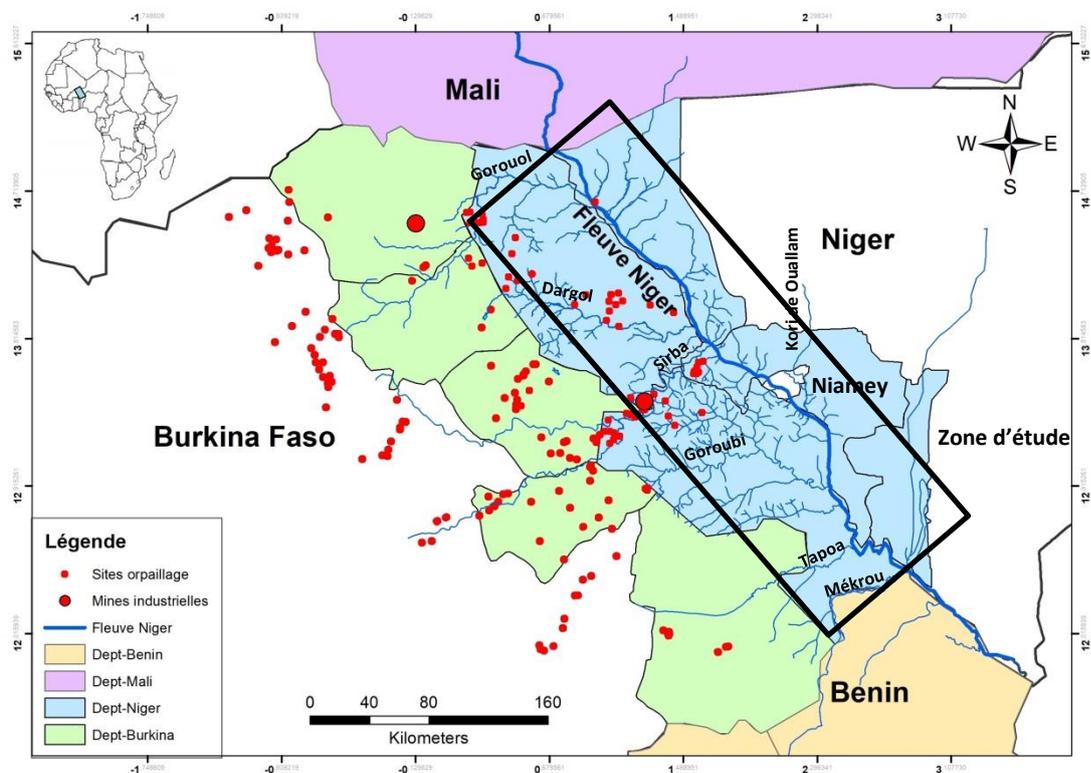


Figure 2 : Carte de localisation de la zone d'étude.

Réseau hydrographique, relief et végétation

La structure du réseau hydrographique du Liptako nigérien est contrôlée par les formations géologiques. Le relief est principalement constitué sur la rive droite, de plateaux et de collines de granitoïdes ou de roches vertes (schistes, micaschistes, dolérites, métagabbros, metabasaltes, etc.), ainsi que des plaines en alternance avec des cordons dunaires souvent entaillés par des vallées sèches (ou koris), qui drainent leurs eaux vers les mares et les affluents du fleuve pendant la saison hivernale. Les plateaux présentent une végétation dégradée et clairsemée (savane et steppe). Les végétations les plus denses sont dans les fonds des vallées et dans les dépressions.

Zones agro-climatiques

Les zones agro-climatiques du Niger sont constituées de la zone sahélo-soudanienne, de la zone sahélienne, de la zone sahélo-saharienne et de la zone saharienne (Figure 3). La zone d'étude se situe dans la zone sahélienne avec une pluviométrie comprise entre 350 et 600 mm par an où l'agriculture pratiquée est à dominante pluviale. Elle est caractérisée par deux saisons: une saison sèche qui dure neuf mois (octobre à juin) et une saison pluvieuse de trois mois (juillet à septembre). Dans la zone d'étude, les températures les plus élevées sont enregistrées entre les mois de mars et de juin avec une moyenne annuelle de 43°C et une variation globale de 15°C à 43°C.

La rivière *Mékrou*, quant à elle, se situe dans la partie la plus arrosée du Niger et traverse le parc du W, à la frontière commune entre le Niger, le Bénin et le Burkina. Elle est couverte par la zone sahélo-soudanienne qui reçoit de 600 à 800 mm de pluie par an avec des conditions très favorables à l'agriculture pluviale et irriguée. Cette dernière reçoit environ 80% de ses eaux à partir du Bénin, qui constitue une des principales zones de production cotonnière du pays.

Le parc du W est une grande réserve transfrontalière chevauchant le Bénin, le Burkina et le Niger. Il est inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco depuis 1996 et protégé depuis 2007 par la convention Ramsar. La superficie cultivable de la zone est réduite parce qu'il n'existe pas d'activités agricoles dans le Parc du W.

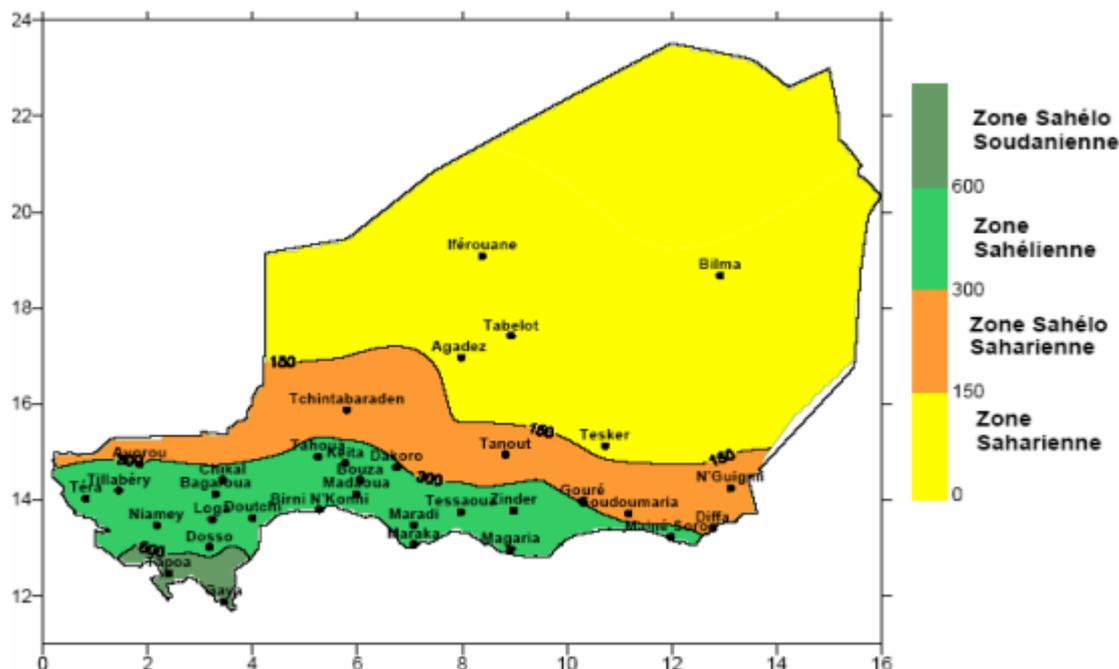


Figure 3 : Zones agro-climatiques du Niger (source : DMN, pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1975-2004).

2.1.2 Démographie et activités économiques

La population de la zone d'étude est estimée à 5,8 millions d'habitants avec un fort taux annuel de croissance démographique de 3.9% (RGP/H 2012). Elle présente une forte indice de fécondité avec 7.6 enfants / femme et un faible taux de scolarisation, dont plus de 50% des enfants de 7 à 16 ans ne sont pas scolarisés, avec environ 20% seulement qui terminent le cycle secondaire (Site officiel UNICEF, Niger 2 décembre 2021). Les différents groupes ethniques rencontrés sont constitués de : Sonraï, Touareg, Peulh, Haoussa, Gourmantché et Arabes.

Les activités économiques de la zone sont basées principalement sur l'agriculture, l'élevage et le petit commerce (CNEDD, 2004). L'agriculture occupe 80% de la population et représente plus de 40% du PIB national.

2.2 Contexte géologique du Liptako nigérien

La géologie de la zone d'étude est constituée de deux ensembles géologiques que sont : le socle paléoprotérozoïque du Liptako à l'Ouest d'une part, et la bordure orientale du bassin sédimentaire des Iullemmenden, d'autre part.

Le Liptako nigérien correspond à la partie Sud-Est du Craton Ouest-Africain stabilisé depuis 1700 Ma (Figure 4).

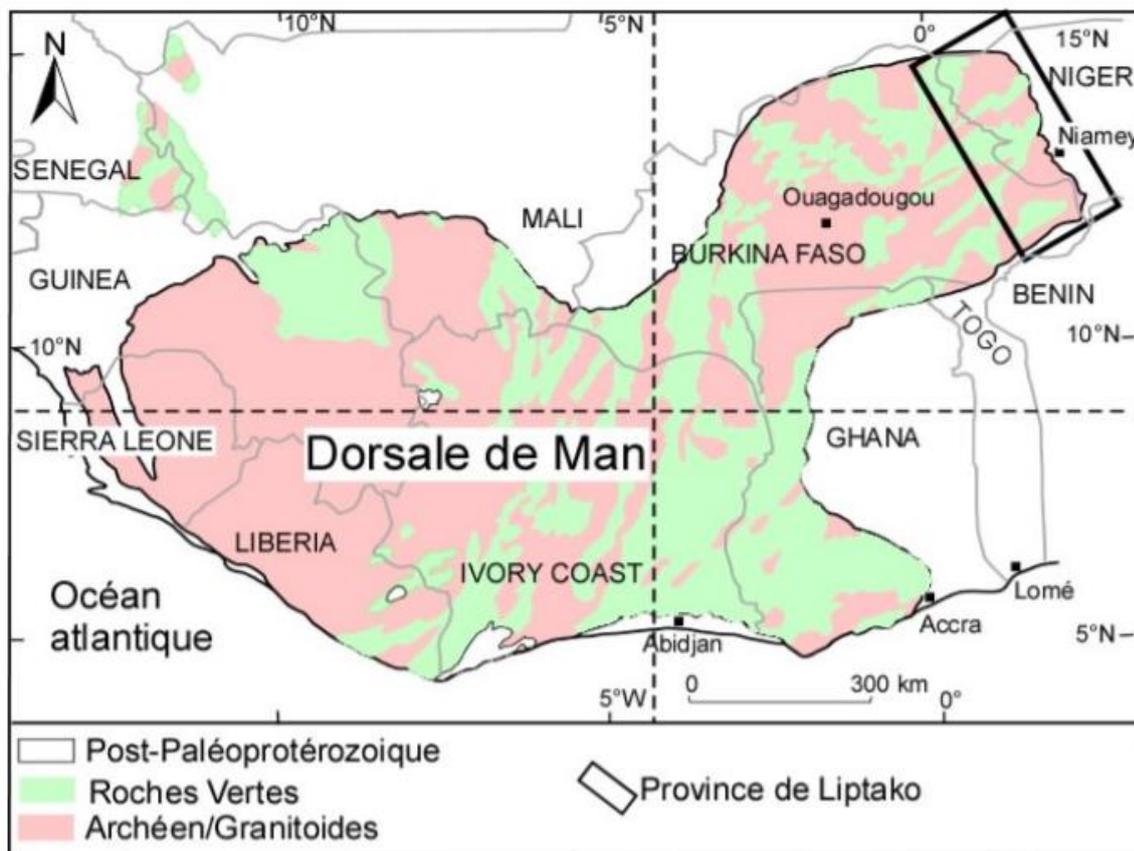


Figure 4 : Carte géologique simplifiée de la dorsale de Man (Milési et al., 1989).

2.2.1 Socle précambrien

Le Liptako nigérien se situe à l'extrémité nord-est du Craton Ouest Africain et couvre la partie sud-ouest du Niger avec une intercalation de ceintures de roches vertes du craton et le bassin métasédimentaire. La connaissance de la géologie de la zone doit beaucoup aux travaux de Machens (1973) mais peut s'appuyer également sur les études menées par de nombreux autres auteurs (Arnauld, 1961 cité par Black, 1985 ; Reichelt, 1972 ; Dupuis *et al.*, 1991 ; Pons *et al.*, 1995 ; Ama Salah *et al.*, 1996 ; Abdou *et al.*, 1998 ; Affaton *et al.*, 2000 ; Soumaila, 2000 ; Soumaila *et al.*, 2004 ; Soumaila et Konaté, 2005). Dans leurs travaux ces auteurs distinguent les deux ensembles géologiques suivants :

(i) **Le socle**, d'âge paléoprotérozoïque (2300 à 2000 Ma, d'après Soumaila (2000) ; Ousmane *et al.*, (2007)), comprend des plutons granitoïdiques alternant avec des ceintures de roches vertes (Figure 4).

(ii) **La couverture sédimentaire**, qui regroupe des formations infracambriennes, des formations oligo-miocènes du Continental terminal 3 (Ct³) et des dépôts quaternaires (dépôts dunaires et alluvionnaires).

Selon Machens (1973), le Liptako nigérien est constitué par une alternance de ceintures de roches vertes (dont celle de la Sirba) et de plutons granitoïdiques orientés suivant la direction générale NE-SO.

C'est dans une de ces ceintures de roches vertes, notamment la ceinture de la Sirba, que se localisent, les gisements exploités par la Société des Mines du Liptako (SML). Les ceintures de roches vertes sont essentiellement constituées de metabasaltes, d'amphibolites, de métasédiments, de méta-ultrabasites ainsi que de roches plutoniques.

Les massifs granitoïdiques sont considérés comme des plutons intrusifs dans les ceintures de roches vertes dont la mise en place et le gonflement sont à l'origine de la principale structuration des roches vertes (Depuis *et al.*, 1991 ; Cheilletz *et al.*, 1994 ; Pons *et al.* 1995 ; Soumaila, 2000).

Les formations de couverture comprennent l'Infracambrien, constitué de grès, de grès quartzitiques, de conglomérats et de pélites qui reposent en discordance sur le socle birimien (Boubacar, 2010). Le Continental terminal (Ct) du bassin des Iullemmeden et les formations superficielles comportent des colluvions, des cuirasses ferrugineuses latéritiques, des dunes et des terrasses récentes d'âge Quaternaire, qui reposent sur le Continental terminal et/ou le socle (Dubois, 1979).

2.2.2 Continental terminal (Ct)

Greigert (1966) a défini trois ensembles au sein du Continental terminal, comprenant de bas en haut :

- La « série sidérolithique de l'Ader Doutchi » (Ct¹)
- La « série argilo-sableuse à lignites » (Ct²)
- La « série des grès argileux du Moyen Niger » (Ct³)

Selon Greigert (1966), les formations du Ct d'âge mio-pliocène, désignant la partie supérieure des dépôts sédimentaires du bassin des Iullemmeden reposent, également, en discordance fondamentale sur les grès arkosiques et quartzitiques infracambriens. Ce sont des grès, des argiles plus ou moins sableuses et les formations oolithiques du Continental terminal (Ct), généralement recouvertes de carapaces latéritiques.

2.2.3 Levé de coupe géologique

Les travaux de terrain ont permis de faire des levés géologiques et de prélever des échantillons de roches saines. La coupe géologique A-B (Figure 7), qui a été réalisée perpendiculairement aux structures géologiques (Figure 5), montre des alternances de massifs granitoïdiques et de ceintures de roches vertes.

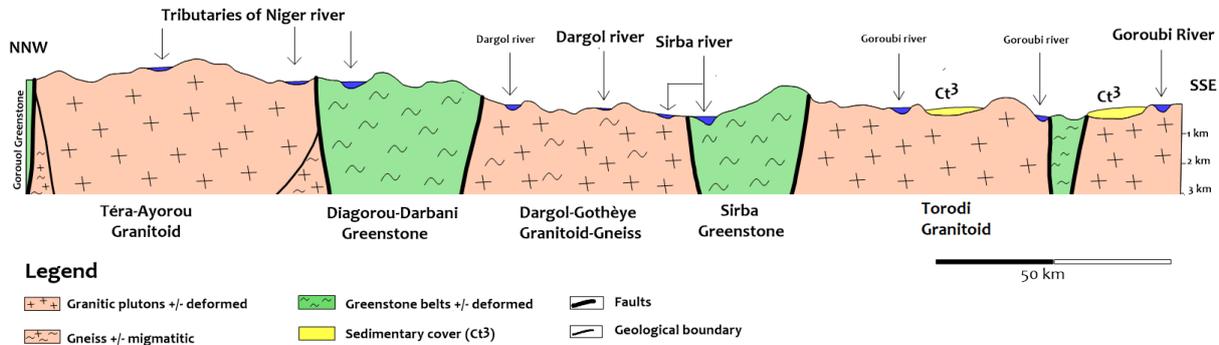


Figure 5 : Coupe géologique NNW – SSE du Liptako nigérien montrant la succession des plutons granitoïdiques et des ceintures de roche vertes.

2.3 Contexte hydrogéologique et hydrologique du Liptako nigérien

2.3.1 Contexte hydrogéologique

Les aquifères de socle de l’Afrique de l’Ouest sont localisés dans les horizons fracturés et fissurés des formations cristallines et cristallophylliennes ou dans leurs produits d’altération. La zone d’étude est caractérisée par les aquifères discontinus du socle, des aquifères des formations du Continental terminal et des aquifères alluviaux. Les nappes d’altérites et des alluvions qui sont captées par les puits, tarissent pendant la saison sèche (Campaoré *et al.* 1997).

Les aquifères discontinus du socle

Selon Ousmane (1988), trois types d’aquifères peuvent être distingués : les aquifères d’altérites, les aquifères des séries volcano-sédimentaires et les aquifères des formations granito-gneissiques. L’épaisseur d’altération dans la zone du socle de l’Afrique de l’Ouest varie en fonction des zones climatiques, des régions et du type de roche. Elle diminue des zones tropicales humides aux régions sahéliennes (Engalenc, 1981 ; Ousmane, 1988). Les aquifères comprennent trois horizons de haut en bas (10 à 20 m d’épaisseur) dans le domaine granito-gneissique : la cuirasse latéritique, les sables argileux et les arènes grenues (Guiraud et Travi, 1990) et des couches altérées très épaisses (15 à 40 m) dans le domaine des schistes et des roches vertes et à dominance argileuse (Kamagaté *et al.*, 2007).

Les réservoirs des séries volcano-sédimentaires sont hétérogènes. Les intercalations de grès, de quartzites et de filons, associées à des schistosités augmentent l'altérabilité et la porosité de ces réservoirs (Engalenc, 1978). Ousmane (1988) confirme les venues d'eau importantes des ouvrages de captage entre 50 et 60 m de profondeur et des débits atteignant exceptionnellement $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Greigert, 1957).

Les réservoirs granito-gneissiques sont des aquifères que l'on rencontre dans les fractures et/ou fissures des roches cristallines groupées sous le terme granito-gneiss. Ils se caractérisent par une double relation entre le débit et la profondeur d'une part, et entre le débit et l'épaisseur d'altérites pour les 40 premiers mètres d'autre part (Engalenc, 1978 ; Ousmane, 1988). Au-delà de cette zone, des venues d'eau importantes peuvent être observées à plus de 120 m pour les grandes fractures profondes (Engalenc, 1978).

Les aquifères du Ct

Les trois séries du Continental terminal présentent une superposition de trois principales nappes qu'on retrouve bien dans le bassin des Iullemmeden. Elles forment les trois horizons aquifères reconnus de bas en haut : Ct^1 , Ct^2 , Ct^3 (Leduc et Karbo, 1996). Les nappes Ct^1 et Ct^2 sont captives et se situent vers 120 à 150 m d'altitude, pour une profondeur de 70 m et renferment des eaux fossiles de plusieurs milliers d'années. Le Ct^3 est la nappe la moins profonde et se situe à 40 m sous les vallées sableuses et 70 m sous certains plateaux (Favreau, 2000).

Les aquifères alluviaux

Les aquifères alluvionnaires sont contenus dans des formations issues des alluvions du fleuve Niger ou des vallées. Ces formations sont d'âge quaternaire et sont composées d'argiles, de sables et de graviers. Elles abritent des nappes libres à faible puissance. Elles sont influencées par la pluviométrie. Leur épaisseur, variant de 4 à 20 mètres, leur confère un potentiel aquifère plus ou moins important, selon les zones. On assiste à un tarissement de cette nappe, à certains endroits, pendant la saison sèche (dès le mois de février).

2.3.2 Contexte hydrologique

Au Niger, le *Fleuve Niger* et ses affluents ainsi que les mares et les retenues d'eau artificielles constituent la principale source d'eaux de surface de la zone du Liptako nigérien. Le fleuve s'étend sur neuf pays en Afrique de l'Ouest et son bassin couvre 1.2 million de km^2 avec une longueur de 4 200 km et un débit moyen à l'exutoire maritime d'environ $6\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il sert à un grand nombre d'activités économiques et agricoles, pour l'alimentation en eau potable et la production d'hydro-électricité. Il traverse le territoire nigérien dans sa partie ouest, reliant la

frontière malienne et la frontière nigériane sur près de 650 km. Il constitue aussi l'élément vital de toute la partie ouest et sud-ouest du pays. Son régime d'écoulement est caractérisé par les hautes eaux ($1\,171\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ de débit) causées par les quantités de pluies sur la partie haute de son bassin versant (novembre à février), les basses eaux ($123\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ de débit) de mars à juin et une remontée faible des eaux ($670\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ de débit), suite à des pluies locales et aux eaux drainées par les affluents situés en rive droite de juillet à septembre (Alhou *et al.*, 2009). De nombreuses études ont permis de déterminer son influence, plus en tant que voie navigable, que source d'alimentation de barrages, que réserve de nourriture, etc. (Gallaire, 1995). La gestion de ses ressources en eau est confiée à un organisme inter-états : l'Autorité du Bassin du Niger (ABN), basée à Niamey.

D'amont en aval, les affluents du *Fleuve Niger* sont : le *Gorouol*, le *Dargol*, la *Sirba*, le *Diamangou*, la *Tapoa* et la *Mékrou*, dont les cours inférieurs matérialisent une partie de la frontière entre le Bénin et le Niger. Le régime hydrologique du *Fleuve Niger* est très sensible aux variations climatiques et ses débits annuels varient fortement à toutes les stations. Les années 1970 sont marquées par une baisse importante des débits, qui se sont amplifiées durant les années 1980, avant de retrouver les valeurs un peu plus élevées des années 1990 (Mahé *et al.*, 2011). La crue sahélienne a augmenté en raison de la dégradation des terres et l'augmentation des zones cultivées et le développement des sols nus, au détriment des zones en végétation naturelle (Diello *et al.*, 2006). Cette augmentation est associée à celle des écoulements de type rapide (Descroix *et al.*, 2009).

La géochimie des eaux du *Fleuve Niger* est caractérisée par un faciès bicarbonaté sodique de l'amont à l'aval de la ville de Niamey (Alhou, 2000).

2.3.3 Qualité des ressources en eau

Dans la zone d'étude, la ville de Niamey est la zone la plus peuplée et donc la plus exposée à des pollutions anthropiques. Le *Fleuve Niger* est le principal récepteur des rejets d'eaux usées de toute la ville. Les origines de la pollution des ressources en eau disponibles dans le Liptako nigérien et la zone couverte par le bassin hydrographique sont multiples : le développement des activités agricoles lié à la forte demande, les activités industrielles comme la brasserie, la tannerie, la teinture, l'huilerie et l'abattoir le long du fleuve, l'extraction aurifère à proximité des cours d'eau, la production de déchets solides d'environ 274 milliers de tonnes par année et les rejets de déchets hospitaliers.

A Niamey, comme dans la majorité des grandes villes d'Afrique de l'Ouest, la croissance démographique n'a pas été accompagnée par la création d'infrastructures de collecte et de

traitements adéquats des déchets ménagers et des eaux usées domestiques, qui sont actuellement rejetés dans le *Fleuve Niger* ou dans la nature sans traitement. Les travaux de Chippeaux *et al.*, (2002) ont montré une forte pollution azotée et bactériologique (coliformes et streptocoques fécaux) des puits superficiels, destinés à la consommation humaine dans la ville de Niamey. Ils mettent également en exergue que la pollution fécale augmente après la saison des pluies.

Les études réalisées sur la qualité physico-chimique et biologique des eaux du *Fleuve Niger* à Niamey montrent que les concentrations en NH_4 des eaux sont significativement plus élevées que celles des nitrates, dues à un apport en matière organique (Bartsch et Ingram, 1967 ; Alhou *et al.*, 2009). L'étude souligne une faible concentration en oxygène dissous (en dessous de 5 mg l^{-1}) au niveau de certaines stations (Alhou *et al.*, 2009). La conductivité et les concentrations en ions sodium, en alcalinité, et en ions potassium et calcium du fleuve Niger ont augmenté de façon significative alors que la teneur en oxygène dissous et la concentration en ions phosphate ont diminué ; montrant ainsi le niveau de la pollution dans la zone de Niamey (Camaïl *et al.*, 1987). Adamou *et al.*, (2015) soulignent des contaminations par les produits agrochimiques et les rejets urbains dans le fleuve et ses affluents, à partir de l'analyse des concentrations élevées des paramètres physico-chimiques mesurées dans le fleuve, à proximité de Niamey.

Cet état de l'art des connaissances disponibles sur la qualité des ressources en eau montre qu'il n'existe pas de statistiques exhaustives sur la qualité des eaux liées à l'utilisation des pesticides ou à l'exploitation minière artisanale au niveau du bassin hydrographique du fleuve Niger à Niamey.

2.3.4 Levé de coupe hydrogéologique

La coupe hydrogéologique C-D (Figure 7), de direction NNW-SSE, a été réalisée sur la base des coupes de forages et des relevés piézométriques (Figure 6). Elle montre la localisation des aquifères discontinus du socle notamment l'aquifère des altérites et celui des formations granito-gneissiques dans le Liptako nigérien.

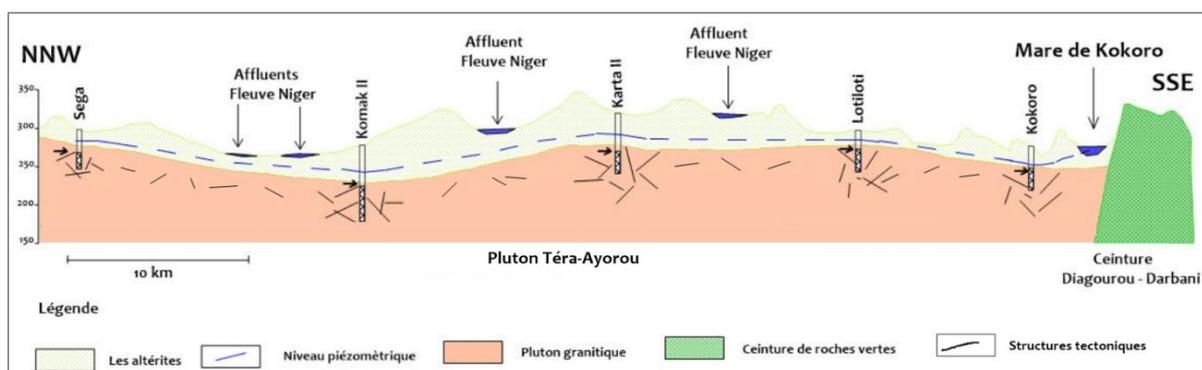


Figure 6 : Coupe hydrogéologique NNW – SSE montrant l'aquifère des altérites dans le pluton d'Ayorou.

2.4 Techniques d'extraction, contexte socio-économique de l'exploitation aurifère dans le Liptako nigérien

2.4.1 Ressources aurifères et techniques d'extraction

La plupart des zones cristallines en Afrique contiennent des minéralisations métalliques dont les exploitations industrielles et artisanales se sont accrues ces dernières années. Une trentaine de substances minières (minéraux industriels et matériaux de construction) réparties sur 247 gisements et indices sur différentes provinces métallogéniques ont été mis en évidence dans la zone du Liptako Gourma (rapport ITIE-NIGER, 2014). L'exploitation traditionnelle de l'or a commencé en Afrique de l'Ouest et dans le Liptako Gourma depuis plusieurs siècles et précisément depuis l'empire du Mali (vers 1325) (Campbell, 2004).

Le Liptako nigérien, partie nigérienne du Liptako Gourma, regorge d'importantes ressources minières dont la majorité reste inexploitée. L'or est le seul minerai exploité dans la zone d'étude avec la mine industrielle de la SML en activité depuis 2004 et une centaine de sites d'exploitation minière artisanale exploités depuis les années 1980. L'orpaillage avait pris beaucoup d'ampleur pendant cette année (Abdoul Razak, 2002 ; Hilson, G. 2009) suite à l'augmentation du prix de l'or, concomitante à une sécheresse au Sahel, qui a entraîné une ruée des populations démunies vers cette activité aurifère. Les sites les plus importants en termes de durée de vie et de nombre d'orpailleurs sont : Komabangou, Mbanga, Tchakam, Mamassey, Tangounga, Bouloundjounga et Mandaw, avec une production artisanale d'or d'environ 6 150 kg entre 2004 et 2011. Le nombre exact des orpailleurs en activité ainsi que le tonnage issu de l'orpaillage sont difficiles à inventorier, car l'orpaillage artisanal constitue une activité éphémère, dépendant des saisons et des nouvelles découvertes des zones minéralisées. On distingue l'exploitation minière industrielle de l'exploitation minière artisanale grâce à des critères tels que : (i) la dimension physique du gisement, (ii) le mode de gestion de l'exploitation, (iii) l'importance de l'investissement, (iv) le nombre et (v) le niveau de qualification des travailleurs et le type d'équipement. L'exploitation artisanale désigne des procédés artisanaux simples, ne nécessitant que peu d'investissement et mobilisant des travailleurs sans qualification.

Les techniques d'extraction artisanale dépendent de la nature du gisement. Ainsi, on distingue les fouilles superficielles dans les éluvions et les alluvions d'une part, et le fonçage de puits verticaux pour accéder aux filons et aux éluvions plus profondes, d'autre part. La majorité des sites comportent des puits de forme circulaire et de diamètre variant de 1,5 à 2 m. Le creusement se fait à l'aide d'outils traditionnels (pioches, barres à mine et pelles) et les échantillons prélevés sont remontés en surface pour être testés. L'exploitation se fait en galeries sur différentes directions

pouvant atteindre parfois plusieurs centaines de mètres. Les roches de recouvrement stériles sont souvent rejetées sur des surfaces non encore exploitées ou dans les puits voisins abandonnés. Dans certains cas, principalement lors de la découverte d'un gisement filonien, les puits sont forés dans la direction du filon sans tenir compte des dispositions réglementaires qui prévoient une distance moyenne de cinq mètres entre les puits. Dans ce genre de situation, la profondeur limite est fixée par la réglementation à 30 m. Ce qui n'est pas respecté par les orpailleurs, qui peuvent creuser jusqu'à 70 m.

Dans la méthode de fonçage de puits verticaux, le soutènement se fait à l'aide de bois enroulés en spires jointives. L'aération est assurée par des ventubes en plastique fabriqués localement. Le dénoyage se fait à l'aide des motopompes et l'eau extraite est souvent vendue à la population pour la consommation.

Les techniques de traitement et de récupération les plus utilisées par les orpailleurs dans le Liptako nigérien sont constituées de la gravimétrie, suivie d'amalgamation et de cyanuration. Avant le traitement, le minerai suit une phase du prétraitement par concassage jusqu'à une granulométrie de 15/20 mm.

2.4.2 Contexte socio-économique de l'exploitation aurifère

L'exploitation minière artisanale et à petite échelle (EMAPE) est une activité basée principalement sur les aspects sociaux, économiques et culturels. Elle est beaucoup plus pratiquée par les populations rurales dans toutes les zones d'orpaillage en Afrique, en général, et dans la zone du Liptako en particulier. Cette zone fait partie du Sahel avec une des populations les plus pauvres de la planète et dont la principale activité pratiquée est l'agriculture. Les pays du Sahel connaissent une véritable ruée vers l'or dès qu'une pépite est découverte. L'exploitation artisanale de l'or dans le Liptako nigérien a véritablement pris de l'ampleur après la sécheresse de 1982. Le Niger et la majorité des pays du Sahel ont connu des grandes périodes de sécheresse notamment en : 1968 - 1973 ; 1982 - 1985 et 1990-1991. Pendant ces périodes, les différentes localités ont connu de graves famines. La majorité des orpailleurs, les femmes et les enfants, pratiquent cette activité pour subvenir à leur besoin quotidien et par manque d'alternative de survie. L'exploitation minière artisanale offre de l'emploi, bien qu'incertain à la population. Elle réduit la migration urbaine de la population rurale.

Au Niger, dès qu'une pépite d'or est découverte dans les alluvions ou les éluvions, la ruée vers l'or commence par la population locale puis par les orpailleurs des autres zones environnantes et même des étrangers en quête de fortune. Un nouveau village temporaire se constitue, d'orpailleurs

professionnels en permanence, d'orpailleurs saisonniers et d'orpailleurs poussés par la pauvreté et le manque d'emploi. Il peut se créer en quelques semaines et disparaître aussitôt que de nouveaux sites plus avantageux sont découverts. De nouvelles activités économiques se développent avec la création d'emplois et l'acquisition de nouveaux moyens de subsistance et de nouvelles sources de revenus des familles.

2.4.2.1 Activités économiques essentielles

L'exploitation artisanale de l'or contribue au budget des Etats du Liptako Gourma, avec environ 800 sites d'orpaillage en activité. Selon un rapport de l'OCDE paru en 2018, la production aurifère artisanale et à petite-échelle, cumulée du Mali, du Burkina Faso et du Niger serait entre 15 et 85 tonnes, une estimation probable situant ce chiffre à environ 50 tonnes par an, soit un volume qui représente plus de 50% de la production industrielle légalement enregistrée pour l'année 2017 dans ces trois pays. L'extraction de cet or occupe environ 3.5 millions de personnes sur le territoire du Liptako Gourma. Elle permet à la population de générer des revenus. Elle favorise le développement d'autres activités génératrices de revenus, comme le petit commerce, la restauration, la location et la vente du matériel d'extraction comme les pelles, les houes, les sceaux, les cordes et même le transport. Ces emplois concernent toute la main d'œuvre de la chaîne d'extraction à la purification et à la commercialisation de l'or. Les chefs coutumiers et les maires perçoivent des taxes qui permettent d'améliorer les recettes de leurs localités. Le développement de ces activités participe donc au développement local et contribue fortement à la réduction de la pauvreté. L'exploitation de l'or est donc une composante essentielle pour le développement socioéconomique des populations du Liptako nigérien.

2.4.2.2 Dangers encourus dans l'orpaillage

L'exploitation artisanale de l'or est très peu encadrée par les états concernés. Elle est confrontée à d'énormes difficultés dans sa gestion, par exemple : le non-respect des législations en vigueur, les difficultés de cohabitation entre les orpailleurs et les industries minières, auxquelles vient s'ajouter l'insécurité dans le Sahel. Sur ce volet, les problèmes concernent le travail des femmes et des enfants, les conflits, l'insécurité, les effets sur la culture et la diminution des recettes par les Etats. Le nombre de femmes et d'enfants qui sont concernés par l'exploitation artisanale de l'or à l'échelle mondiale s'élève à plus de trois millions (O'Neill, J. D. et Telmer, K. 2017). Dans le Liptako nigérien, plusieurs femmes travaillent sur les sites d'orpaillage, principalement pour des tâches moins rentables comme le concassage, le lavage de minerai ou le relevage des rejets et d'autres pratiques comme le petit commerce, la restauration et la vente de matériel d'extraction. Certaines femmes sont des propriétaires de puits et gagnent beaucoup plus d'argent, en restant en

général sous la protection des hommes. Comme les femmes, les enfants travaillent également sur les sites d'orpaillage du Liptako nigérien avec des tâches similaires à celles des femmes. En général, les jeunes garçons quittent le secteur éducatif pour rejoindre les sites d'orpaillage dans l'espoir de gagner de l'argent pour s'acheter un vélo, une moto ou un téléphone, tandis que d'autres sont contraints de travailler pour aider leurs parents. Au même titre que l'ensemble des orpailleurs, ces populations dites vulnérables sont exposées aux blessures, aux maladies pulmonaires avec une augmentation des risques d'avortement chez les femmes et des malformations congénitales chez certains enfants nés de mères orpailleurs. Aussi, la majorité des orpailleurs travaillent sans équipements de protection et vivent dans des conditions difficiles et dangereuses pour leur santé (fréquences des accidents mortels et des graves blessures). La dépravation des mœurs (la prostitution, la criminalité, le vol et l'escroquerie) est une des conséquences de l'exploitation minière artisanale sur le plan culturel. Les sites d'orpaillage accueillent une diversité de population avec différentes cultures et engendrent la consommation de stupéfiants parfois pour mieux travailler dans les galeries. La crise sécuritaire au Sahel, a fortement impacté la présence des groupes armés et du banditisme sur certains sites d'orpaillage. L'étude réalisée en décembre 2019, par l'Institut d'Etudes de Sécurité (ISS) sur l'extrémisme violent, la criminalité organisée et les conflits locaux dans le Liptako Gourma, met en évidence les liens entre les différents groupes profitant de la vulnérabilité des économies locales, des rivalités entre les différents groupes socioprofessionnels et surtout de la faiblesse de la gouvernance locale pour exercer des activités illicites comme l'orpaillage, les trafics d'armes, de drogues, de motos, de carburant, du vol ou de l'enlèvement de bétail et du braconnage.

Sur le plan économique, certains états perdent la possibilité de faire une exploitation économique rentable à cause des places qu'occupent les orpailleurs et cela génère une perte de recette sur les industries extractives des pays.

2.5 Contexte socio-économique de l'utilisation de pesticides dans le bassin hydrographique du fleuve Niger

Au Niger, l'agriculture constitue la troisième source de revenus du pays, après l'exploitation de l'uranium et l'élevage. Elle se pratique principalement dans la zone sud du pays, qui correspond à environ 13% du territoire national (Guengant et Banoïn, 2003). C'est le secteur le plus important dans l'économie du pays. Elle représente plus de 40% du produit intérieur brut national et occupe 80% de la population, en majorité rurale. L'augmentation de la population nigérienne a engendré une augmentation des besoins alimentaires ces dernières années. Le pays connaît actuellement une dégradation continue de la situation alimentaire conduisant presque chaque année à une insécurité

alimentaire (Boureima et Harouna, 2007). Dans la zone d'étude, les zones d'activités agricoles concernent le bassin hydrographique du *Fleuve Niger*, au Niger. L'agriculture se pratique en grande partie pendant la saison des pluies. Le *Fleuve Niger* traverse le pays sur une longueur de 550 km de Ayorou à Gaya et constitue le principal cours d'eau du pays. Il est utilisé pour l'alimentation en eau de la population de Niamey à travers les stations de pompage de Goumel et de Yantala et aussi pour diverses activités telles que l'agriculture, l'élevage et les industries.

L'agriculture se pratique sur de petites exploitations familiales majoritairement utilisées pour des cultures vivrières (mil, sorgho, niébé et manioc). La riziculture est pratiquée le long du *Fleuve Niger* sur les aménagements hydroagricoles réalisés par l'Etat du Niger (FAO, 2011). Leur gestion initialement confiée à l'ONAHA, a été transférée aux organisations paysannes regroupées en coopératives agricoles avec un objectif de double culture du riz par an (Baron *et al.*, 2010). Quant aux cultures maraîchères, elles sont pratiquées sur les deux rives du *Fleuve Niger* et dans les dépressions créées par des cours d'eau anciens ou récents avec comme productions : la tomate, la salade, le chou, le poivron, la carotte, la courgette, le persil, le céleri et la laitue. L'activité agricole emploie de la main d'œuvre et participe efficacement à la lutte contre la pauvreté dans le pays.

La production agricole du pays est aussi soumise à des contraintes climatiques (Bassirou, 2007) et le gouvernement a initié plusieurs programmes de développement agricole visant à accroître l'intensité de la production pour satisfaire le déficit alimentaire. C'est ainsi que l'agriculture urbaine s'est développée dans certains quartiers de la ville de Niamey (Gouvernement du Niger, 2008a). Le principal facteur limitant de la production alimentaire au Niger est la disponibilité des ressources en eau.

La rivière *Mékrou* est un affluent temporaire de la rive droite du *Fleuve Niger* longue de 410 km qui prend sa source au Bénin dans la plaine à l'Ouest des Monts Atakora (Le barbe *et al.*, 1993 ; Vernet R., 1994). C'est la partie la plus arrosée du Niger avec 700 à 800 m de précipitations annuelles (Robert Vernet, 1994). La rivière longe la frontière entre le Bénin et le Niger sur plus de 100 km, à la limite du Parc W qui est inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco depuis 1996 et protégé depuis 2007 par la convention Ramsar. La superficie cultivable de cette zone est réduite puisque qu'il n'existe pas d'activités agricoles dans le Parc W. Le Bénin est le premier pays producteur de coton en Afrique devant le Mali, la Côte d'Ivoire et le Burkina Faso avec une production de 712 000 tonnes en 2020, constituant 80% des recettes d'exportations du pays (Ministère de l'Agriculture du Bénin). La rivière Mékrou est fortement concernée par cette production qui a commencé dès 1965, encouragée par la Compagnie Française pour le

Développement des Textiles (CFDT). Elle a connu une forte extension dans les années 1980 grâce à l'application à grande échelle de la culture (Leo J. De Haan, 1992).

En général, les cultures sont envahies par les ravageurs comme les chenilles, les criquets, les pucerons etc. et les producteurs font appel à l'utilisation des pesticides pour protéger ou traiter leurs cultures. En cas d'invasion de criquets, par exemple, les pertes sont de l'ordre de 1/3 de la récolte (Soumana *et al.*, 2014 ; Abdoul Habou *et al.*, 2015). Les pesticides utilisés au Niger, sont homologués par le Comité Sahélien des Pesticides (CSP) du CILSS : le pays a ratifié et signé plusieurs conventions et accords sur l'utilisation des pesticides. La Direction Générale de la Protection des Végétaux est en charge de la mise en œuvre de ces conventions et accords ainsi que de la réglementation au niveau national.

Bien que des dispositions d'utilisation soient mises en place, on dénombre plusieurs produits non homologués en vente et utilisés sur le territoire nigérien et même des produits interdits d'utilisation. Ces produits sont principalement importés de façon frauduleuse principalement du Nigéria, du Ghana et d'autres pays non membres du CILSS.

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES : échantillonnage et techniques analytiques

3.1 Techniques analytiques

3.1.1 Prélèvement et préparation des échantillons

3.1.1.1 Technique d'échantillonnage des roches

3.1.1.1.1 Choix des sites

Le prélèvement des échantillons de roches a été guidé par la géologie, d'une part, notamment les roches de la ceinture des roches vertes et, d'autre part par les sites d'exploitation artisanale de l'or. Les échantillons ont été prélevés à différents endroits et placés dans un sac en plastique. L'objectif de ce choix est de déterminer les concentrations minéralogiques des roches concernées par l'exploitation aurifère, à proximité des puits ou forages échantillonnés. Les lames minces ont été confectionnées au Laboratoire du CRGM au Niger et les sections polies au laboratoire de C2MA à l'IMT Mines Alès, en vue d'une analyse minéralogique.

3.1.1.1.2 Importance de l'analyse de la composition minéralogique et chimique des roches

L'origine de la contamination à l'arsenic et aux métaux traces dans les ressources en eau peut être naturelle ou anthropique. La zone d'étude est constituée de formations birimiennes situées en bordure NE de la dorsale de Man et couvrant une région s'étendant au Niger, au Mali, au Burkina, en Côte d'Ivoire, au Ghana et en Guinée. Le Liptako nigérien est réputé être une province qui abrite plusieurs sites d'exploitation artisanale et des zones minéralisées non exploitées. Les contaminations naturelles ont pour la plupart une origine géologique. Les contaminants se dissolvent dans l'eau pour parvenir dans les aquifères, les sources d'eau et les cours d'eau à la faveur des processus biogéochimiques (Kim *et al.*, 2003 ; Hug *et al.*, 2001 ; Smedley et Kinniburgh, 2002 ; Mandal et Suzuki, 2002). Des travaux récents ont montré que les eaux souterraines à haute teneur en arsenic proviennent des zones minéralisées en or des ceintures de roches vertes birimiennes (Smedley *et al.*, 2007). La contamination naturelle à l'arsenic dans les eaux souterraines a été mise en évidence dans les zones de minéralisation aurifère ayant des teneurs élevées en minéraux sulfurés (Lipfert *et al.*, 2006 ; Smedley *et al.*, 2007 ; Bondu *et al.*, 2017). Selon Lombi *et al.*, 2000b, l'arsenic est présent à de fortes proportions dans différents minerais métalliques (Cu, Pb, Co et Au) : 20 à 30 g/kg dans les minerais de cuivre et jusqu'à 110 g/kg dans certains minerais d'or. Pour mieux évaluer les apports de ces roches minéralisées en or dans la contamination des eaux à la pollution métallique dans le Liptako nigérien, il est nécessaire de connaître les concentrations en minéraux sulfurés, en général associés aux minéralisations aurifères. Une roche très riche en ces minéraux peut s'altérer puis ses composants peuvent se

mobiliser directement dans les puits et les forages de la zone d'étude (Smedley et Kinniburgh, 2002) ou même être transportée pour être déposée dans les sources d'eau disponibles. Certains métaux lourds présents naturellement à des concentrations élevées dans les roches de la zone d'étude peuvent se libérer in situ dans les ressources en eau suite à des réactions chimiques comme l'oxydation et la réduction, ou être transportés selon leurs mobilités. L'analyse minéralogique a été réalisée au Microscope Electronique à Balayage (MEB) équipé de sonde EDX en vue de quantifier le pourcentage massique des éléments chimiques présents dans les roches.

3.1.1.2 Technique d'échantillonnage des eaux souterraines

3.1.1.2.1 Stratégie d'échantillonnage

La zone d'échantillonnage couvre le bassin hydrographique du *Fleuve Niger* de la partie nigérienne, répartie de part et d'autre des deux rives constituant le *Fleuve Niger*, sur une superficie approximative de 400 km x 200 km (80 000 km²). Une étude préliminaire de la zone d'étude, selon la taille, les types d'activités anthropiques susceptibles de libérer des polluants métalliques dans l'environnement, ainsi que l'hétérogénéité des formations géologiques a été réalisée. Elle a permis de placer une grille d'échantillonnage systématique à la maille 50 km x 50 km superposant la direction du *Fleuve Niger* et perpendiculaire à la rivière Sirba dans la direction N45° (Figure 1). Un nœud de la grille est positionné à la confluence de la rivière Sirba dans le *Fleuve Niger*. Les aquifères concernés sont constitués de nappes discontinues du socle (fracturé ou altéré) et de nappes alluviales au niveau de la rive droite. En rive gauche, l'aquifère est celui du Continental terminal (Ct). Sur la rive droite, les points de prélèvement ont été choisis sur la base de la répartition spatiale des sites d'orpaillage, selon leur proximité par rapport aux affluents du *Fleuve Niger* et en tenant compte de leur disponibilité et de leur accessibilité. Sur la rive gauche, c'est la proximité avec les affluents du fleuve Niger notamment le *Kori de Ouallam* et le *Dallol Bosso* qui a été principalement prise en considération ainsi que la taille de la population environnante. Des échantillons de roches du Liptako nigérien ont été prélevés à proximité des grands sites d'orpaillage et au niveau des zones minéralisées, en vue d'examiner le lien entre leur composition minéralogique et les concentrations en éléments traces métalliques dans les aquifères.

3.1.1.2.2 Sites de prélèvement

La grille d'échantillonnage établie a permis d'obtenir un positionnement provisoire des sites de prélèvement des eaux souterraines au centre de chaque maille carrée de 50 km (Figure 7). Le choix des points concernés est basé sur : l'accessibilité des sites de prélèvement, la disponibilité

des eaux souterraines ainsi que l'emplacement de grands sites d'orpaillage. Compte tenu des problèmes sécuritaires, les prélèvements d'échantillons ont été restreints à certains sites. La priorité a été donnée aux forages puis au puits modernes ou traditionnels et enfin aux puits creusés dans les lits des rivières. La campagne d'échantillonnage a permis de prélever quarante-trois (43) échantillons d'eau. Soit trente-un (31) échantillons au cours des périodes de hautes eaux (entre juillet et septembre) et douze (12) pour les périodes de basses eaux (entre avril et juin). Ces échantillons des puits et des forages ont des profondeurs relativement faibles, sur la rive droite (entre 30 et 90 m pour les aquifères de socle et 20 à 30 m pour les nappes alluviales) et plus profondes au niveau de la rive gauche (jusqu'à 150 m pour le Ct²).

L'annexe 1 présente la liste des points d'échantillonnage

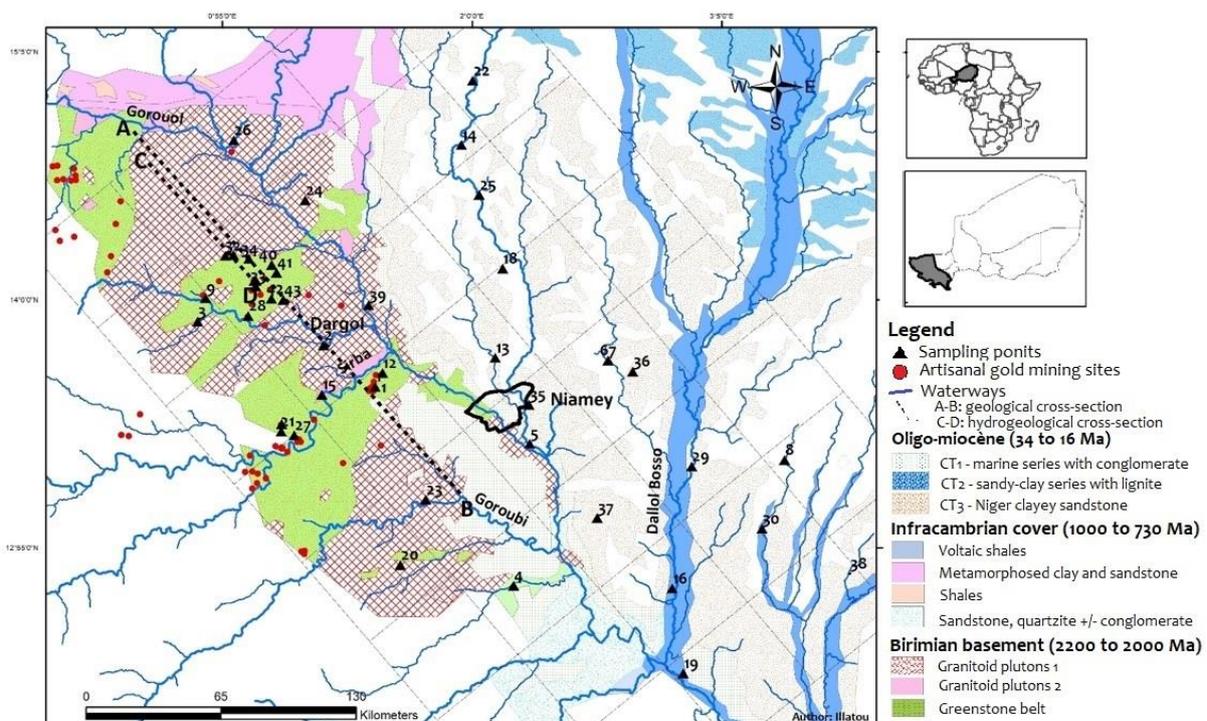


Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la zone d'étude montrant la localisation des sites de prélèvement, la grille d'échantillonnage et les sites d'orpaillage. Les traits de coupes géologique et hydrogéologique A-B et CD sont représentés en pointillés.

3.1.1.2.3 Matériel de prélèvement

La préparation du matériel d'échantillonnage a été réalisée au Laboratoire d'HydroSciences de Montpellier avant la mission de terrain. Les mesures de paramètres physiques (Ph, conductivité électrique et température) ont été réalisées in situ pour les eaux souterraines, avec des sondes PH-mètre et conductivimètre. Le matériel de prélèvement est constitué de flacons de polyéthylène de 1

litre destinés aux eaux souterraines et 60 mL pour les éléments traces, des tubes de 50 mL pour l'alcalinité et de 10 mL pour les éléments majeurs (anions et cations) et la spéciation. Des filtres jetables de 22 µm et des seringues ont été utilisés pour filtrer chaque échantillon. Les flacons de polyéthylène de 60 ml, destinés aux échantillons des éléments traces, ont été décontaminés en les remplissant pendant 3 jours avec de l'acide nitrique à 10% avant d'être vidés et nettoyés, au moins trois fois avec de l'eau MilliQ dans la Salle Blanche (SB) du Laboratoire d'HydroSciences. Ils ont été mis à séchage à 45°C avant leur utilisation.

3.1.1.2.4 Bilan des campagnes de prélèvement des eaux

Au total, quatre-vingt-deux échantillons des eaux ont été prélevés, dont quarante-trois échantillons des eaux souterraines (puits et forages) et trente-neuf échantillons des eaux de surface, des sédiments et des matières en suspension (MES) (tableau 2).

Tableau 2 : Bilan des campagnes d'échantillonnage des rivières et forages.

| Type d'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Ressources échantillonnées |
|--|-----------------------|--|
| Eaux souterraines | 43 | Puits et forages dans les régions de Tillabéri et de Dosso |
| Eaux de surface des affluents du <i>Fleuve Niger</i> | 13 | 04 échantillons du Dargol 07 échantillons de la Sirba 02 échantillons du Goroubi |
| Sédiments des rivières | 13 | Affluents du <i>Fleuve Niger</i> |
| Matières en suspension | 13 | Affluents du <i>Fleuve Niger</i> |
| Total échantillons | 82 | Eaux de surface et souterraines, sédiments et matières en suspension |

3.1.1.2.5 Technique de traitement

La méthode de prélèvement a été réalisée conformément au protocole d'échantillonnage du Laboratoire d'HydroSciences de Montpellier. Avant les travaux de terrain, un sachet en plastique constitué d'un flacon de 60 mL pour les éléments traces, un flacon de 50 mL pour l'alcalinité totale et deux flacons de 10 mL destinés aux éléments majeurs et à la spéciation ont été préparés pour chaque échantillon. Les tubes destinés à la spéciation ont concerné uniquement les zones d'exploitation aurifère de la rive droite. Sur le terrain, les nouvelles coordonnées des sites sont enregistrées avec un GPS et un bilan des activités environnantes principalement d'orpaillage est réalisé pour chaque point d'eau.

Les eaux souterraines ont été prélevées dans un flacon de 1 L destiné aux analyses chimiques. Avant chaque prélèvement, le flacon est rincé (Figure 8). Les échantillons destinés aux analyses des éléments traces sont prélevés dans les flacons de polyéthylène décontaminés de 60 mL et filtrés à 0,22 μm . Après le rinçage des flacons avec de l'eau et leur remplissage, l'échantillon est acidifié avec 100 μl d'acide nitrique suprapur (HNO_3) à 10% en vue de limiter la précipitation de certains éléments. Le flacon destiné à l'alcalinité est rempli sans filtration et à ras bord pour éviter l'entrée d'air et celui des éléments majeurs est systématiquement filtré à 0,22 μm également. L'échantillon destiné à la spéciation de l'arsenic est filtré dans les tubes de 10 mL et acidifiés avec deux gouttes d'acide acétique et trois gouttes de l'EDTA.

Une fois prélevés sur les sites, les échantillons sont conservés dans une glacière à environ 4°C pendant le voyage pour ensuite être stockés dans un réfrigérateur avant d'être envoyés au Laboratoire d'HydroSciences de Montpellier.



Figure 8 : Prélèvement des échantillons d'eau dans les puits et les forages.

3.1.1.3 Technique de prélèvement des eaux des rivières

3.1.1.3.1 Sites de prélèvement

La plupart des affluents du fleuve sur la rive droite proviennent de toute la partie orientale du Burkina-Faso constituée de formations cristallines et cristallophylliennes du Liptako Gourma. La zone regorge de mines industrielles et de centaines de sites d'exploitation artisanale d'or, réparties entre le Niger et le Burkina Faso. Le choix des points d'échantillonnage des eaux de surface a été guidé par la morphologie du bassin hydrographique et la répartition spatiale des sites

d'orpaillage par rapport aux rivières concernées (Figure 9). Ces rivières sont : le *Dargol*, la *Sirba* et le *Goroubi*. La rivière *Gorouol*, située plus au nord, ayant été affectée par d'intenses activités d'orpaillage par le passé, n'a pas pu être échantillonnée pendant la période de la thèse à cause de problèmes d'insécurité. La rivière Sirba a été beaucoup plus concernée par l'échantillonnage puisqu'elle est plus utilisée par les orpailleurs spécialisés dans la battée. Cette rivière prend sa source au Burkina Faso sous le nom de *Sebba* et traverse le Liptako nigérien pour se jeter dans le *Fleuve Niger*. En 2017, des poissons ont été retrouvés morts à la confluence entre la rivière *Sirba* et le *Fleuve Niger*, après la première pluie. Plusieurs sites d'extraction d'or à la battée ont été répertoriés sur cette rivière au Burkina Faso et au Niger, notamment pendant la période d'étiage. La rivière *Dargol* se trouve au Sud d'un ancien grand site d'orpaillage au Niger (Komabagou) et reçoit les eaux en provenance des sites environnants. Enfin la rivière *Goroubi* n'est pas concernée par l'exploitation artisanale de l'or mais se trouve en aval des anciens sites d'orpaillage comme celui de Tangounga, exploité à la frontière entre le Burkina et le Niger.

Les contaminations en métaux et en métalloïdes sont drainées sous forme dissoute et particulaire par les rivières et peuvent être stockées dans les sédiments. Ainsi l'échantillonnage a concerné ces trois fractions en vue d'évaluer l'état global de la qualité des cours d'eau dans les rivières du Liptako Gourma.

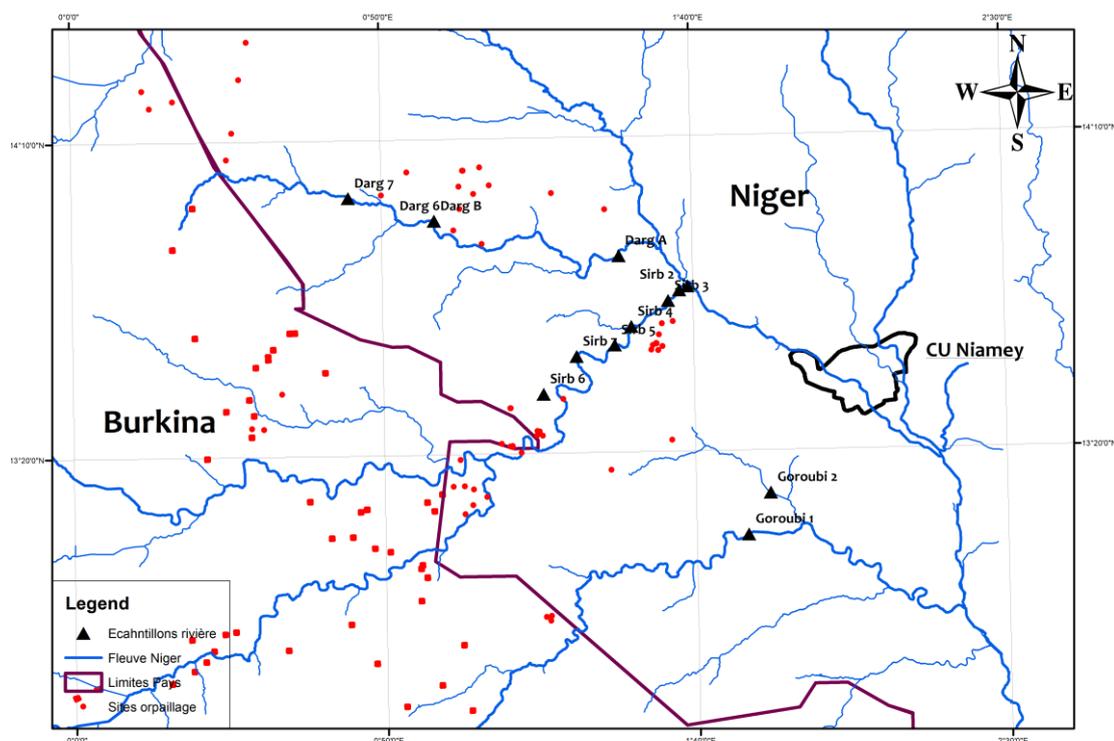


Figure 9 : Localisation des sites d'échantillonnage des eaux de surface sur la grille d'échantillonnage.

3.1.1.3.2 Matériel d'échantillonnage

La préparation du matériel d'échantillonnage a été réalisée au laboratoire HydroSciences Montpellier. Les mesures des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité électrique et température) ont été réalisées in-situ dans les rivières à l'aide d'une sonde multiparamètres de terrain et des sondes pH et de conductivité. Le matériel d'échantillonnage pour les eaux de surface est composé de flacons en polyéthylène de 1 litre destiné aux prélèvements dans les rivières, et de flacons de 60 ml, 50 mL et 10 mL (deux flacons) destinés respectivement à l'analyse des éléments traces, de l'alcalinité, des éléments majeurs (anions et cations) et de la spéciation de l'arsenic (arsénite et arséniate). La distinction entre les deux formes rédox de l'arsenic peut aider à la compréhension des processus à l'origine de sa mobilisation dans l'eau et permet de préciser la toxicité des eaux pour l'homme.

Des filtres PVDF de 0,22 µm de diamètre, préalablement nettoyés à l'acide nitrique puis à l'eau MilliQ pour éviter les contaminations, sont utilisés pour la récupération des matières en suspension, en utilisant une unité de filtration Nalgène de 500 mL et une pompe à vide manuelle ou électrique. Les filtres ont été pesés avant le démarrage de la campagne d'échantillonnage et préservés des poussières à travers des boîtes à filtre. Les sédiments ont été prélevés dans des pots en plastique.

3.1.1.3.3 Technique de prélèvement et préparation des échantillons

Au total, treize échantillons sont concernés par l'échantillonnage dont sept sur la rivière *Sirba* (Sirb 1 à Sirb 7), quatre sur la rivière *Dargol* (Darg 1 à Darg 4) et deux sur la rivière *Goroubi* (Goro 1 et Goro 2).

Pour les eaux de surface

Un flacon de 1 L a été utilisé pour tous les prélèvements d'eau destinés aux analyses chimiques. Après la filtration de 250 à 500 mL d'eau (selon sa turbidité), l'eau filtrée est répartie dans les différents flacons. Celui de 60 mL destiné à l'analyse des éléments traces est acidifié avec 60µL d'acide nitrique suprapur concentré. Les filtres sont ensuite séchés à température ambiante sur une étagère à l'abri de la poussière puis pesés avant leur envoi au laboratoire HydroSciences. Les sédiments sont prélevés à chaque station, à l'aide d'une spatule et placés dans les flacons. Les échantillons (eau, sédiment et matière en suspension) correspondant à chaque point de

prélèvement sont regroupés dans un sac en plastique. La mesure des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité et température) a été effectuée in situ (Figure 10).



Figure 10 : Prélèvement des échantillons d'eau dans la rivière Sirba.

Pour les sédiments

Les sédiments des trois rivières ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 10 mL directement dans le lit majeur des rivières. Le prélèvement s'est réalisé après la saison des pluies, au moment où les eaux ont commencé à se retirer. Ces rivières charrient de grandes quantités de particules à partir des roches du socle Liptako Gourma, situées en amont. Lorsque le débit diminue, les particules de différentes tailles se déposent dans le lit de ces rivières. Le prélèvement se fait sur les fractions les plus fines.

Avant de passer à l'étape d'analyse, les échantillons sont congelés puis lyophilisés et subissent une phase de broyage au mortier en agate puis une minéralisation par micro-ondes Ultraware (Milestone) au laboratoire HydroSciences Montpellier. Pour chaque échantillon, 50 mg de sédiment sont mis dans un tube adapté pour micro-onde. On ajoute trois (3) mL d' HNO_3 concentré, un (1) mL d' HCl concentré et un (1) mL d' HF concentré. Le mélange est homogénéisé au vortex, puis placé dans le système micro-ondes pour une minéralisation comprenant 5 minutes à 100°C , suivi de 5 minutes à 150°C puis de 10 minutes à 200°C . Une fois la minéralisation terminée, le tube est transvasé dans un saviglax en téflon de 30 mL, puis évaporé à sec à $70\text{-}80^\circ\text{C}$.

Le résidu est repris avec trois (3) mL d'HNO₃ pur et placé pendant 20 minutes au bain ultra-sons puis réchauffé sur une plaque chauffante à 100°C pendant 10 min. Après un refroidissement d'une heure, le minéralisat est transvasé dans des flacons Stérilin de 30 mL et complété avec de l'eau MilliQ jusqu'à environ 30 g du poids total. Ensuite, la solution est diluée au 1/10 de la masse avec de l'eau ultra pure (1 mL d'échantillon dans 9 mL d'eau ultra pure). L'échantillon ainsi conditionné est prêt à être analysé par ICP MS.

Pour la détermination de la concentration en mercure, un aliquot de sédiment sec et broyé est utilisé. L'analyse est réalisée à l'aide d'un analyseur de mercure, DMA 80 (Milestone).

Pour les matières en suspension

Avant le démarrage de la campagne d'échantillonnage, les filtres de 0.22 µm de diamètre ont été préalablement décontaminés avec du HNO₃ et pesés dans la salle blanche d'HydroSciences Montpellier. Les matières en suspension ont été prélevées pendant la campagne de prélèvement des eaux de surface. L'échantillonnage a eu lieu pendant la saison des pluies et pendant la saison sèche. La quantité de MES récupérée dépend fortement de la saison ; les eaux sont plus chargées en MES pendant la saison des pluies. Après cette filtration, les échantillons sont séchés à température ambiante à Niamey avant d'être acheminés en France. Après la pesée au laboratoire, les échantillons sont minéralisés selon la même procédure que pour les sédiments.

3.1.1.4 Technique de prélèvement des eaux du fleuve Niger et de la rivière Mékrou

3.1.1.4.1 Sites d'échantillonnage

L'étude préliminaire de la zone d'étude selon sa taille, les types d'activités agricoles réalisées le long du fleuve Niger, et à proximité de ses affluents a permis de sélectionner six (6) sites de prélèvement dont cinq (5) sur le *fleuve Niger* et un (1) à sa confluence avec la rivière *Mékrou*. L'objectif est d'analyser les pesticides utilisés et couvrir l'ensemble du bassin hydrographique (*Figure 1*). Chaque site de prélèvement présente une particularité qui a guidé son choix. Le site F1 se trouve à la rentrée du fleuve Niger du Mali, où il n'existe pas des activités agricoles intenses du côté nigérien et aucun apport de ses affluents au Niger. Le site F2 se trouve à la confluence entre le *Fleuve Niger* et son affluent de la rive droite, la *Sirba*, où se situent des parcelles agricoles pour les cultures maraichères, et en amont des stations de pompage pour l'alimentation en eau de la ville de Niamey. Le site F3 se situe en amont de la ville de Niamey et avant les grands sites de maraichage et le site F4 en aval de Niamey avec plusieurs activités anthropiques et en aval également des sites de maraichage et des périmètres irrigués de Saga et de Liboré. Le site F6 se trouve juste à l'aval de la confluence de la rivière Mékrou avec le fleuve Niger. Son analyse

permettra d'évaluer la contamination en pesticides provenant de cette rivière. Enfin le site F7, situé à Gaya, qui est une zone sahélo-soudanienne, est situé à la sortie du fleuve Niger du territoire nigérien. Ce dernier site permettra d'évaluer les apports en pesticides de la partie nigérienne. Le tableau 3 donne le bilan des sites échantillonnés.

Tableau 3 : Bilan des sites échantillonnés.

| Rivières échantillonnées | Nombre des sites |
|---------------------------------|-------------------------|
| Fleuve Niger | F1, F2, F3 F4 et F7 |
| Rivière Mékrou | F6 |
| Total sites | 6 |

3.1.1.4.2 Matériels d'échantillonnage

Le matériel d'échantillonnage est constitué d'un pH-mètre, d'un conductimètre pour les mesures in situ des paramètres physiques et de flacons en verre de 1 L et 500 mL. Le matériel de filtration est constitué d'une unité de filtration Nalgène pour flacon GL45 avec un adaptateur Nalgène GL 32, une pompe à main et une boîte de 100 filtres jetables GF/F. Le matériel du laboratoire est constitué d'une micropipette de 50µl, des tubes vides et frittés, des cartouches Oasis HLB et des tubes contenant des solutions d'atrazine d5 comme standard internes. Les cartouches Oasis HLB ont été conditionnés au Laboratoire CREER avec 5 mL d'acétonitrile sous vide, suivi de 5 mL de méthanol (MeOH) et 5 mL d'eau ultrapure (Ibrahim *et al.*, 2013b) et transportées dans une glacière jusqu'au Niger.

Pour l'échantillonnage par POCIS, les matériels sont constitués de supports de fixation avec leurs vis, de cages confectionnées avec des sceaux pour protéger les supports, d'un bidon vide servant de flotteur à la surface de l'eau et d'une corde pour suspendre la cage.

Pour les deux (2) types d'échantillonnage, une pompe à membranes raccordée à une fiole de 1 litre en polypropylène, par un tuyau flexible, a été utilisée pour la filtration lors des travaux d'extraction.

3.1.1.4.3 Technique d'échantillonnage

Les deux campagnes d'échantillonnages, ponctuels et passifs, ont été réalisés pendant la saison hivernale entre les mois d'août et de septembre, et pendant la saison sèche entre les mois d'avril et de mai au niveau des six (6) sites d'échantillonnage sélectionnés afin de mieux évaluer la contamination dans le même contexte hydrologique du fleuve Niger. Sur chaque site, les mesures

in situ ont permis de recueillir le pH et la conductivité du milieu et le POCIS est déployé en triple (3 POCIS) pendant une période de 15 à 20 jours (Figure 11). Ils sont placés dans une cage, rattachés à un bidon vide qui flotte et immergés verticalement dans l'eau de la rivière. Au moment du retrait, les POCIS sont rincés à l'eau Milli Q, enveloppés dans du papier aluminium, puis introduits dans un sac en plastique et conservés dans une glacière avant d'être acheminés au laboratoire pour extraction.

Les échantillons d'eaux sont prélevés manuellement dans des bouteilles en verre de 1 litre préalablement rincées avec l'eau à prélever, les jours de déploiement et de retrait de POCIS.

Ils sont également conservés dans une glacière lors du transport avant la phase d'extraction. Les paramètres physico-chimiques de l'eau sont également mesurés avec une sonde multi paramètres.

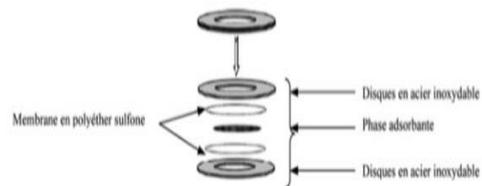


Figure 11 : Echantillons par POCIS

Dispositif d'extraction d'échantillons au Niger

La phase d'extraction des échantillons d'eau est réalisée au Niger (Figure 12). L'eau prélevée a été répartie dans deux flacons de 500 mL, et filtrée sous vide à l'aide d'une unité de filtration Nalgene avec un filtre GF/F de 0,7 μm de porosité ; en vue d'éliminer les matières en suspension. Sur chaque échantillon, 50 μL d'atrazine ont été ajoutés comme traceur de rendement d'extraction. L'extraction en phase solide est réalisée à l'aide de cartouches conditionnées. Ces cartouches sont conservées dans un réfrigérateur à Niamey avant d'être transportées au Laboratoire d'Alès. Avant l'extraction, les cartouches Oasis HLB® ont été activées avec 5 mL d'acétonitrile sous vide, suivi de 5 mL de méthanol (MeOH) et 5 mL d'eau ultrapure (Ibrahim *et al.* 2013b).



Figure 12 : Dispositif d'extraction installé à IRD Niamey.

Le tableau 4 ci-dessous donne le bilan de deux campagnes de prélèvements par saison.

Tableau 4 : Bilan des campagnes de prélèvements.

| Saisons | Sites | Date prélèvement 1 | Date prélèvement 2 | POCIS |
|---|-------|--------------------|--------------------|----------|
| Saison des pluies (juin à septembre) | F1 | 07/08/19 | 29/08/19 | 21 jours |
| | F4 | 06/09/19 | | |
| | F6 | 09/08/19 | 30/08/19 | 21 jours |
| Saison sèche (octobre à mai) | F2 | 01/05/19 | 29/05/19 | 15 jours |
| | F3 | 01/05/19 | | |
| | F4 | 21/04/19 | 07/05/19 | 15 jours |
| | F7 | 06/05/19 | 21/05/19 | 15 jours |

3.1.1.4.4 Elution et concentration des échantillons

L'élution de cartouches Oasis HLB a été réalisée au Laboratoire CREER après un séchage sous vide d'1 heure. Les analytes sont ensuite récupérés en éluant les cartouches avec 8 mL d'acétonitrile à un débit de 1 mL/min (Mhadhbi *et al.*, 2019). Pour les POCIS, un dispositif a été mis en place à Niamey pour transférer les phases dans un tube en phase solide (SPE) vide comportant deux frittés de polyéthylène d'une porosité de 20µm à la base et au sommet. Un Visiprep a été utilisé pour l'extraction en phase solide (SPE) de Supelco (Bellefonte, USA).

Les extraits issus de l'extraction ont été concentrés sous un doux courant d'azote pour obtenir des extraits finaux de 1,5 mL, qui ont été dopés avec la simazine d5 avant d'être analysés par HPLC-MS/MS (Ibrahim 2013).

3.1.2 Méthodes analytiques

3.1.2.1 Microscopie Electronique à Balayage (MEB) couplée à la sonde EDX

Les roches ont été analysées à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB) Quanta 200 FEG de FEI couplé à un analyseur de spectroscopie de rayons X à dispersion d'ondes Oxford INCA-vision (EDX) du laboratoire C2MA de l'IMT Mines Alès pour déterminer la composition minéralogique de chaque roche. Les observations et les analyses ont été réalisées sur des sections polies des échantillons des roches du socle. L'analyseur de spectroscopie de rayons X à dispersion d'ondes Oxford INCA-vision (EDX) a permis de déterminer la composition précise de certains minéraux sulfurés et de quantifier ces derniers.

3.1.2.2 ICP-MS

La méthode d'analyse utilisée pour déterminer les éléments traces métalliques (ETM) et la spéciation de l'arsenic des échantillons d'eau, des sédiments, des roches et des matières en suspension, est la spectrométrie de masse à plasma et à couplage inductif ou ICP-MS (en anglais: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Toutes ces analyses ont été réalisées par le Laboratoire d'HydroSciences Montpellier et sa plateforme AETE-ISO.

Paramètres de contrôle de l'analyse de l'ICP-MS

Les paramètres tels que les limites de détection, les limites de quantification, les rendements et les précisions ont été déterminés. La vérification de la qualité de l'analyse des eaux a été réalisée à partir des eaux de référence certifiées (CNRC SLRS-5, NIST SRM 1643e). La précision est supérieure à 5 % par rapport aux valeurs certifiées. Les erreurs analytiques (écart-type relatif) sont inférieures à 5 % pour les concentrations dix fois plus élevées que les limites de détection.

Pour les échantillons solides minéralisés, la précision est estimée à l'aide du matériau de référence NCS DC70317 du LGC (n=5) et se situait dans les 10% de la valeur certifiée. Les blancs de minéralisation représentaient moins de 5 % des concentrations en éléments traces particuliers.

3.1.2.3 Chromatographie ionique

Les éléments majeurs ont été analysés par chromatographie ionique DIONEX ICS-1000 à la plateforme AETO-ISO du laboratoire d'HydroSciences de Montpellier, et l'alcalinité a été déterminée par un titreur. Selon les valeurs de la conductivité mesurée sur le terrain, les échantillons ont été dosés une, deux fois, et même plus pour de grandes valeurs de conductivité. Les facteurs de dilution ont été calculés et utilisés pour déterminer la concentration finale de chaque échantillon. Les éléments analysés sont constitués de HCO_3^- , F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} pour les anions et Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} et NH_4^+ pour les cations.

3.1.2.4 Chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse

3.1.2.4.1 Méthode d'analyse des eaux

L'analyse des extraits a été réalisée à l'IMT Mines Alès par HPLC-MS à l'aide d'un système HPLC Alliance (Waters Series 2695). Ce système est équipé d'une pompe quaternaire, d'un dégazeur et un passeur d'échantillons. La séparation analytique a été réalisée avec une colonne analytique Kinetex C18 (100 mm \times 4.6 I.D. \times 260 ; Phénoménex) (Mhadhbi *et al.*, 2019). L'eau Milli-Q et l'acétonitrile, comprenant tous deux 0,05 % d'acide formique, ont été utilisés comme phase mobile, à un débit constant de 0,4 mL/min. Le gradient linéaire a commencé à 60% et atteint à 100% en 10 min pour permettre le passage de l'acétonitrile, suivi d'une stabilisation avant de revenir aux conditions initiales pendant 2 min. Le système a été couplé à un spectromètre de masse triple quadripôle (Micromass Quattro micro MT, Waters) équipé d'une source d'ionisation électrospray (ESI), utilisé comme dispositif de détection et fonctionnant en mode ion positif. L'argon a été utilisé comme gaz de collision. L'acquisition spécifique des ions de chaque composé a été réalisée avec le mode de réaction multiple (MRN).

Trente-deux composés ciblés, constitués de vingt (25) pesticides (acétochlore, alachlor, atrazine, azoxystrobine, carbendazime, chlortoluron, diméthomorphe, diuron, époxiconazole, flazasulfuron, imidachlopride, isoproturon, linuron, métalaxyl, métholachlore, oxydiaxyl, prochloraz, propyzamide, prosulfocarbe, pyriméthanyl, simazine, tébuconazole, terbuthylazine, tétraconazole) et sept (7) produits de dégradation (DCPMU, DCPU, DEA, DET, DIA, Simazine hydroxy et terbuthylazine hydroxy) ont été analysés (tableau 5). Les résultats analytiques ont été récupérés à partir de deux transitions dont une pour la quantification des substances ciblées et une autre pour la confirmation de leur identification.

Tableau 5 : Limite de détection (LOD) et de quantification (LOQ) obtenues par HPLC/MS et limite de quantification (LOQ) calculée pour les échantillons d'eau (Poulier *et al.*, 2014) et les taux d'accumulation déterminés au laboratoire.

| Substances actives | Famille chimique | LD analytique (µg/L) | LQ analytique (µg/L) | LQ POCIS (ng/L) | LQ eaux (ng/L) | Taux d'accumulation | Rs références (L/jour) |
|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------------------|
| Herbicides | | | | | | | |
| Acetochlore | Chloroacétanilide | 2,2 | 7,5 | 1,6 | 22,5 | 0,223 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Alachlor | Chloroacétamide | 1,1 | 3,8 | 0,7 | 11,4 | 0,256 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Atrazine | Triazine | 0,4 | 1,5 | 0,3 | 4,4 | 0,254 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Atrazin-desethyl-DEA | Triazine | 1,1 | 3,7 | 1,3 | 11 | 0,133 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013b |
| Chlortoluron | Urea | 0,7 | 2,3 | 0,4 | 6,8 | 0,252 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| DCPMU | Urea | 1 | 3,5 | 0,6 | 10,4 | 0,285 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| DCPU | Urea | 1,2 | 4 | 0,6 | 12 | 0,333 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013b |
| DET | Triazine | 0,5 | 1,7 | 0,3 | 5 | 0,254 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013b |
| DIA | Triazine | 1 | 3,4 | 2,4 | 10,1 | 0,068 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Diuron | Phenylurea | 0,7 | 2,3 | 0,4 | 6,9 | 0,257 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Flazasulfuron | Sulfonylurea | 0,7 | 2,2 | - | 6,6 | Indisponible | |
| Isoproturon | Urea | 0,9 | 2,9 | 0,6 | 8,7 | 0,237 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Linuron | Urea | 0,9 | 2,8 | 1 | 8,5 | 0,141 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Metolachlor | Chloroacétanilide | 0,4 | 1,3 | 0,2 | 4 | 0,268 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013b |
| Oxadixyl | Phenylamide | 1,1 | 3,6 | 0,7 | 10,8 | 0,263 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Propyzamide | Benzamide | 0,8 | 2,6 | 0,6 | 7,8 | 0,195 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Prosulfocarbe | Thiocarbamate | 0,5 | 1,6 | 1 | 4,7 | 0,071 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Simazin | Triazine | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 1,2 | 0,218 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Simazine hydroxy | Triazine | 0,7 | 2,3 | - | 6,9 | Indisponible | |
| Terbutylazine | Triazine | 0,3 | 1,1 | 0,3 | 3,3 | 0,163 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Terbutylazine hydroxy | Triazine | 0,7 | 2,5 | - | 7,4 | Indisponible | |
| Fongicides | | | | | | | |
| Azoxystrobine | Strobilurin | 1 | 3,2 | 1 | 9,5 | 0,154 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Carbendazime | Bendimidazole | 0,5 | 1,6 | 0,3 | 4,8 | 0,304 | Poulier <i>et al.</i> 2015 |
| Dimethomorphe | Morpholine | 0,6 | 1,9 | 0,2 | 5,8 | 0,395 | Poulier <i>et al.</i> 2016 |
| Epoxiconazole | Triazole | 0,7 | 2,3 | 0,4 | 6,9 | 0,28 | Ahrens <i>et al.</i> 2015 |
| Metalaxyl | Phenylamide | 0,8 | 2,7 | 0,5 | 8 | 0,264 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Penconazole | Triazole | 1 | 3,4 | 0,6 | 10,2 | 0,279 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |

| | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|-----|-----|-----|------|--------------|------------------------------|
| Prochloraze | Azole | 0,2 | 0,7 | 0,4 | 2 | 0,08 | Desgranges 2015 |
| Pyrimethanil | Anilinopyrimidine | 1,1 | 3,6 | 0,7 | 10,9 | 0,231 | Ibrahim <i>et al.</i> 2013a |
| Tebuconazole | Triazole | 0,7 | 2,2 | 0,4 | 6,5 | 0,24 | Greenwood <i>et al.</i> 2007 |
| Tetraconazole | Triazole | 0,7 | 2,2 | - | 6,6 | Indisponible | |
| Insecticides | | | | | | | |
| Imidaclopride | Néonicitinoïde | 1,7 | 5,6 | 0,9 | 16,7 | 0,29 | Poulier <i>et al.</i> 2015 |

Les produits de dégradation sont : DCPMU N-(3,4 dichlorophényl)-N-(méthyl)-urée, DCPM N-(3,4 dichlorophényl)-urée, DET désethyl terbuthylazine, DEA Atrazine-Desethyl, DIA Atrazine déisopropyl.

3.1.2.4.2 Assurance qualité / contrôle

La linéarité, les LOQ et les LOD, la précision et l'exactitude des méthodes analytiques ont été soigneusement analysées. Les LOD ont été calculées comme $3 \times S_{y/x}/b$ et les LOQ comme $10 \times S_{y/x}/b$, où $S_{y/x}$ est l'écart type résiduel et b est la pente des courbes d'étalonnage de la matrice. Les LOD et LOQ obtenus par HPLC/MS (LOD et LOQ analytiques exprimées en $\mu\text{g/L}$) sont répertoriés dans le Tableau 1. Les LOD et LOQ de tous les pesticides sélectionnés ont été déterminées à partir des courbes d'étalonnage pour chaque campagne analytique dans laquelle $R^2 > 0,98$. La limite de détection analytique va de 0.10 à 2.20 $\mu\text{g/L}$ et la limite de quantification de 0.40 à 7.50 $\mu\text{g/L}$.

Le taux de récupération moyen dans la solution d'eau synthétique enrichie avec les 32 pesticides (tableau 2) est de 63%, avec la récupération la plus élevée pour la simazine (101 %) et la plus faible pour le DPCU (8%). Le flazasulfuron, la terbuthylazine hydroxy et la simazine hydroxy n'ont pas été récupérés.

Un matériau de référence certifié (WaR™ Pollution Nitrogen Pesticides, Lot No. P246-674) de la ERA Waters Company (Golden, USA) a été utilisé pour déterminer les taux de récupération de pesticides dans les échantillons d'eau. Le matériel de référence est une solution aqueuse composée de 24 pesticides dont les 6 pesticides sélectionnés dans notre étude (alachlore, atrazine, DEA, DIA, métolachlore et simazine). Les concentrations de pesticides dans le matériau de référence varient de 3,37 à 16,80 $\mu\text{g/L}$. Les rendements de récupération et les coefficients de variation sont de $108 \pm 4 \%$ (atrazine), $78 \pm 4 \%$ (alachlor), $61 \pm 3 \%$ (DEA), $58 \pm 3 \%$ (DIA), $110 \pm 2 \%$ (métolachlore) et 79 ± 2 (simazine) après extraction en phase solide (Oasis HLB) et analyse HPLC/MS ($n = 9$) de l'échantillon d'eau du matériau de référence en utilisant notre méthode de laboratoire.

Les rendements moyens d'extraction avec l'atrazine-d5 est respectivement de 98 ± 11 % et de 90 ± 12 % pour les échantillons ponctuels et passifs ($n = 33$ échantillons). Le coefficient de variation moyen avec l'étalon interne simazine-d5 est de $17 \pm 6\%$ pour toutes les injections HPLC/MS ($n = 120$ injections).

3.1.2.4.3 Analyse statistique des données

Pour toutes les analyses, des mesures analytiques en triple ont été effectuées et les données ont été répertoriées sous forme de moyenne \pm écart type. Les traitements statistiques des données ont été réalisés à l'aide du logiciel d'analyse STATISTICA et la signification statistique a été fixée à $p < 0.05$.

3.2 Méthodologie d'enquête sur les pratiques agricoles et utilisation des pesticides

Les informations sur les pratiques agricoles et les pesticides utilisés par les producteurs ont été collectées à partir des questionnaires. L'échantillon représentatif de la population des agriculteurs enquêtés est composé de 30 producteurs en majorité des hommes, sur les sites des Aménagements Hydro-Agricoles (AHA) de Liboré et de Saga destinés à la riziculture et correspondant au site d'échantillonnage F4, et les sites maraichers, situés en aval de la ville de Niamey le long du fleuve Niger. Les principales activités pratiquées le long du *Fleuve Niger* sont constituées de l'agriculture urbaine pratiquée par environ 600 producteurs maraichers sur le site de Gamkallé et les deux périmètres irrigués, destinés à la riziculture, utilisés par environ 1800 producteurs des villages environnants. Ces activités agricoles sont pratiquées sur deux récoltes dans l'année.

L'élaboration du questionnaire d'enquête a tenu compte de données générale sur l'exploitant telles que : (i) le niveau d'instruction, (ii) l'âge et la formation agricole reçue, (iii) la superficie cultivée en maraichage ou en irrigation, (iv) les pratiques agricoles et l'origine de l'eau utilisée, (v) le type, la fréquence et la technique d'utilisation des engrais chimiques et des pesticides. La dernière partie du questionnaire a concerné l'insertion des producteurs dans les réseaux professionnels et leurs connaissances sur les enjeux environnementaux de l'utilisation des pesticides, ainsi que leur avis sur les perspectives d'amélioration de leur activité.

Les objectifs de l'enquête ont été d'abord expliqués aux membres de la coopérative et aux producteurs présents sur les sites pour obtenir leur implication. L'enquête a été réalisée avec la parfaite collaboration des producteurs avec un taux de réponse de 100%. L'enquête a concerné vingt (20) producteurs des sites irrigués et dix (10) sur les sites maraichers (Figure 13).



Figure 13 : Déroulement des enquêtes de terrain sur le périmètre irrigué de Liboré

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Résultats

4.1.1 Composition minéralogique et chimique des roches

4.1.1.1 Concentration en éléments traces et majeurs dans les roches

Les concentrations en éléments traces ont été quantifiées pour plusieurs éléments dont Co, Ni et As, communément associés à certains sulfures.

4.1.1.1.1 Les minéraux sulfurés

L'altération des minéraux sulfurés est considérée comme la première source primaire de l'arsenic dans les eaux souterraines. Ainsi, les analyses au MEB ont permis de mettre en évidence les minéraux sulfurés ainsi que leur produit d'altération dans les échantillons des roches magmatiques de la zone d'étude à des concentrations variables. La pyrite (FeS_2) est le minéral sulfuré le plus abondant dans les roches. Elle présente des tailles variables et des concentrations dans différents spectres de la roche basaltique (Figure 14).

Les minéraux sulfurés associés au cuivre sont constitués de la chalcopirite (CuFeS_2) et de la chalcocite (Cu_2S). La chalcopirite est le minéral de cuivre le plus abondant dans les schistes et les diorites de la zone d'étude (Figure 15 & 16). Le Zinc se rencontre dans la sphalérite (ZnS). Les minéraux accessoires sont constitués de pyrrhotite et de pentlandite ($(\text{Fe}, \text{Ni})\text{S}$), qui existent à des concentrations élevées dans les roches magmatiques notamment le basalte. L'arsénopyrite (FeAsS) n'a pas été détectée dans notre étude alors que ce minéral prédomine avec la pyrite dans les zones aurifères du socle birimien au Burkina Faso (Béziat et al., 2008 et Smedley et al., 2007). L'arsenic pourrait être associé en traces aux autres sulfures mais également aux oxydes de fer et de manganèse, abondants dans les roches de la zone d'étude. Selon Matera (2001), les minéraux sulfurés contiennent de l'arsenic à différentes concentrations. Ils sont stables en conditions réductrices. Leur oxydation aboutit à la libération de l'arsenic dans le milieu naturel (Laperche, 2003). L'oxydation de ces minéraux sulfurés peut jouer un rôle important dans la mobilisation de l'arsenic dans les eaux souterraines.

L'ensemble des résultats d'analyse des roches est cohérent avec la détection des éléments traces Mn, Ba, Co, Ni, As dans les eaux des puits et des forages des zones d'orpaillage du Liptako nigérien.

Ces minéraux sulfurés sont principalement rencontrés dans les roches basaltiques, et dans les diorites. Ils se rencontrent en traces dans les schistes et presque inexistant dans les granites et les diorites quartziques.

Les figures 14, 15, 16, 17 et 18 ci-dessous montrent les spectres des minéraux sulfurés dans la zone d'étude.

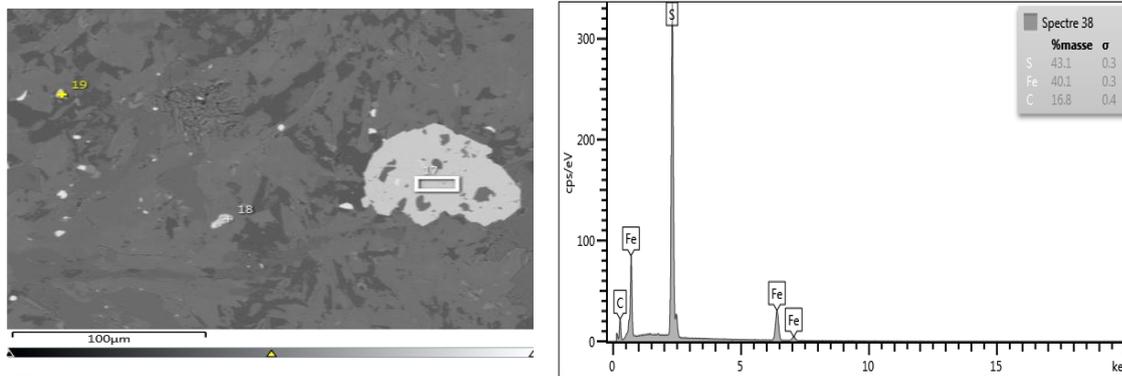


Figure 14 : Image au MEB du basalte avec un exemple de spectre EDS correspondant à la pyrite.

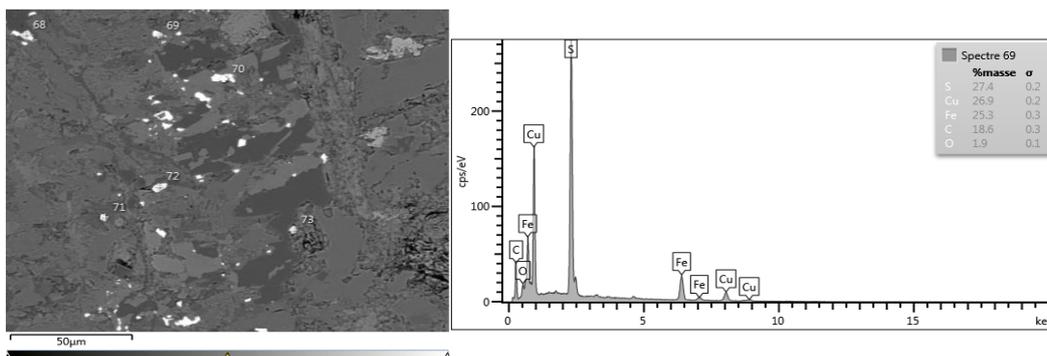


Figure 15 : Image au MEB de la diorite avec un exemple de spectre EDS correspondant à la chalcopyrite.

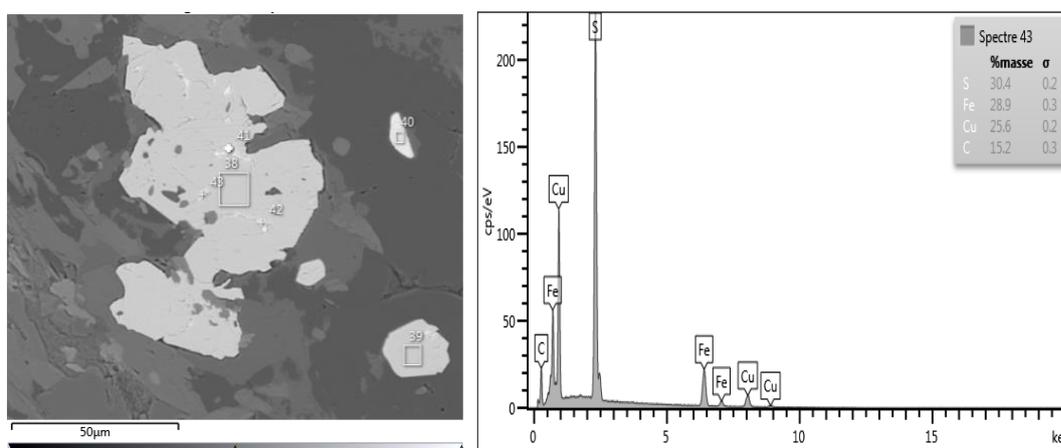


Figure 16 : Image au MEB du basalte avec un exemple de spectre EDS correspondant à la chalcopyrite.

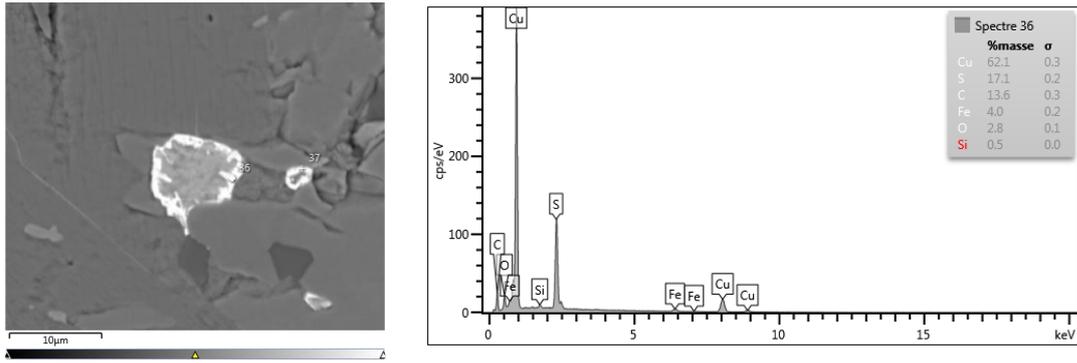


Figure 17 : Image au MEB des schistes de Doumba avec un exemple de spectre EDS correspondant à la chalcocite.

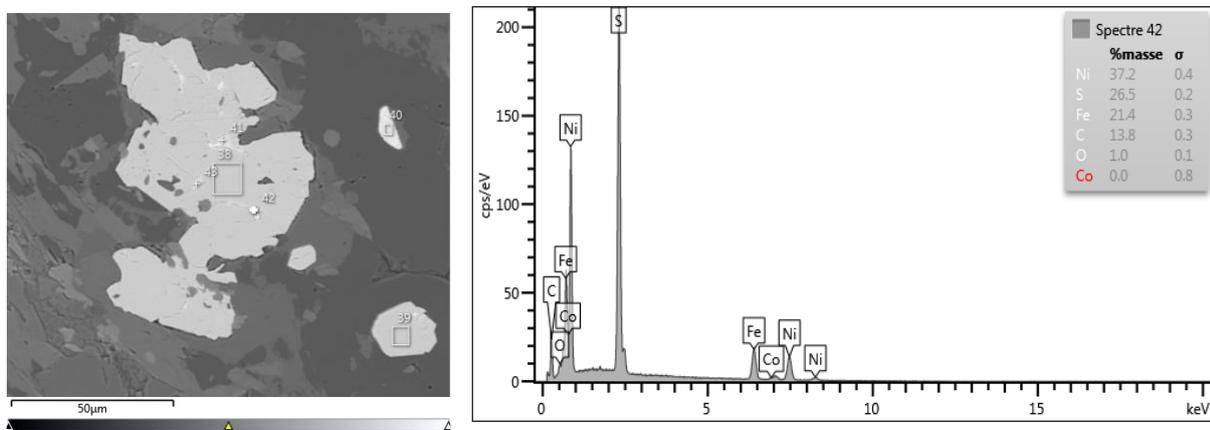


Figure 18 : Image au MEB du basalte avec un exemple de spectre EDS correspondant à la pentlandite.

4.1.1.1.2 Le manganèse

Les observations au MEB ont montré la présence du dioxyde de manganèse dans la veine de diorite quartzique du pluton de Torodi, en accord avec les fortes teneurs en Mn dans ces roches (Figure 19).

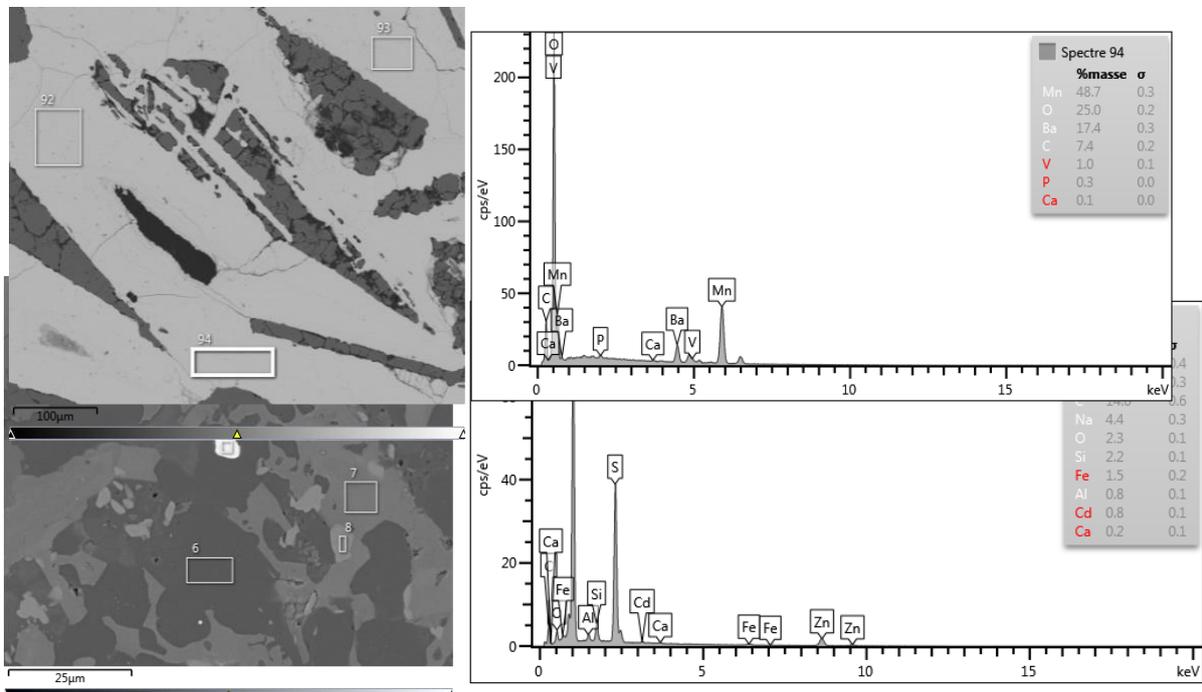


Figure 19 : Images au MEB de la veine de diorite quartzique du pluton de Torodi avec un exemple de spectre EDS correspondant à du dioxyde de manganèse.

Les travaux de Garba *et al.*, (2017), ont mis en évidence une minéralisation de type primaire de manganèse (exhalativo-sédimentaire) au Nord Téra qui est concomitante de la mise en place de pélites gréseuses enrichies en Mn. Ces dernières se situent au contact entre les roches de la ceinture de roches vertes de Diagourou-Darbani et le pluton de Téra-Ayérou. Plusieurs gisements de manganèse ont été mis en évidence dans le Craton Ouest Africain notamment au Mali, au Burkina Faso, au Ghana et en Côte d’ivoire avec des occurrences dans les ceintures volcano-sédimentaires (Hein et Tshibubudze, 2015).

4.1.1.1.3 Le baryum

Le baryum a été mis en évidence au MEB, sous forme de carbonate ($BaCO_3$) dans la veine de diorite quartzique du pluton de Torodi (Figure 19). Il est également présent sous forme de barytine ($BaSO_4$) dans l’échantillon de basalte (Figure 20), malgré la faible teneur en Ba total ($84 \mu g/g$) dans cette roche (Tableau 6).

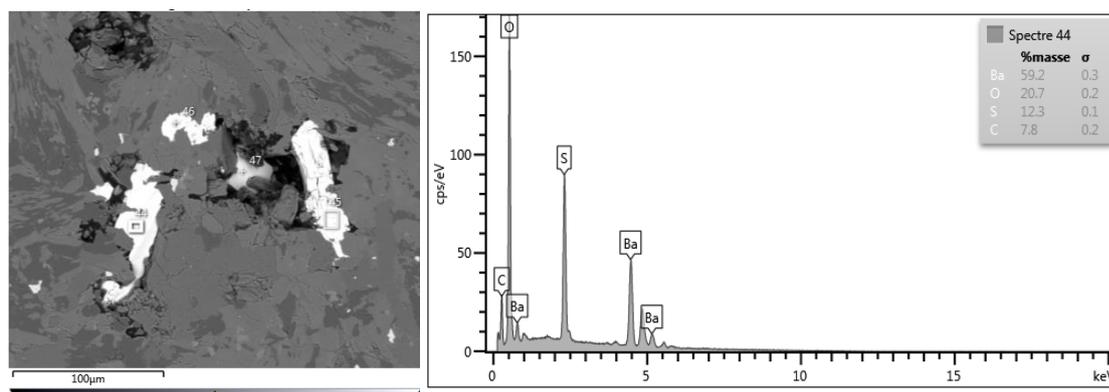


Figure 20 : Images au MEB du basalte avec un exemple de spectre EDS correspondant à de la barytine.

4.1.1.2 Composition chimique des roches

Afin d’identifier l’origine des éléments traces dans les eaux, différents types de roches (basalte, granite, diorite, schiste, veine de quartz, quartzite et gneiss) collectées à proximité des sites d’orpaillage (points 3, 9, 12, 15, 23 et 32) ont été analysés par ICP-MS à HydroSciences Montpellier en vue de quantifier les concentrations totales en éléments majeurs et traces (Tableau 6).

Tableau 6 : Concentration en éléments majeurs et traces dans les échantillons de roches des zones d’orpaillage.

| Type de roche | Concentration en éléments majeurs et traces ($\mu g/g$) | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-----|----|----|-----|-----|-----|--|
| | Na | Mg | K | Ca | Si | Ti | Al | Fe | Mn | Ba | Co | Ni | B | As | |
| Basalte | 20341 | 48157 | 1233 | 90523 | 1087 | 4150 | 83521 | 68729 | 833 | 83 | 67 | 100 | 8,7 | 0,4 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|--------|-----------|--------|-------|------|--------|-------|-------|-------|-----|------|----------|-----|
| Granite | 56261 | 17111 | 3124 6 | 57937 | 14436 | 4610 | 124166 | 53442 | 928 | 1232 | 121 | 38 | 4,6 | 1,1 |
| Schiste | 65 | 115067 | 78 | 495 | 1925 | 1016 | 47224 | 72602 | 758 | 15 | 120 | 1523 | 1,0 | 8,3 |
| Quartzite | 83 | 1141 | 67 | 338 | <LD | 16 | 552 | 710 | 12 | 3 | 195 | 12 | 2,4 | 0,4 |
| Basalte | 11617 | 43368 | 576 | 86998 | 813 | 3766 | 74655 | 74690 | 1449 | 84 | 86 | 113 | 5,4 | 1,0 |
| Diorite | 19154 | 43975 | 1142 9 | 68535 | 941 | 4139 | 92438 | 64853 | 1145 | 441 | 71 | 81 | 11, 2 | 2,6 |
| Diorite quartzique | 268 | 244 | 431 | 994 | 4256 | 213 | 6466 | 4469 | 84768 | 26898 | 740 | 100 | 1,1 | 2,2 |
| Gneiss | 2504 | 54125 | 1280 | 100065 | 1168 | 1851 | 16567 | 37193 | 1268 | 75 | 72 | 613 | 1,7 | 1,5 |

Parmi les éléments présentant un intérêt dans cette étude, le manganèse et le baryum sont des éléments majoritaires dans l'échantillon de la veine de diorite quartzique du pluton de Torodi. Ces deux éléments présentent, respectivement des concentrations de 84 768 µg/g et 26 868 µg/g (Tableau 6). Tous les échantillons contiennent des traces de cobalt et de nickel, de 67 à 740 µg/g pour le cobalt, de 12 à 1 523 µg/g pour le nickel. L'arsenic est présent à de faibles concentrations dans les roches sauf au niveau des schistes où la concentration atteint 8,3 µg/g (Tableau 6). Ces concentrations en Co, Ni, As, B dépassent légèrement les valeurs moyennes rencontrées dans ces types de roche, notamment pour les schistes et la veine de quartz (Hans, 1995 ; Rudnick & Gao, 2003 ; Rauch & Pacyna, 2009).

4.1.2 Concentration en éléments traces dans les eaux souterraines

4.1.2.1 Statistiques descriptives des résultats

Les données issues des analyses par ICP-MS ont permis de déterminer les valeurs extrêmes (minima et maxima), la moyenne, l'écart type et la médiane des concentrations en éléments traces métalliques. Les éléments traces présentés dans le tableau 7 sont ceux qui peuvent présenter un risque sanitaire à des concentrations élevées. Pour l'arsenic, les concentrations en arsénite et arséniate sont précisées du fait de la différence de toxicité de ces deux substances.

Résultat des eaux souterraines

Tableau 7 : Résultat des analyses statistiques des concentrations en éléments traces métalliques.

| Eléments | Moyenne | Ecart type | Min | Max | Médiane | CMA NN | WHO guidelines | CMA NF | CMA NC |
|------------------------|---------|------------|------|--------|---------|-----------|----------------|-----------|-----------|
| Al (µg/L) | 12,39 | 19,89 | 0,26 | 86,09 | 4,03 | | 200 | 200 | |
| As (µg/L) | 10,29 | 41,71 | <DL* | 202,72 | 0,18 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| As (III) (µg/L) | 1,41 | 1,39 | <DL* | 4,51 | 0,73 | | | | |

| | | | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|---------|-------|------|------|----------------|------|
| As (V) (µg/L) | 22,18 | 58,17 | <DL* | 176,70 | 0,39 | | | | |
| B (µg/L) | 81,52 | 261,92 | 1,98 | 1376,97 | 14,02 | | 2400 | 1000 | 5000 |
| Ba (µg/L) | 146,52 | 224,70 | 2,98 | 1344,26 | 72,88 | 100 | 1300 | 700 | 2000 |
| Cd (µg/L) | 0,04 | 0,16 | 0,0003 | 0,14 | 0,01 | 5 | 3 | 5 | 7 |
| Co (µg/L) | 1,37 | 3,37 | 0,006 | 17,99 | 0,09 | | | | |
| Cr (µg/L) | 0,52 | 1,59 | 0,007 | 8,82 | 0,10 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Cu (µg/L) | 5,32 | 22,79 | 0,10 | 150,37 | 0,76 | 1000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Mn (µg/L) | 106,30 | 237,39 | 0,09 | 956,06 | 2,26 | 100 | 400 | 50 | 120 |
| Ni (µg/L) | 2,16 | 4,29 | 0,05 | 24,18 | 0,42 | | 70 | 20 | |
| Pb (µg/L) | 0,20 | 0,52 | 0,005 | 3,16 | 0,03 | 50 | 10 | 10 | 5 |
| Sb (µg/L) | 0,06 | 0,16 | 0,004 | 1,05 | 0,02 | | 5 | 5 | 6 |
| Zn (µg/L) | 15,05 | 21,07 | 0,56 | 94,66 | 6,38 | 5000 | 3000 | Non précisé | |

DL = Detection Limit ($As_T = 0,006 \mu\text{g/L}$, $As_{(V)} = 0,02 \mu\text{g/L}$, $As_{(III)} = 0,02 \mu\text{g/L}$);

NN : Norme de potabilité de l'eau de boisson au Niger par Arrêté 141/MSP/DS du 27 septembre 2004 ;

WHO : World Health Organisation guideline 4th edition ;

CMA : Concentrations maximales acceptables NF : Norme Française ; NC : Norme Canadienne.

Certains éléments comme l'As, le Mn, le Co, le B, le Ba et le Ni présentent des concentrations supérieures aux normes (nigérienne, OMS et/ou française) des eaux de boisson. Leur répartition dépend de l'environnement géologique (socle cristallin ou terrain sédimentaire), du réseau hydrographique et des activités anthropiques (orpaillage ou activités agricoles).

4.1.2.2 Concentration en éléments traces

Les eaux souterraines de la zone d'étude sont les principales sources d'approvisionnement en eau potable de la population. Elles doivent présenter des concentrations en arsenic et en certains métaux traces inférieures aux valeurs guides. Dans les échantillons des eaux souterraines que nous avons analysés, les éléments présents avec des concentrations supérieures aux normes des eaux de boisson sont constitués de : As, Mn, Co, B, Ba et Ni. Les normes OMS et nigériennes ont été utilisées en priorité pour évaluer la qualité des eaux de consommation et les concentrations qui ne sont pas couvertes par la norme nigérienne ont fait l'objet de comparaisons avec la norme française.

Le tableau 8 ci-dessous présente les valeurs guides et les limites de qualité de certains éléments traces recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (Directives de qualité pour l'eau de boisson, quatrième édition) et l'Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et aux références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

Tableau 8 : Valeurs guides et limites de qualité de certains éléments traces recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé.

| Eléments | Norme nigérienne (µg/Lmg/L) | Norme OMS (µg/L) | Norme française (µg/L) |
|----------|-----------------------------|------------------|---|
| pH | 6,5 < PH < 8,5 | 6,5 < PH < 9,5 | |
| CE | <=400 | <=400 | 180 ≤ ≤ 1000 µS/cm à 20°C ou 200 ≤ ≤ 1100 µS/cm à 25°C |
| As | 10 | 10 | 10 |
| Cd | 5 | 5 | 5 |
| Sb | 1 | 5 | 5 |
| Mn | 100 | 400 | 50 |
| Pb | 10 | <= 10 | 10 |
| Al | | 200 | 200 |
| Fe | 300 | 300 | 300 |
| Zn | 5000 | 3000 | Non précisé |
| Cu | 1000 | <= 2000 | 2000 |
| Ni | | 70 | 20 |
| Ba | 100 | 1300 | 700 |

4.1.2.2.1 Arsenic

Les concentrations en arsenic de ces eaux sont comprises entre 0,018 µg/L et 202,72 µg/L avec une moyenne de 10,29 µg/L et une médiane de 0,15 µg/L (Figure 21). Les normes OMS et française des eaux destinées à la consommation humaine en arsenic sont fixées à 10 µg/L (OMS, 2017 ; INERIS, 2018). Sur les quarante-trois échantillons des eaux souterraines prélevées, quatre présentent des teneurs dépassant les limites des normes nigérienne, OMS et françaises avec des concentrations de 202,72 µg/L et 189,74 µg/L respectivement pour les sites d'orpaillage de Mbanga (point 1, Figure 7) et Boulounjounga (point 17, Figure 7), et 15,76 µg/L et 15,52 µg/L pour les villages de Tchetchirey (point 28, Figure 1) et Arotondo (point 42, Figure 7) situés à proximité du site d'orpaillage de Komabangou (point 17, Figure 7). Les travaux de Tankari *et al.* (2014) ont révélé des teneurs en As de 20 et 2 429 µg/L respectivement dans les eaux de traitement gravimétrique et par cyanuration et de 19 µg/L dans les eaux souterraines sur le même site. L'espèce oxydée As (V) est toujours prédominante, traduisant des conditions oxydantes au sein de ces aquifères. Ces concentrations élevées en As correspondent à des eaux souterraines au niveau des anciens sites d'orpaillage toujours en exploitation. Cette eau extraite comme exhaure

des puits d'orpaillage est utilisée pour l'alimentation en eau des orpailleurs des sites et des populations environnantes. Les deux concentrations les plus élevées se situent à proximité de la rivière Sirba sur les sites d'orpaillage de Boulounjounga et de Mbanga. Sur cette rivière, certains orpailleurs extraient l'or à la batée. Le site de Boulounjounga se trouve à la limite des frontières du Niger et du Burkina. Nos résultats montrent que plusieurs sites d'orpaillage dans la région peuvent être une source de contamination par l'arsenic des puits/forages et aussi des villages situés à proximité de ces sites. Les figures 21 et 22, ci-dessous montrent la localisation des sites et la répartition des concentrations en arsenic.

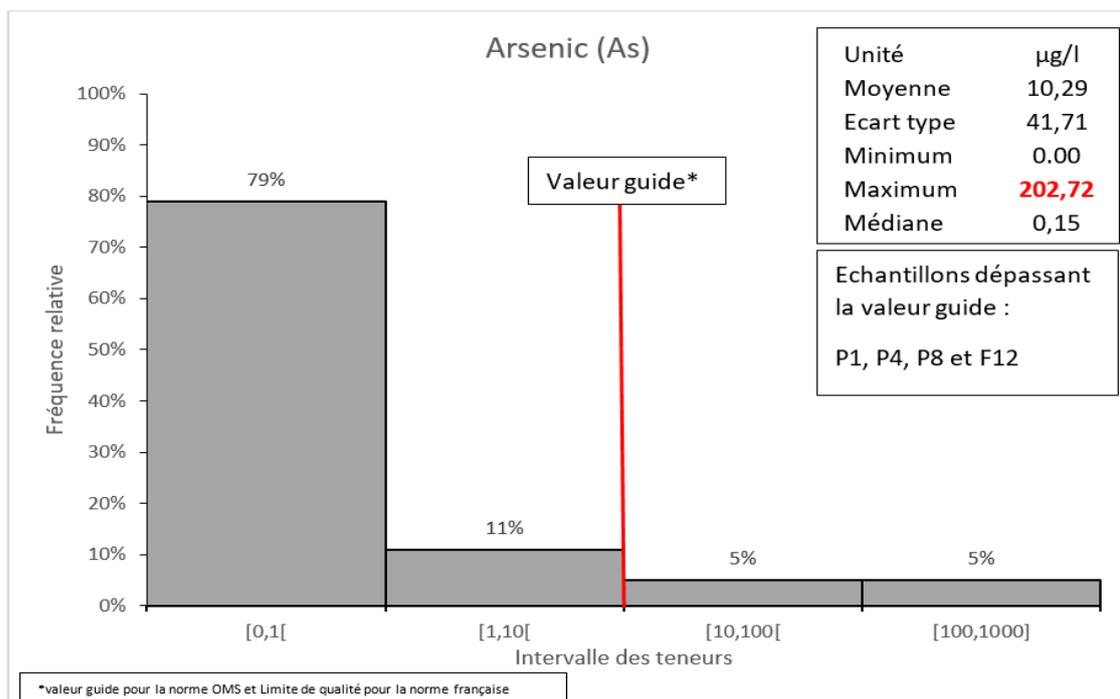


Figure 21 : Variation des concentrations en arsenic dans la zone d'étude.

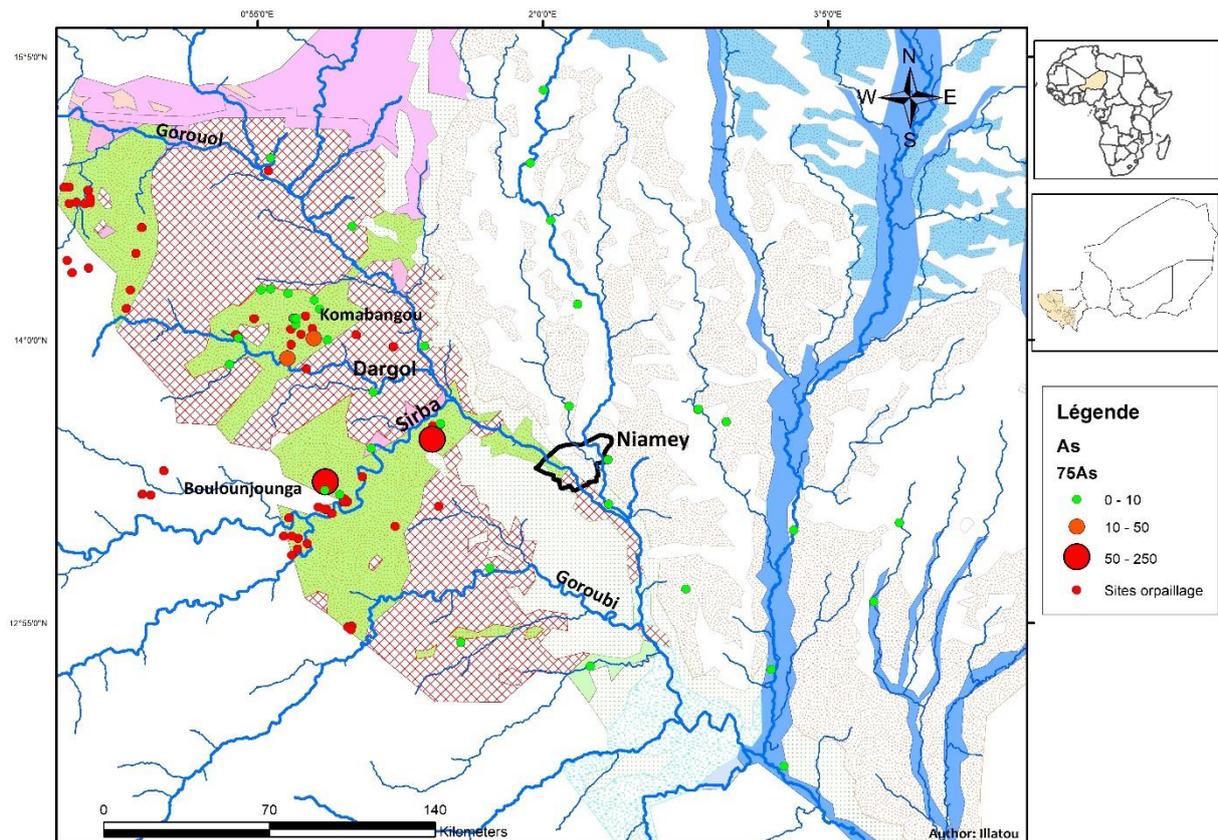


Figure 22 : Carte de distribution des concentrations en arsenic.

Spéciation de l'arsenic

L'arsenic est un élément toxique avec une spéciation complexe. Il peut être sous forme inorganique avec des composés purement minéraux, ou organique avec des composés organométalloïdiques (Proust et Picot 2019). Sa toxicité dépend de la forme dans laquelle il se trouve. Les composés de l'arsenic les plus toxiques se présentent sous forme inorganique, sous trois valences, l'arsine AsH_3 (-III), trioxyde d'arsenic (+III) et l'arséniate (+V). Le résultat de la spéciation des échantillons indique une prédominance de l'arséniate (As V).

4.1.2.2 Manganèse

Les teneurs en manganèse varient de 0,089 µg/L pour le village de Boura (point 33) à 956,06 µg/L pour le site d'orpillage de Boulounjounga (point 17, Figure 7) avec une moyenne de 106,3 µg/L et une médiane de 2,26 µg/L (Figure 23). Neuf points de prélèvement, soit 21% des échantillons présentent des concentrations supérieures à la limite de qualité de la norme française (50 µg/L). Sept (07) échantillons dépassent la valeur limite de la norme de potabilité de l'eau de boisson du Niger (100 µg/L) et cinq (05) dépassent la norme OMS, (2011) (400 µg/L). Il a été considéré

comme non préoccupant pour la santé selon la directive OMS, (2017), bien que plusieurs études aient montré qu'il pourrait avoir des effets sur le développement neurologique des enfants exposés à des concentrations supérieures à 0,05 mg/L (Directive OMS, 2017). Santé Canada (2019) recommande une concentration maximale acceptable (CMA) de manganèse dans l'eau à 120 µg/L.

En dehors du site d'orpaillage de Bolounjounga (956 µg/L) situé sur la rive droite, toutes les concentrations élevées en Mn se situent dans le Continental terminal 3 (Ct³) sur la rive gauche (Figure 7). Les travaux de Mahaman *et al.* (2018) ont mis en évidence une concentration en manganèse total de 140 µg/L dans les eaux de l'aquifère du Ct³ au niveau du village de Tillakaina dans la région de Tillabéry (point 24, Figure 7). Les travaux de Tankari *et al.* (2014) sur le site de Komabangou ont relevé une teneur moyenne en manganèse de 108.43 mg/L dans les eaux de traitement de l'or par cyanuration et une teneur maximale de 1,60 mg/L dans les eaux de traitement gravimétrique, supérieures à la concentration maximale recommandée pour les eaux d'irrigation qui est de 0.20 mg/L (Pescod, 1992). La figure 24 ci-dessous montre la localisation des sites et la répartition des concentrations en manganèse.

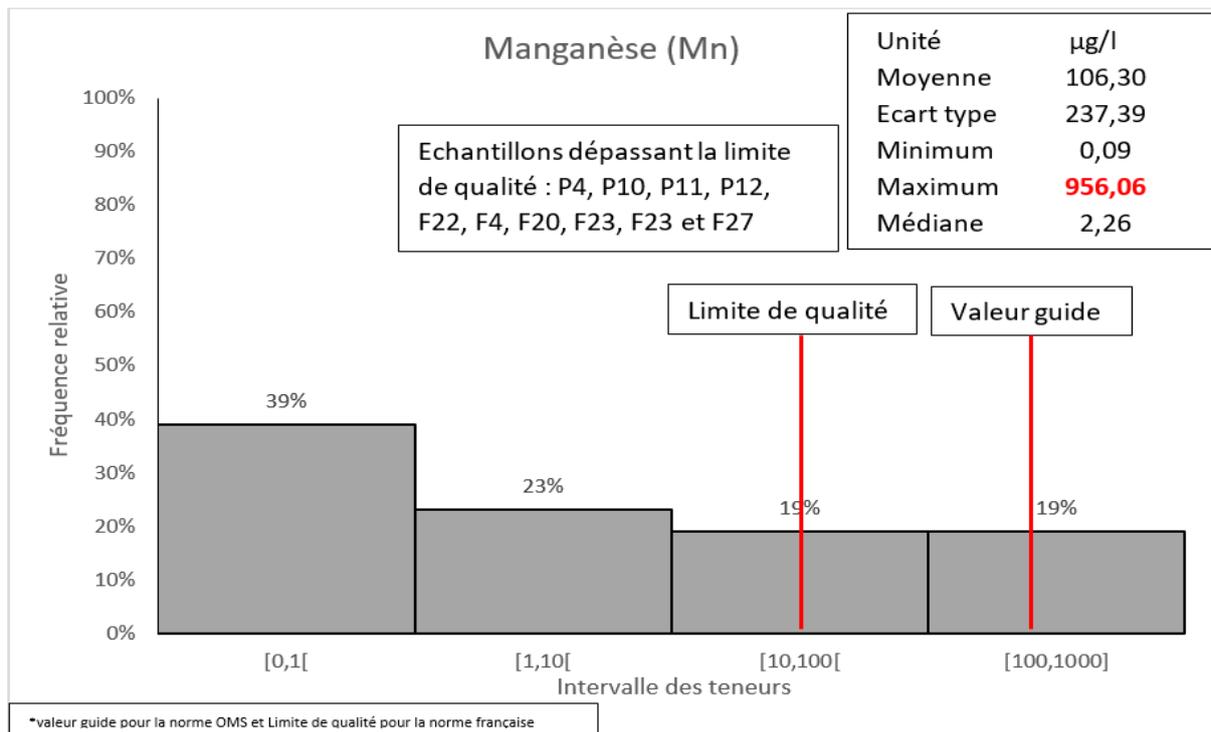


Figure 23 : Variation des concentrations en manganèse dans la zone d'étude.

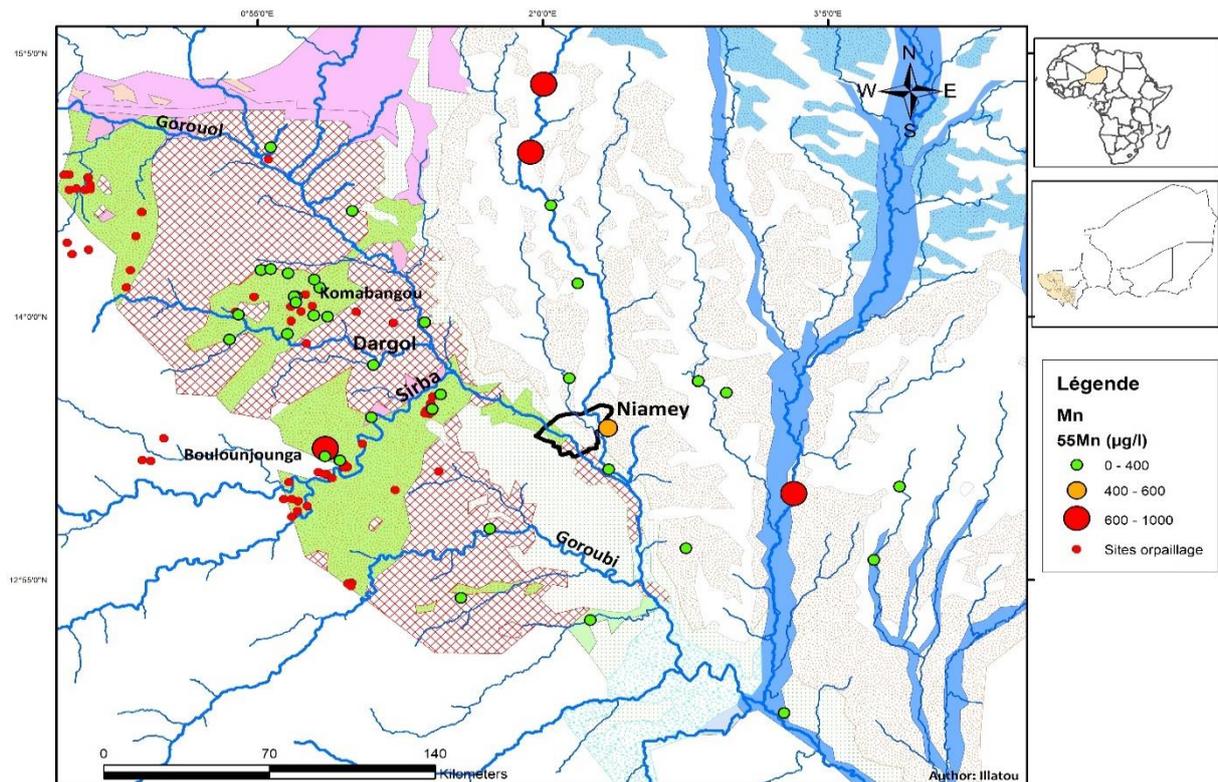


Figure 24 : Carte de distribution des concentrations en manganèse.

4.1.2.2.3 Cobalt

Le cobalt présente 37 radio-isotopes de masse 47 à 75, dont un seul isotope stable ^{59}Co (IRSN, Cobalt et environnement). Le cobalt stable est présent dans l'écorce terrestre à une concentration variant entre 2 et 25 $\mu\text{g/g}$, respectivement pour les roches carbonatées et les roches ignées (Coughtrey et Thorne, 1983). Il n'existe pas de valeur guide OMS pour le cobalt. La concentration moyenne en Co dans les eaux douces est de 1 $\mu\text{g/L}$ (ATSDR, 2004). Il présente certains bienfaits pour l'homme à faibles doses (composant de la vitamine B12) mais est très nocif à des concentrations plus importantes ((INERIS, 2018 ; ATSDR, 2004).

Dans la zone d'étude, les concentrations en cobalt dans les eaux souterraines varient de 0,06 $\mu\text{g/l}$ pour le site de Doukou Makani à 17,99 $\mu\text{g/l}$ pour le site de Beylandé avec une moyenne de 1,37 $\mu\text{g/l}$ et une médiane de 0,09 $\mu\text{g/l}$ (Figure 25).

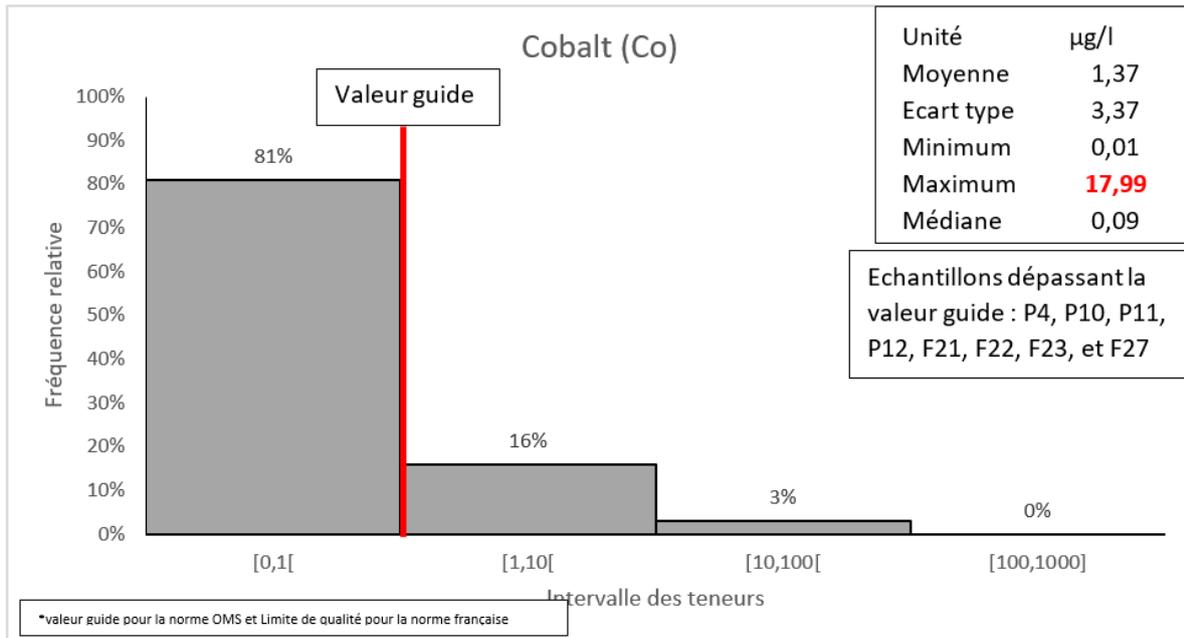


Figure 25 : Concentrations en cobalt dans les eaux souterraines.

Au total, huit échantillons d’eaux souterraines sur les quarante-trois présentent des teneurs dépassant la norme de 1 µg/l. La majorité de ces teneurs est située au niveau des affluents de la rive gauche. La figure 26, ci-dessous montre la localisation de ces sites.

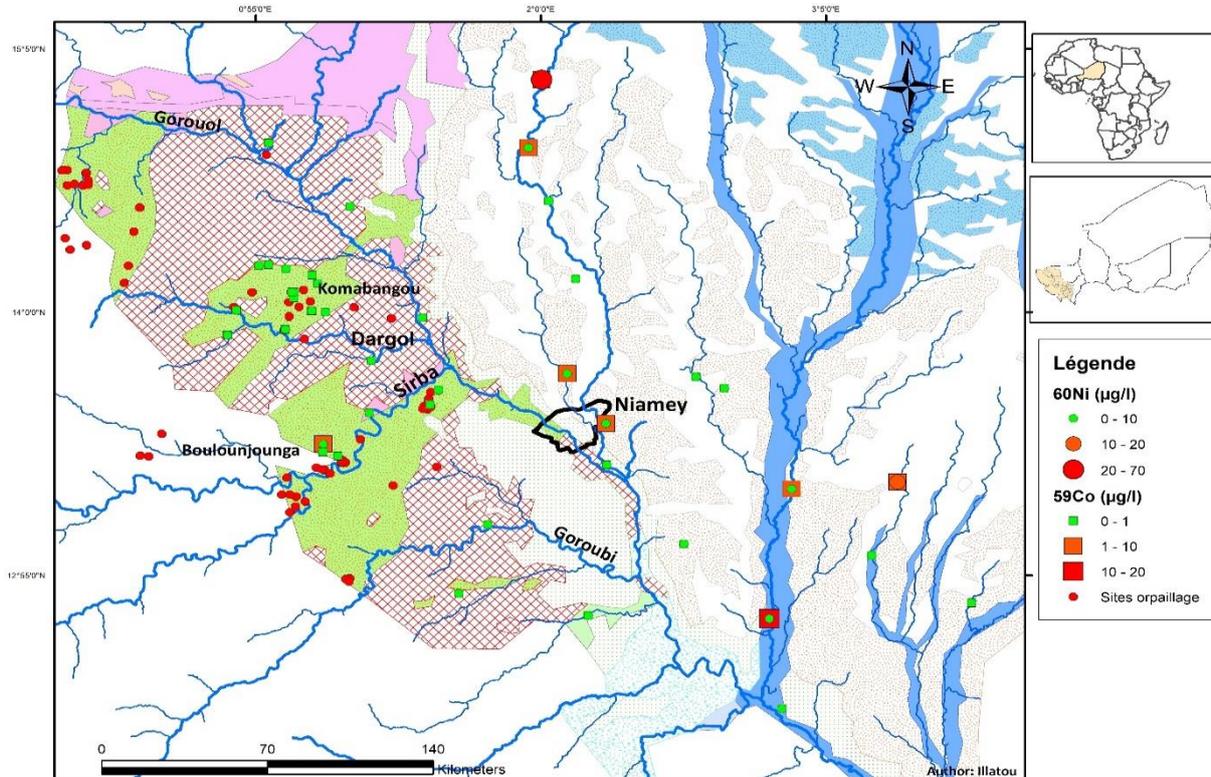


Figure 26 : Carte de distribution et des concentrations en cobalt.

4.1.2.2.4 Nickel

La concentration en nickel dans l'eau de boisson est normalement inférieure à 0,02 mg/L, mais la valeur guide fixée selon la norme OMS est de 70 µg/L (Directive OMS, 2017) et la norme française fixe une limite de qualité de 20 µg/L. Sur les quarante-trois points d'eau analysés, un seul présente des teneurs dépassant la limite de la norme française (20 µg/L). Les concentrations varient de 0,045 µg/L pour le forage artésien de Kollo Bossey à 24,18 µg/L pour le puits de Sassaga. Les points d'eau qui présentent des concentrations proches de la valeur guide sont situés sur la rive gauche au niveau des affluents du fleuve. La moyenne des concentrations est de 2,16 µg/l pour une médiane de 0,42 µg/l (Figure 27).

La nourriture est la principale source d'exposition au nickel pour les non-fumeurs et pour les personnes non exposées dans le cadre professionnel (Directive OMS, 2017). Le CIRC a conclu que les composés de nickel inhalés sont cancérogènes pour l'homme (Groupe 1) et que le nickel métallique peut être cancérogène (Groupe 2) (Directive OMS, 2017).

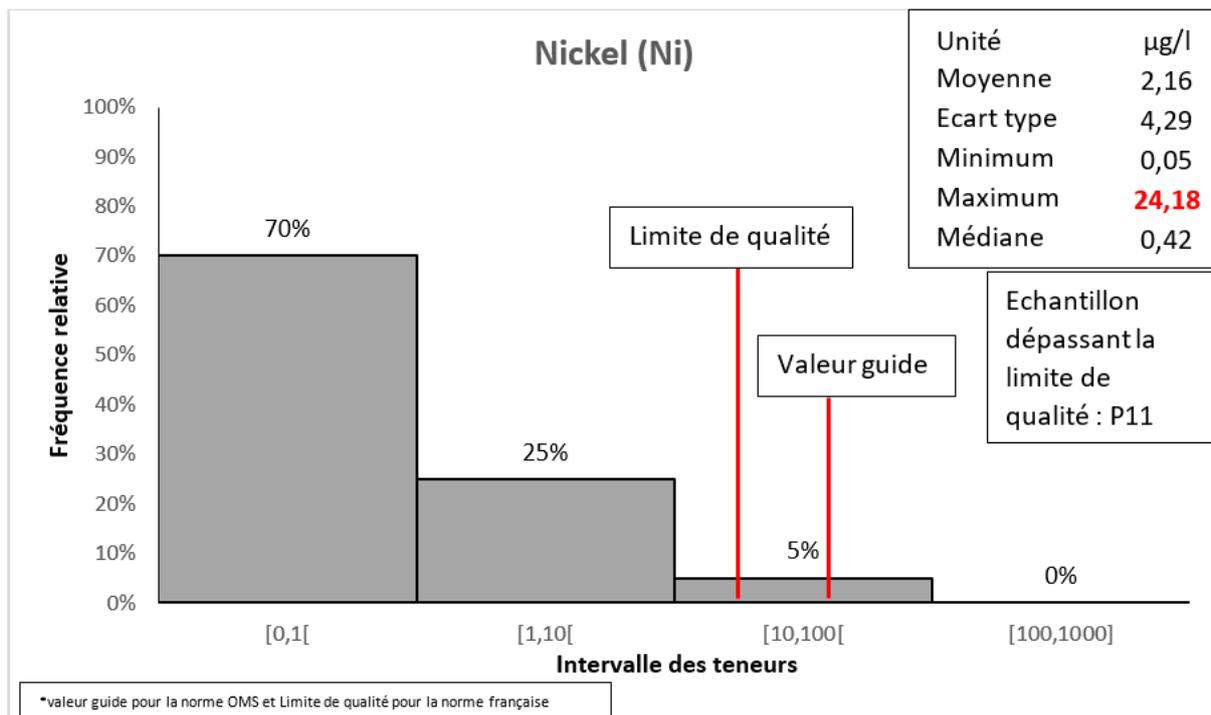


Figure 27 : Concentration en nickel dans les eaux souterraines.

4.1.2.2.5 Baryum

Les teneurs en Ba varient de 2.98 µg/L pour le site d'orpillage de Seffa Moussa (point 12, Figure 7) à 1 344,26 µg/L pour le village de Kokoro (point 32, Figure 7) avec une moyenne de 146.52 µg/L et une médiane de 72.88 µg/L. Les plus grandes concentrations en Ba de la zone d'étude se trouvent dans les environs du village de Kokoro (Figures 28 et 29). Au total, dix-huit points de

prélèvement, soit 42% des échantillons présentent des concentrations supérieures à la limite maximale de 100 µg/L définie dans la norme de potabilité de l'eau de boisson au Niger. La concentration du forage de Kokoro dépasse la limite de la norme OMS 2017 (1 300 µg/L). Il coorespond au double de la norme française (700 µg/L). Il a été démontré que la consommation d'une eau ayant des concentrations élevées en baryum peut provoquer une néphropathie (Directive OMS, 2017). Il augmente l'excitabilité et la conductivité cardiaque (Maxime *et al.* 2005).

La présence de Ba dans l'eau est principalement d'origine naturelle et se trouve disséminée dans les roches magmatiques du socle sous forme de sulfate (Afssa, 2015).

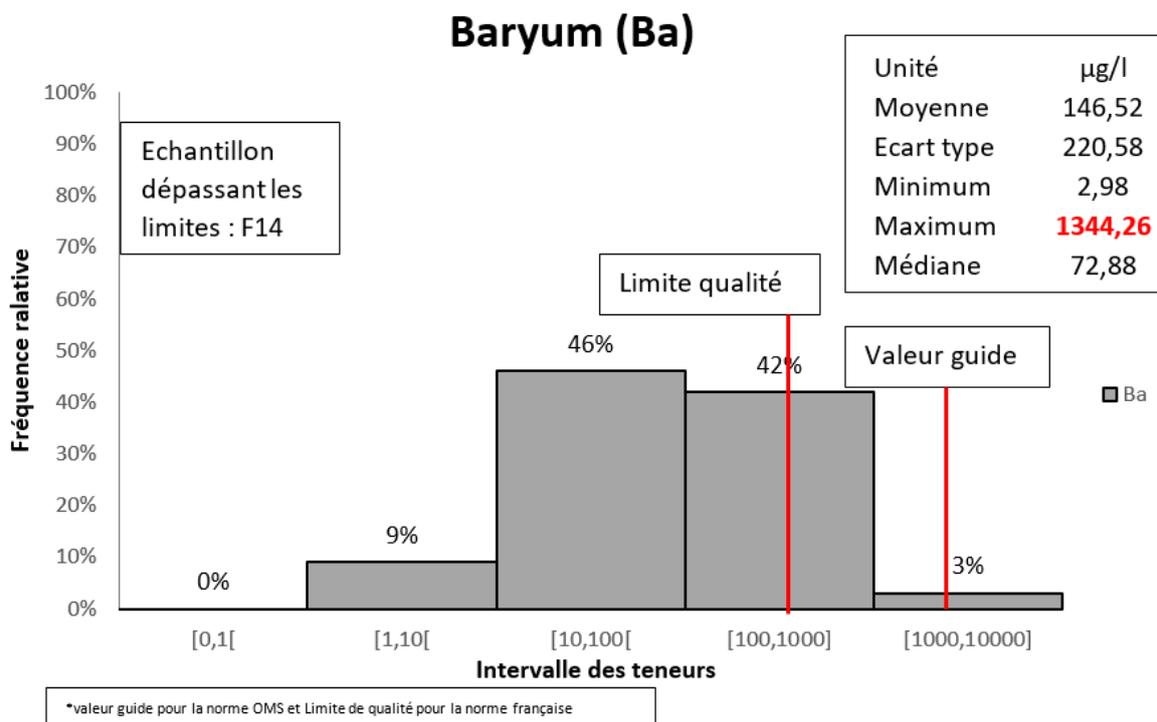


Figure 28 : Variation des concentrations en Baryum.

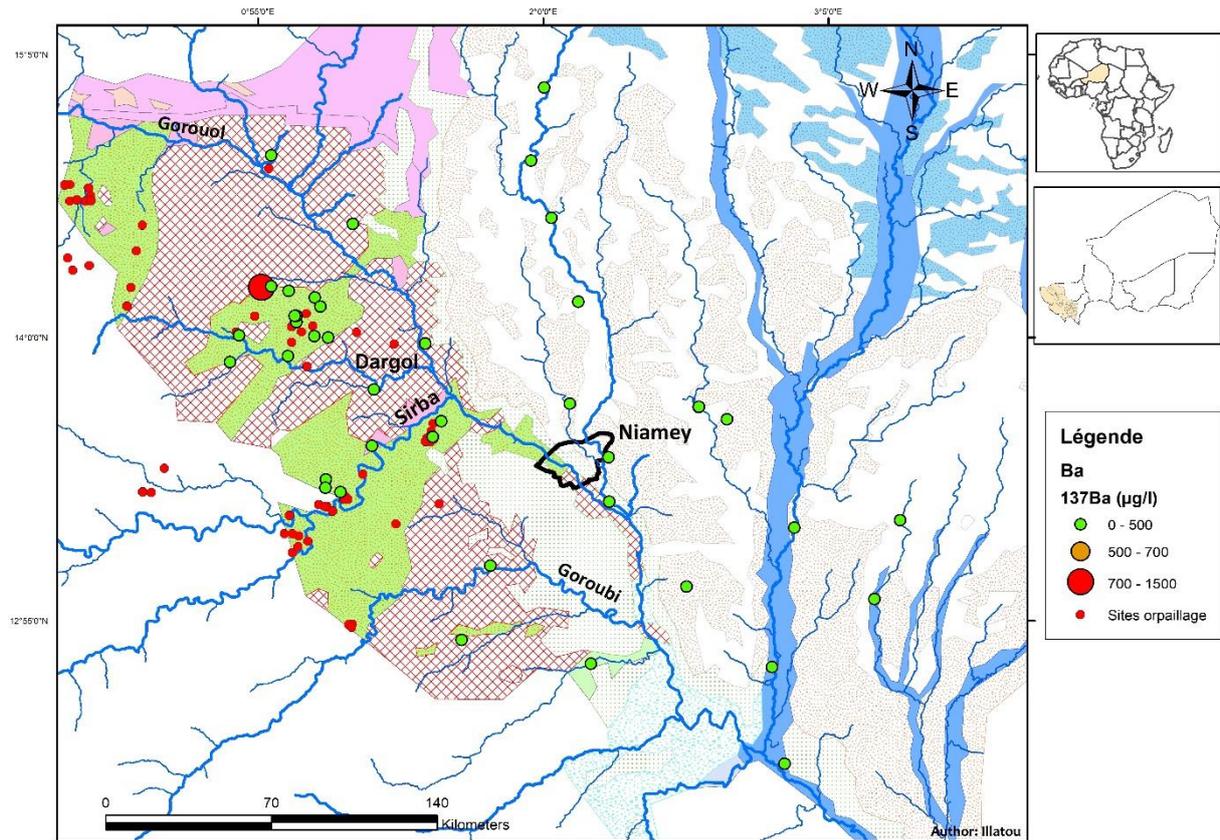


Figure 29 : Carte de distribution des concentrations en Baryum.

4.1.2.2.6 Bore

Dans la zone d'étude, les teneurs en B varient de 1.98 µg/L pour le puits de Kollo Bossey (point 6, Figure 7) à 1 376,97 µg/L pour le forage du même village (point 7, Figure 7) avec une moyenne de 81.39 µg/L et une médiane de 14.02 µg/L (Figure 30). La deuxième plus grande teneur de 1 092.29 µg/L concerne le forage de la commune de Simiri (point 18, Figure 8) situé à proximité du Kori de Ouallam (Figure 31). Le puits et le forage du village de Kollo Bossey captent deux aquifères différents (du Ct³ et du Ct² respectivement). Ils sont distants de 100 m environ. Ils présentent respectivement la plus petite et la plus grande concentration en bore (Figure 31). La Directive OMS, 2017 indique que la concentration en bore dans l'eau de boisson doit être inférieure à 500 µg/L et la directive européenne sur l'eau potable fixe la norme à 1 000 µg/L. L'origine de cette contamination semble être naturelle, liée à la formation géologique du Ct² puisqu'il n'existe pas d'activités anthropiques dans la zone susceptible de libérer du bore dans le Ct².

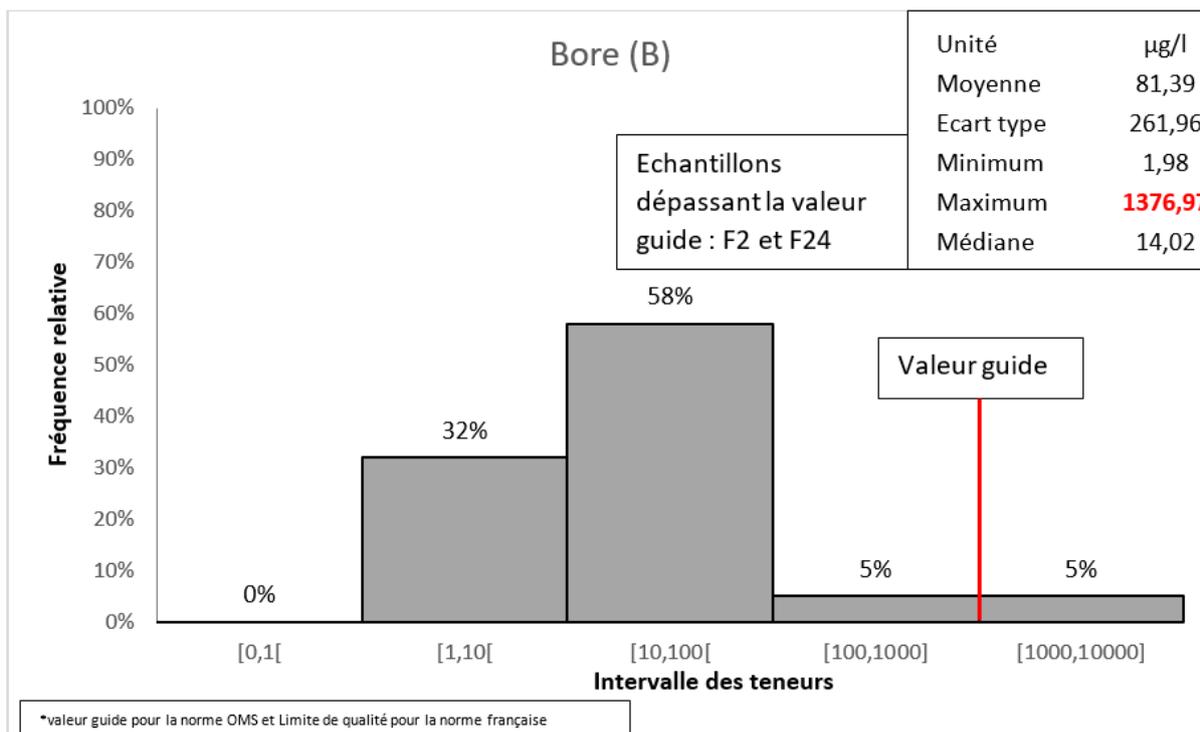


Figure 30 : Variation des concentrations en bore.

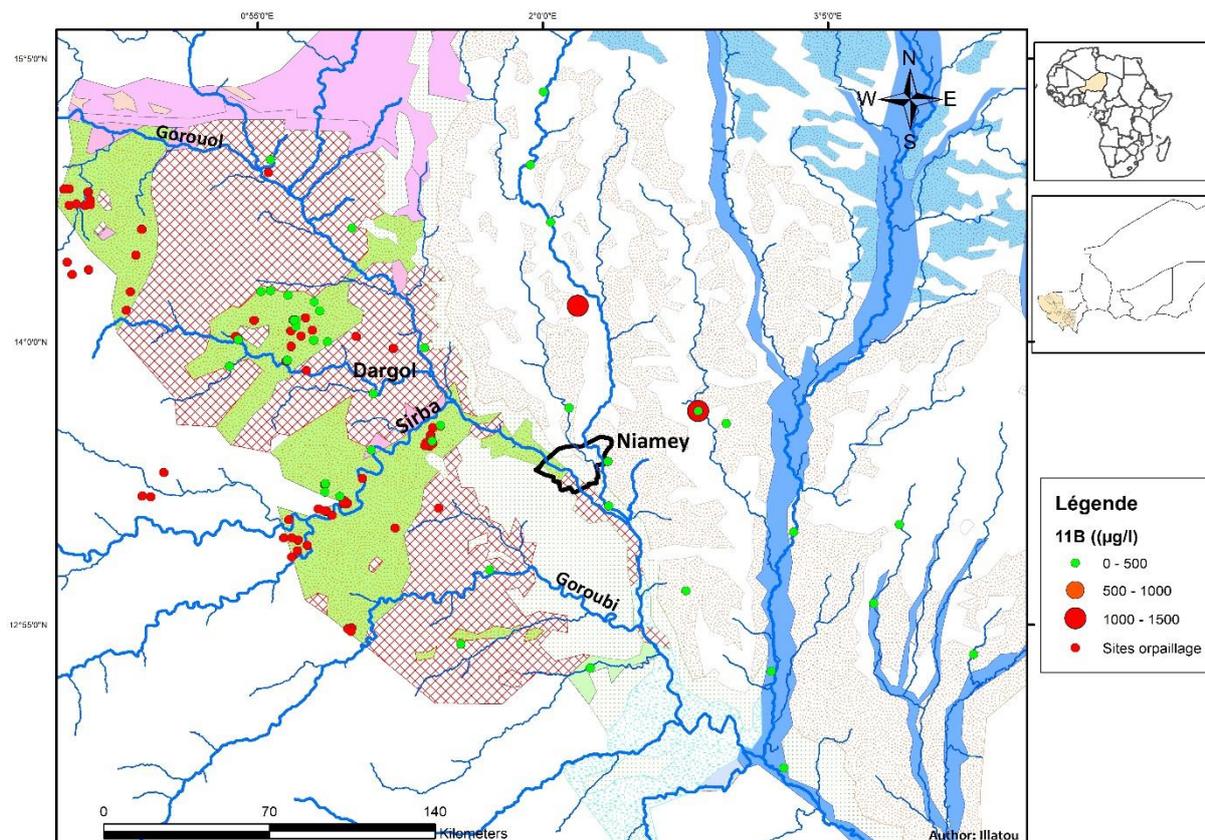


Figure 31 : Carte de distribution des concentrations en Bore.

4.1.3 Concentration en éléments majeurs dans les eaux souterraines

4.1.3.1 Statistique descriptives des résultats

Le résultat des statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques principaux (pH, conductivité) et des concentrations en anions et en cations majeurs a permis de déterminer les valeurs extrêmes (minima et maxima), moyennes, écarts-type et médiane (Tableau 9).

Tableau 9 : Résultat des analyses statistiques des paramètres physico-chimiques principaux (pH, conductivité) et des concentrations (en mg/L) en éléments majeurs et en éléments traces métalliques.

| Eléments | Min | Max | Moyenne | Ecart type | Médiane | CMA NN | WHO guidelines |
|-------------------------------|------|------|---------|------------|---------|----------------|----------------|
| pH | 5.23 | 8.68 | 6.42 | 0.71 | 6.42 | 6,5 < pH < 9,5 | 6,5 < pH < 9,5 |
| CE (µs/cm) | 23 | 1605 | 569 | 389 | 522 | | <= 400 |
| Br ⁻ | 0,01 | 0,62 | 0,05 | 0,12 | 0,01 | | Pas de norme |
| Ca ²⁺ | 1,74 | 104 | 41 | 29 | 44 | 75 | 100 |
| Cl ⁻ | 0,75 | 252 | 22 | 44 | 7,01 | 250 | 250 |
| F ⁻ | 0,01 | 1,77 | 0,3 | 0,4 | 0,14 | 1.5 | 1.5 |
| HCO ₃ ⁻ | 1,95 | 524 | 207 | 167 | 191 | | Pas de norme |
| K ⁺ | 0,26 | 71 | 5 | 11 | 3 | | 12 |
| Mg ²⁺ | 0,31 | 84 | 18 | 17 | 16 | 50 | 50 |
| Na ⁺ | 0,68 | 209 | 47 | 54 | 24 | | 150 |
| NO ₃ ⁻ | 0,01 | 321 | 41 | 63 | 16 | 45 | 50,0 |
| NO ₂ ⁻ | 0,18 | 0,31 | 0,24 | 0,06 | 0,24 | | 3,00 |
| SO ₄ ²⁻ | 0,47 | 254 | 39 | 64 | 13 | 200 | 250 |

CMA NN: Concentrations maximales acceptables dans l'eau de boisson au Niger par Arrêté 141/MSP/DS du 27 septembre 2004 ;

WHO : World Health Organisation guideline 4th edition.

4.1.3.2 Concentration en éléments majeurs

Selon la norme OMS, certains éléments majeurs ont des concentrations qui dépassent les valeurs guides des eaux de boisson (tableau 9). Ces éléments sont constitués du nitrate, du fluor et du bromure.

4.1.3.2.1 Conductivité

La conductivité électrique de l'eau est l'expression de sa minéralisation. Elle dépend du temps de transit et des roches mises en contact avec l'eau mais aussi des éventuels impacts anthropiques.

Les échantillons de la zone d'étude ont des valeurs comprises entre 23,31 et 1 605 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Les grandes valeurs de conductivité sont enregistrées dans différents types d'aquifères dont les forages captant le Ct³ à faible profondeur et dans la zone des affluents du fleuve Niger (principalement le Dallol Bosso). Les valeurs sont également élevées dans le forage artésien captant le Ct² et ceux captant les zones fracturées du socle du Liptako et les altérites. Environ la moitié des échantillons présentent des valeurs élevées de la conductivité (Figure 32).

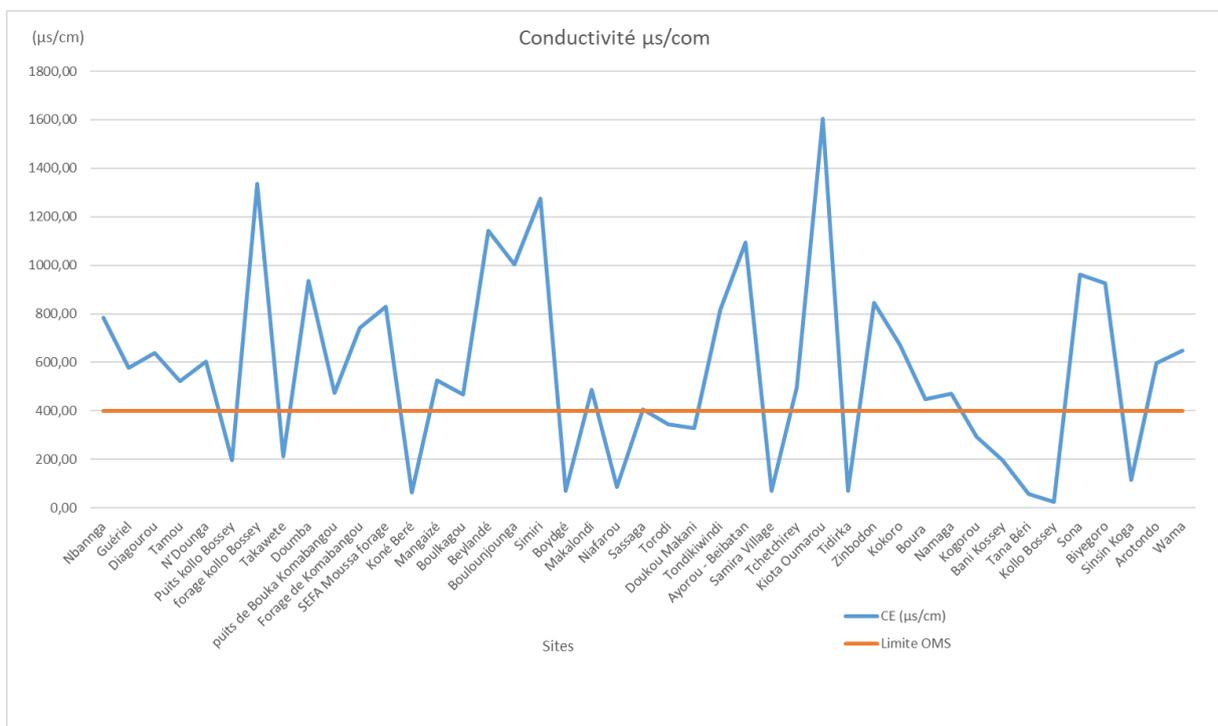


Figure 32 : Variation de la conductivité électrique des eaux souterraines

4.1.3.2.2 pH

Le pH est un important paramètre opérationnel sur la qualité de l'eau. Par contre, aucune valeur guide reposant sur des arguments sanitaires n'a été proposée pour le pH. Il a été jugé non préoccupant pour la santé dans l'eau de boisson (Directive OMS, 2017). La norme OMS, 2011 recommande le pH entre 6.5 et 8.5.

Dans la zone d'étude, les valeurs du pH des eaux souterraines sont comprises entre 5.235 et 8.680. Sur les quarante-trois points d'eau, treize ont des valeurs de pH inférieures à 6 (Figure 33).

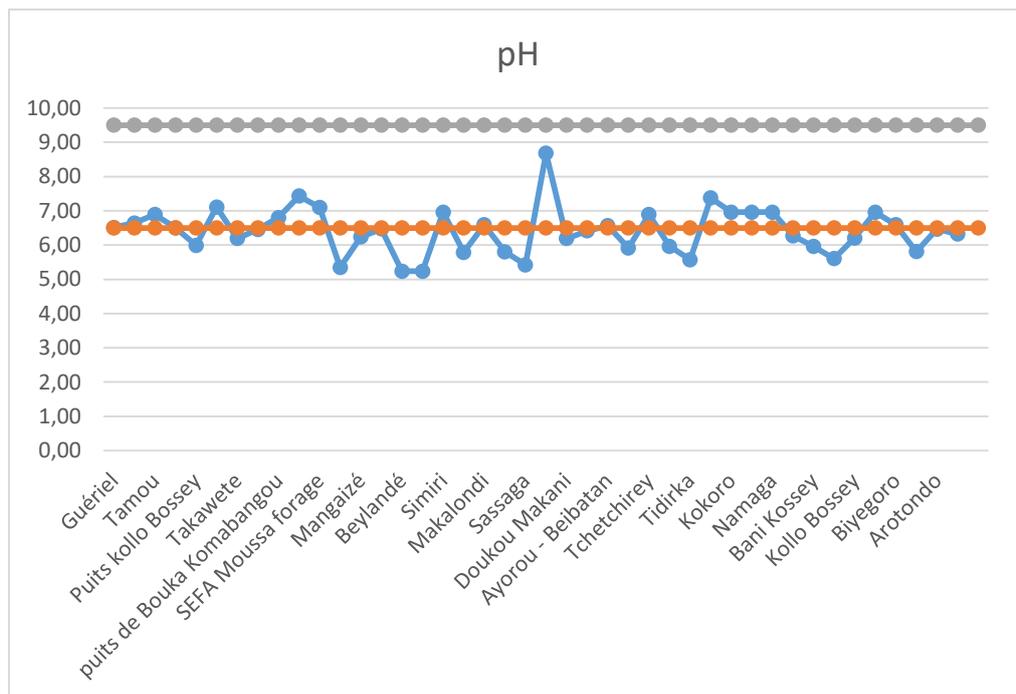


Figure 33 : Variation du pH des eaux souterraines.

4.1.3.2.3 Nitrate

Sur les quarante-trois échantillons d’eaux souterraines prélevés, neuf présentent une concentration en nitrate supérieure à la valeur guide de l’OMS sur les eaux de boisson (50 mg/L), à la limite de qualité de la norme française (50 mg/L) et à la norme de potabilité nigérienne (45 mg/L), avec une concentration maximale de 336 mg/L (Figure 34). Ces valeurs guides ont été fixées pour assurer une protection contre la méthémoglobinémie et les effets thyroïdiens dans la frange de la population la plus sensible correspondant aux nouveau-nés nourris au biberon (directive OMS 2017). Aucune concentration en nitrite ne dépasse la valeur guide de 3 mg/L selon la directive OMS ou 0,5 mg/L selon la norme française.

Les concentrations les plus élevées en nitrates (>300 mg/L) se trouvent dans deux environnements géologiques différents. Au niveau de la rive droite, les concentrations les plus élevées se trouvent sur le pluton granitique et les roches vertes, principalement à proximité des zones d’orpaillage (Figure 35). Sur le socle du Liptako nigérien, l’origine de ce nitrate semble être naturelle puisqu’il n’existe pas d’activités agricoles à proximité de ces zones, ni de rejets d’eaux usées. Au niveau de la rive gauche, les concentrations élevées se situent principalement au niveau des affluents du *Fleuve Niger* qui captent les aquifères du Ct³ à faible profondeur (< 60 m). Sur cette zone, l’origine du nitrate est vraisemblablement liée à l’utilisation des engrais chimiques et aux rejets

d'eaux usées dus à une plus forte démographie (oxydation de matières azotées contenues dans les excréments humains).

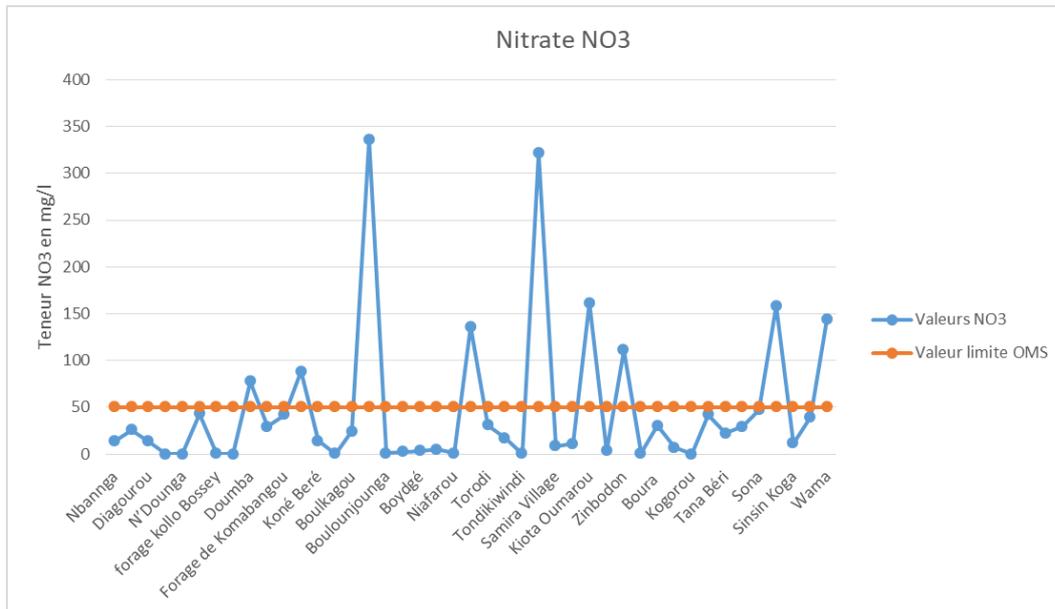


Figure 34 : Variation des concentrations en nitrates.

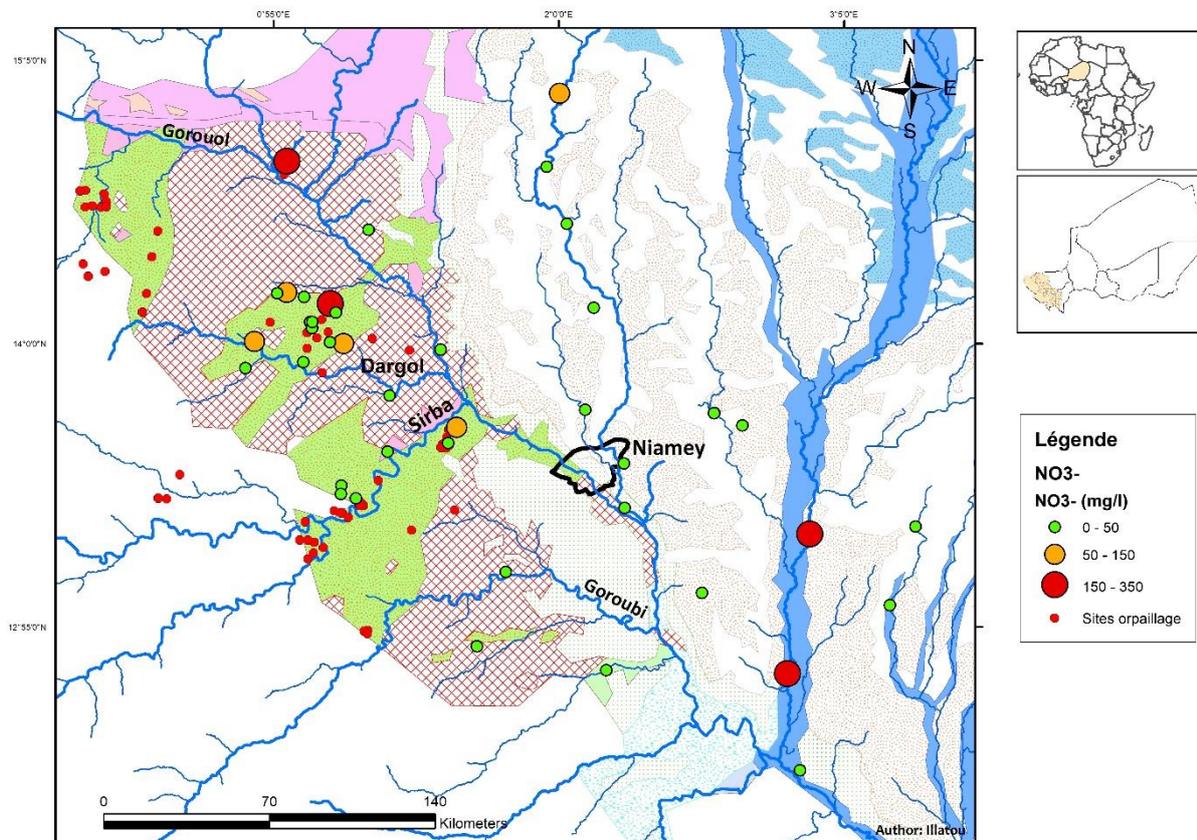


Figure 35 : Carte de localisation des sites ayant les concentrations les plus élevées en nitrates.

4.1.3.2.4 Bromure

Le bromure est fréquemment observé dans la nature en association avec le chlorure de sodium, étant donné leurs propriétés physiques et chimiques similaires (directive cadre OMS 2017). Il n'existe pas de valeur guide définie par la directive cadre OMS 2017, mais la note I-014 sur les mesures et applications (ASTM, D1246) indique que la concentration en bromure dans les eaux douces est normalement inférieure à 0.5 mg/L. Dans la zone d'étude, seul le forage artésien de Kollo Bossey (point 7, Figure 7) captant le Ct² cinq (5) présente une concentration supérieure à cette limite avec 0,62 mg/L (Figure 36). Sur ce forage, les concentrations en sodium (209 mg/L) et en chlorure (121 mg/L) sont élevées, justifiant ainsi l'association du bromure avec le chlorure de sodium.

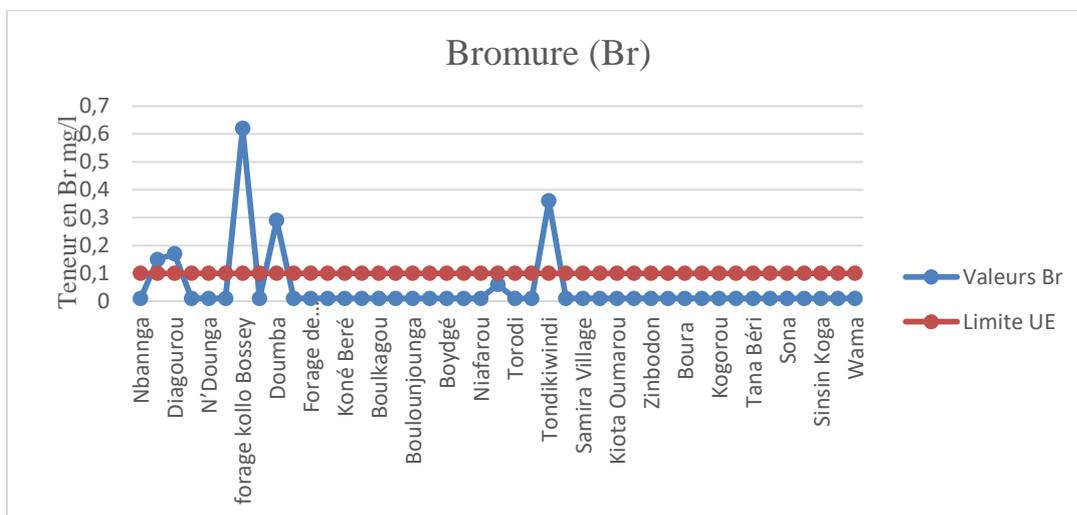


Figure 36 : Variation des concentrations en bromure dans les eaux souterraines.

Il est nécessaire de contrôler la présence de bromates dans les eaux ayant des concentrations élevées en ions bromures, puisque qu'ils se forment soit par oxydation des bromures (Br⁻) ou peuvent provenir d'impuretés présentes dans le désinfectant chloré (santé publique France, 2018). La valeur de référence des Bromures proposée pour les eaux destinées à la consommation humaine est de 10 µg/l (OMS 2004). Tandis que la présence de Bromure peut aussi être due à une pollution liée à l'homme (Afssa, 2015). Aucune étude épidémiologique n'a été référencée concernant les effets spécifiques des bromates sur la santé humaine, mais l'Union Européenne les classe en catégorie 2 comme substances devant être assimilées à des substances cancérigènes pour l'homme, Santé Canada aussi le classe comme probablement cancérigène chez l'homme (1999) avec suffisamment de preuves chez l'animal et pas de données chez l'homme (Afssa, 2015). La figure 37 ci-dessous montre la localisation des sites et la répartition des concentrations en bromure.

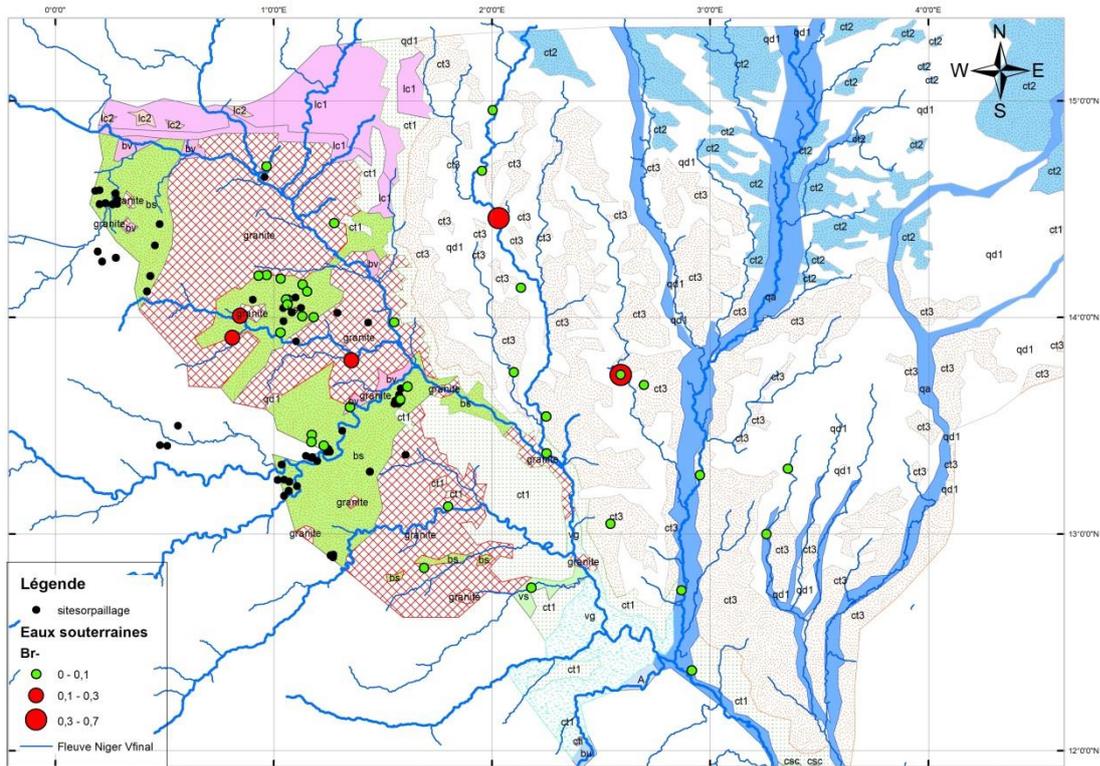


Figure 37 : Localisation des sites où les concentrations en bromure dans les eaux ont été mesurées.

4.1.3.2.5 Fluor

Deux forages excèdent les valeurs limites en fluorures de la directive OMS et de la norme française (1,5 mg/L). La valeur recommandée pour une fluoration artificielle des approvisionnements en eau est habituellement de 0,5 à 1,0 mg/L (directive OMS 2017).

Dans les eaux souterraines de la zone d'étude, les concentrations qui dépassent la valeur guide sont celles du forage de Kollo Bossey (1,77 mg/L, point 7) qui capte l'aquifère du Ct² et celui de Karakara (1,61 mg/L, point 38) qui capte l'aquifère du Ct³ (Figure 38). Il n'existe pas de fluoration artificielle sur les forages de la zone d'étude. De ce fait, l'origine du fluor pourrait être naturelle dans la zone de Dallol Maouri et dans le Ct² à Kollo Bossey. La figure 39 ci-dessous montre la localisation des sites et la répartition des concentrations en fluor.

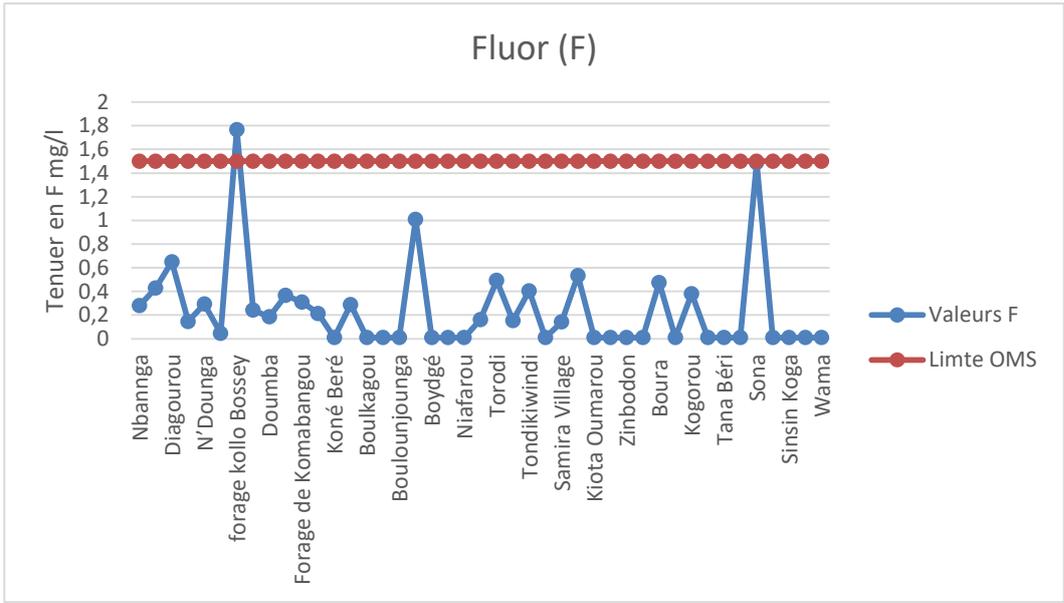


Figure 38 : Variation de la concentration en fluor des sites investigués.

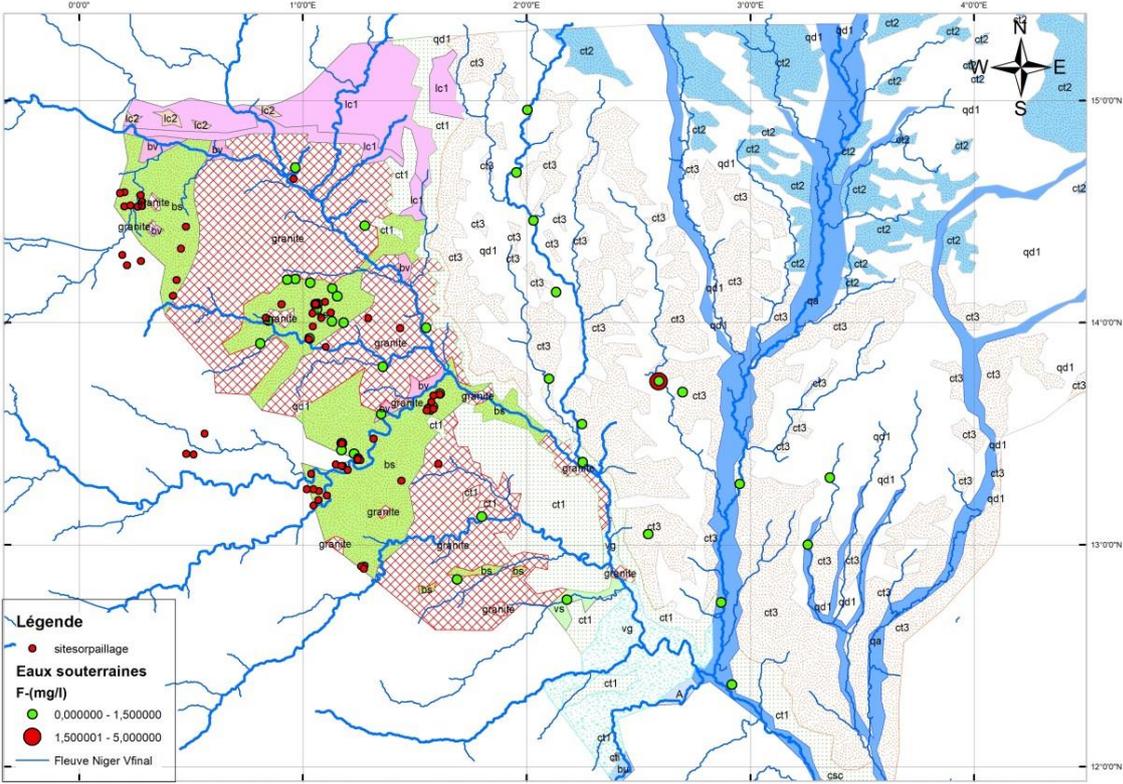


Figure 39 : Carte de distribution des concentrations en fluor.

4.1.3.3 Faciès hydrochimiques des eaux

Les valeurs calculées des balances ioniques sont jugées acceptables (< 10%). Pour cette analyse, le logiciel utilisé est DIAGRAMME, permettant de représenter les faciès chimiques des eaux du Liptako nigérien à travers le diagramme de Piper et le diagramme de Schoeller Berkalov. Globalement, le principal faciès chimique des eaux de la zone d'étude mis en évidence à travers le diagramme de Piper est de type bicarbonaté calcique et magnésien pour les deux types d'environnement géologique (eaux du Liptako nigérien et du Ct³), comme l'indiquent les travaux de Babayé *et al.* (2016) et le « Rapport sur la Gestion Intégrée et Durable des Systèmes Aquifères et des Bassins Partagés de la Région du Sahel » (2017), avec des faciès minoritaires de type chloruré sodique et potassique, bicarbonaté sodique et potassique et chloruré et sulfaté calcique et magnésien (Figure 40).

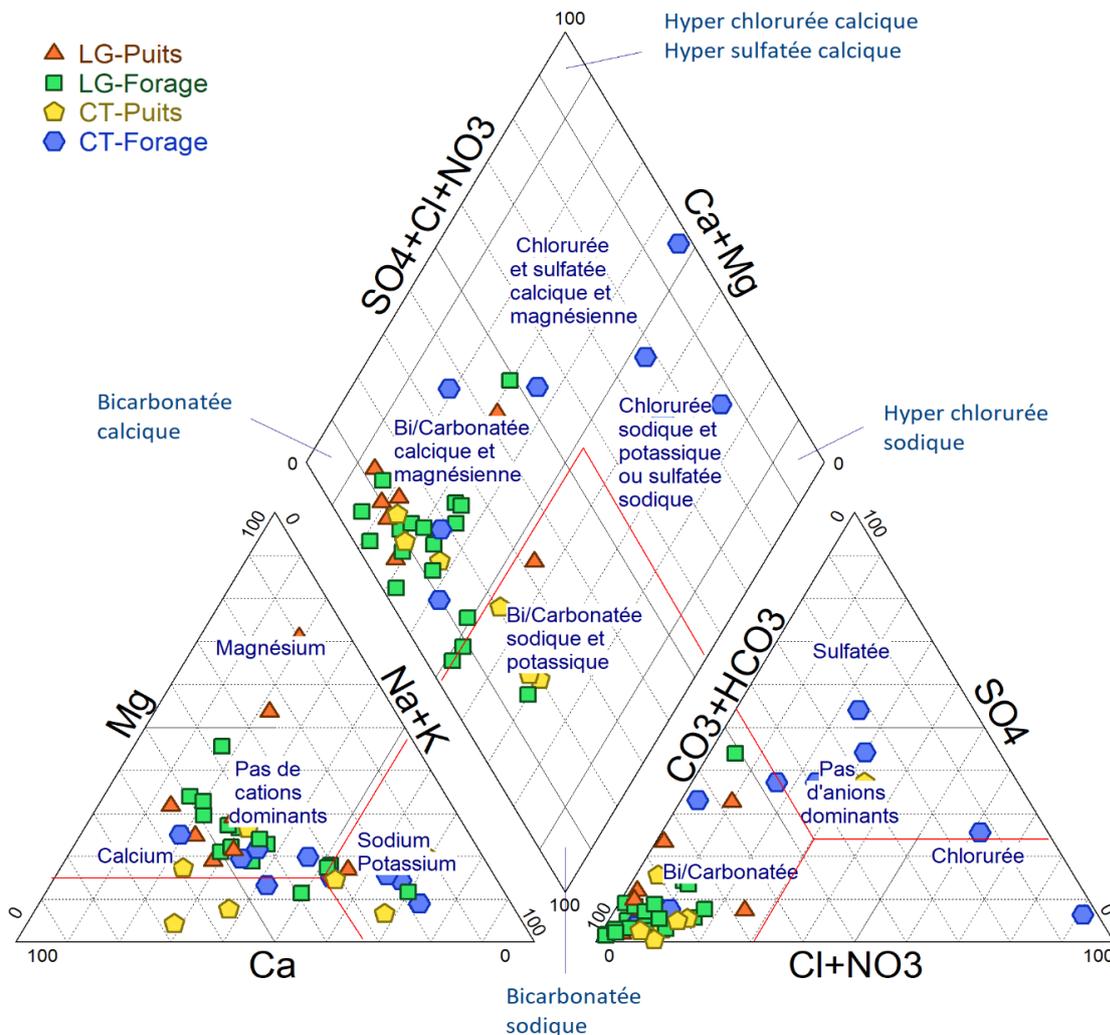


Figure 40 : Diagramme de Piper du secteur d'étude

Les faciès riches en chlorures sont rencontrés uniquement dans des forages proches des affluents du fleuve à des profondeurs inférieures à 40 m.

Les forages et les puits de la rive droite captant les aquifères des altérites et ceux des zones fracturées du socle du Liptako nigérien présentent des concentrations élevées en bicarbonates dont la valeur la plus élevée se trouve dans le forage de Sona captant les zones fracturées du socle avec une concentration de 524 mg/L (point 26, Figure 7). Le deuxième facteur de la variabilité des anions pour cette zone est associé aux concentrations élevées en nitrate qui atteignent 321 mg/L dans le forage de Ayerou Beibatan (point 26, Figure 7) captant également des zones fracturées du socle. Le diagramme des cations montre une dominance du magnésium dans les deux puits des sites d'orpaillage ayant des valeurs élevées d'Arsenic (198 µg/L et 202 µg/L) (Figure 41). Ce qui les positionne ainsi dans la partie des eaux à concentration élevée de magnésium.

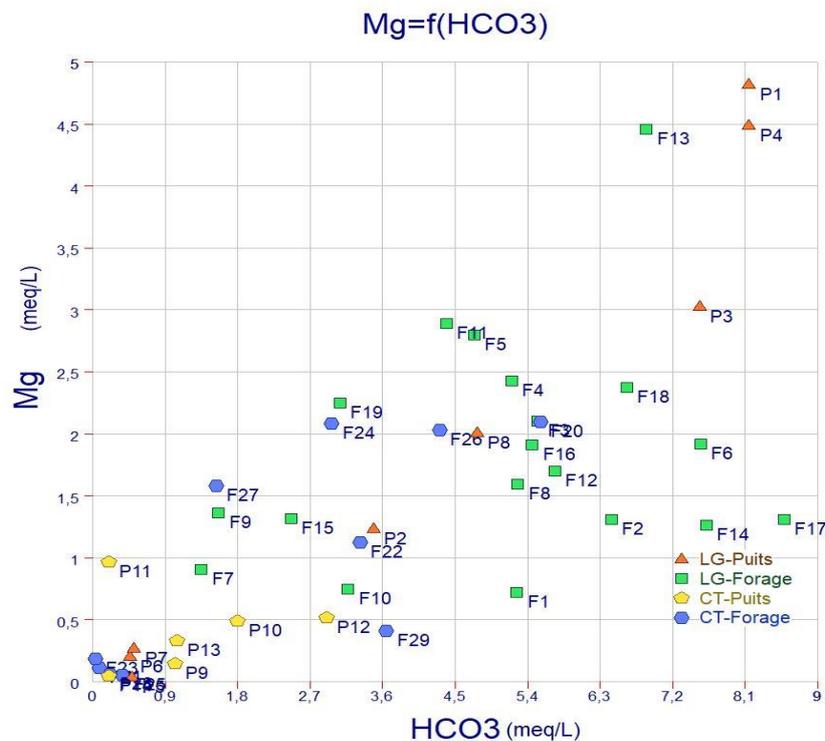


Figure 41 : Diagramme de corrélation entre le bicarbonate et le magnésium

Les puits et forages de la rive gauche constitués des aquifères du Ct³ et Ct² présentent des concentrations élevées en chlore et en nitrate et quelques fois en sulfate. Les forages qui présentent ces valeurs élevées sont de moindre profondeur (< 60 m) et sont situés sur un affluent de la rive gauche (le dallol Bosso) avec des conductivités relativement élevées. Pour ces forages, les faciès sont de type : chloruré sodique et potassique, chloruré et sulfaté calcique et magnésien et

bicarbonaté calcique et magnésien. Le puits de la rive gauche est principalement de type bicarbonaté sodique et potassique et bicarbonaté calcique et magnésien.

4.1.4 Concentration en métaux et en métalloïdes des rivières

4.1.4.1 Statistiques descriptives des résultats d'analyse

Les données issues des analyses par ICP-MS ont permis de déterminer les valeurs extrêmes (minima et maxima), la moyenne, l'écart-type et la médiane. Les résultats des statistiques élémentaires réalisées sur les concentrations en métaux et métalloïdes dans les eaux, sédiments et matières en suspension sont donnés dans les tableaux 10, 11, et 12 ci-dessous.

4.1.4.2 Concentration en phase dissoute dans les eaux de surface

Les concentrations en éléments traces dans la phase dissoute des eaux de rivière sont comparées aux valeurs publiées pour le *Fleuve Niger* et aux moyennes mondiales (Tableau 10). Pour la plupart des éléments traces mesurés, les valeurs médianes sont supérieures aux valeurs mesurées dans le *Fleuve Niger* et aux moyennes mondiales, à l'exception du cadmium, du chrome, du césium, du lithium, de l'antimoine, pour lesquels les valeurs sont similaires ou inférieures. Ces enrichissements reflètent probablement la lithologie particulière de la zone d'étude. Pour le cadmium, trois valeurs des stations des rivières *Sirba* (Sirb 1, Sirb 7) et *Dargol* (Darg 7) excèdent la moyenne mondiale.

Tableau 10 : Résultat des statistiques élémentaires des métaux et métalloïdes des eaux des rivières dissous dans les eaux des rivières (en µg/L).

| Eléments | Moyenne | Ecart-Type | Min | Max | Médiane | LD* (µg/L) | Fleuve Niger** (µg/L) | Moyenne mondiale** (µg/L) |
|----------|---------|------------|-------|--------|---------|------------|-----------------------|---------------------------|
| Ag | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | 0,007 | | |
| Al | 206 | 264 | 7,5 | 821 | 206 | 0,17 | 76 | 32 |
| As | 0,93 | 0,87 | 0,13 | 2,91 | 0,93 | 0,002 | | 0,62 |
| B | 22,54 | 17,51 | 7,37 | 74,40 | 22,54 | 0,11 | 3,2 | 10,2 |
| Ba | 186,79 | 167,00 | 27,24 | 659,72 | 186,79 | 0,002 | 30 | 23 |
| Cd | 0,08 | 0,12 | < LD | 0,46 | 0,08 | 0,00001 | | 0,08 |
| Co | 0,45 | 0,49 | 0,08 | 1,99 | 0,45 | 0,0003 | 0,0400 | 0,148 |
| Cr | 0,37 | 0,36 | 0,08 | 1,08 | 0,37 | 0,0005 | 0,450 | 0,7 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Cs | 0,01 | 0,01 | < LD | 0,04 | 0,01 | 0,0003 | 0,01 | 0,011 |
| Cu | 2,35 | 1,22 | 1,06 | 5,67 | 2,35 | 0,0008 | 0,630 | 1,48 |
| Fe | 131,3 | 178,3 | 5,84 | 590,1 | 131,3 | 0,1 | 105 | 66 |
| Li | 0,23 | 0,17 | 0,06 | 0,66 | 0,23 | 0,063 | | 1,84 |
| Mn | 30,73 | 44,02 | 1,01 | 161,41 | 30,73 | 0,002 | 0,50 | 34 |
| Mo | 1,22 | 2,10 | 0,05 | 7,84 | 1,22 | 0,004 | | 0,420 |
| Ni | 1,35 | 0,79 | 0,69 | 3,77 | 1,35 | 0,002 | 0,29 | 0,801 |
| P | 7,59 | 3,86 | 2,93 | 17,46 | 7,59 | 1 | - | - |
| Pb | 0,16 | 0,18 | 0,03 | 0,52 | 0,16 | 0,0004 | 0,039 | 0,079 |
| Rb | 4,57 | 1,76 | 2,80 | 9,11 | 4,19 | 0,003 | 3,86 | 1,63 |
| Sb | 0,17 | 0,25 | 0,01 | 0,97 | 0,07 | 0,0008 | - | 0,07 |
| Sn | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,10 | 0,03 | 0,020 | - | - |
| Sr | 168 | 129 | 24,77 | 447,05 | 147 | 0,0007 | 26,4 | 60 |
| Ti | 3,05 | 5,95 | 0,11 | 22,08 | 0,34 | 0,02 | - | 0,489 |
| U | 1,00 | 1,49 | 0,02 | 5,10 | 0,18 | 0,0007 | 0,020 | 0,372 |
| V | 2,14 | 1,33 | 0,70 | 4,77 | 2,19 | 0,001 | 0,590 | 0,71 |
| Y | 0,30 | 0,29 | 0,03 | 0,90 | 0,20 | 0,0003 | - | 0,0400 |
| Zn | 7,23 | 3,79 | 3,07 | 15,67 | 5,46 | 0,02 | 0,89 | 0,60 |

*LD = Limite de détection ; ** d'après Gaillardet et al., 2003

4.1.4.3 Concentration en éléments traces dans les matières en suspension

Les statistiques élémentaires ont été réalisées sur les concentrations en éléments traces dans les matières en suspension des rivières *Sirba* et *Dargol* (Tableau 11).

Tableau 11 : Résultat des statistiques élémentaires des métaux et des métalloïdes dans les matières en suspension ($\mu\text{g/g}$ de matière sèche).

| Éléments | Moyenne | Ecart Type | Min | Max | Médiane | Moyenne MES des rivières du monde (Viers et al., 2009) |
|----------|---------|------------|------|-------|---------|--|
| Ag | 0,11 | 0,10 | 0,02 | 0,41 | 0,08 | - |
| As | 5,65 | 4,54 | 1,73 | 17,03 | 5,19 | 36.3 |

| | | | | | | |
|----|--------|--------|-------|---------|--------|-------|
| B | 12,24 | 10,03 | 1,86 | 32,11 | 11,44 | - |
| Ba | 236,93 | 147,37 | 31,64 | 499,30 | 237,40 | 522 |
| Cd | 1,68 | 5,80 | 0,02 | 20,98 | 0,04 | 1.55 |
| Co | 12,54 | 8,22 | 1,92 | 24,88 | 11,89 | 22.5 |
| Cr | 83,21 | 55,80 | 11,86 | 166,99 | 80,22 | 130 |
| Cs | 1,87 | 1,47 | 0,18 | 4,52 | 1,82 | 6.25 |
| Cu | 27,05 | 17,39 | 5,03 | 52,63 | 30,22 | 75.9 |
| Fe | 31948 | 21066 | 4859 | 64367 | 37983 | 58100 |
| Li | 18,63 | 14,24 | 2,02 | 42,01 | 20,20 | 8.5 |
| Mn | 573,52 | 712,94 | 36,55 | 2832,27 | 373,15 | 1679 |
| Mo | 0,78 | 0,47 | 0,15 | 1,52 | 0,68 | 2.98 |
| Ni | 42,62 | 28,70 | 6,38 | 86,76 | 42,98 | 74.5 |
| Pb | 10,93 | 7,70 | 1,85 | 22,82 | 12,19 | 61.1 |
| Cs | 1,87 | 1,47 | 0,18 | 4,52 | 1,82 | 6.25 |
| Rb | 30,38 | 21,34 | 3,66 | 65,22 | 31,84 | 78.5 |
| Sb | 0,46 | 0,44 | 0,12 | 1,54 | 0,32 | 2.19 |
| Se | 1,51 | 1,06 | 0,29 | 3,41 | 1,26 | - |
| Sn | 1,97 | 1,33 | 0,31 | 3,91 | 1,79 | 4.57 |
| Sr | 56,90 | 36,43 | 12,36 | 122,37 | 57,00 | 187 |
| U | 1,61 | 1,23 | 0,17 | 3,64 | 1,94 | 3.30 |
| V | 78,94 | 50,88 | 13,29 | 148,20 | 80,05 | 129 |
| Zn | 56,86 | 40,28 | 11,09 | 136,69 | 65,21 | 208 |

D'après les valeurs médianes, les concentrations en éléments traces dans les MES des rivières de la zone d'étude sont généralement plus faibles que la moyenne mondiale. Toutefois, une concentration treize fois plus élevée que la moyenne mondiale a été mesurée pour le cadmium, au niveau de la station Sirb 1 située au point le plus en aval de la rivière Sirba. Ceci est cohérent avec la concentration élevée retrouvée dans la phase dissoute de la même station. Le caractère ponctuel suggère une anomalie d'origine anthropique.

4.1.4.4 Concentration en éléments traces dans les sédiments

Les concentrations en éléments traces dans les sédiments sont présentées dans le tableau 12. Compte-tenu du biais sur la détermination des concentrations lié à la différence de granulométrie des échantillons, celles-ci ne peuvent pas être directement comparées à des valeurs moyennes mondiales des sédiments de rivière.

Tableau 12 : Résultat des statistiques élémentaires des métaux et des métalloïdes dans les sédiments ($\mu\text{g/g}$ de matière sèche).

| Eléments | Moyenne | Ecart Type | Min | Max | Médiane |
|----------|---------|------------|------|------|---------|
| Ag | 0,03 | 0,13 | 0,07 | 0,03 | 0,07 |
| As | 1,42 | 22,48 | 5,50 | 5,96 | 4,17 |

| | | | | | |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| B | 7,94 | 27,96 | 15,31 | 6,19 | 15,71 |
| Ba | 27,35 | 437,82 | 184,25 | 108,96 | 163,31 |
| Cd | 0,01 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| Co | 1,59 | 17,14 | 7,86 | 5,06 | 5,84 |
| Cr | 15,44 | 188,48 | 63,72 | 48,43 | 42,51 |
| Cs | 0,12 | 2,01 | 0,65 | 0,52 | 0,60 |
| Cu | 3,56 | 37,10 | 14,99 | 11,18 | 11,78 |
| Fe | 5 468 | 81 793 | 24 906 | 24 029 | 13 823 |
| Li | 2,73 | 31,29 | 8,03 | 8,03 | 5,44 |
| Mn | 58,41 | 1 292 | 383,12 | 360,33 | 261,44 |
| Mo | 0,17 | 1,46 | 0,63 | 0,46 | 0,42 |
| Ni | 3,52 | 48,14 | 18,20 | 13,49 | 13,47 |
| Pb | 2,17 | 15,61 | 8,06 | 4,18 | 6,73 |
| Cs | 0,12 | 2,01 | 0,65 | 0,52 | 0,60 |
| Rb | 1,80 | 29,23 | 11,23 | 7,20 | 9,45 |
| Sb | 0,14 | 1,61 | 0,69 | 0,50 | 0,66 |
| Se | 0,28 | 1,45 | 0,96 | 0,37 | 0,95 |
| Sn | 0,23 | 8,92 | 1,76 | 2,45 | 0,85 |
| Sr | 7,20 | 56,82 | 38,76 | 15,88 | 38,14 |
| U | 0,24 | 3,96 | 1,61 | 1,04 | 1,24 |
| V | 16,69 | 220,62 | 65,53 | 61,25 | 38,15 |
| Zn | 6,00 | 66,73 | 26,73 | 19,45 | 19,00 |

4.1.5 Concentration en pesticides polaires des eaux du fleuve Niger et la rivière Mékrou

4.1.5.1 Fréquence de détection et de quantification des eaux du Fleuve Niger et de la rivière Mékrou par les herbicides et les fongicides

Pour toutes les campagnes d'échantillonnage, douze pesticides, dont dix (10) herbicides comprenant l'acétochlore, l'alachlor, le diuron et ses métabolites (DCPMU et DCPU), l'atrazine et ses métabolites (DEA et DIA), l'atrazin-desethyl-DEA et la simazin et deux fongicides (méthalaxyl et du tébuconazole) ont été détectés, soit 38% des composés analysés ont été détectés et 32% ont été quantifiés (Figures 42 et 43). Pour l'échantillonnage ponctuel, le DCPMU et le fongicides tébuconazole n'ont jamais été détectés ou quantifiés et le fongicide méthalaxyl a été détecté mais n'a jamais été quantifié. Le DCPU n'a pas été détecté et quantifié dans les POCIS et l'herbicide tébuconazole est uniquement détecté et quantifié à faible concentration dans le POCIS. L'alachlor a été détecté et n'a pas été quantifié pour tous les échantillons.

Les fréquences de détection et de quantification dépendent des types de pesticides et des périodes d'échantillonnage. Selon le résultat des deux campagnes d'échantillonnage, les POCIS présentent des fréquences de détections les plus élevées avec 86% pour l'acétochlore, 71 % pour le DIA et 64% pour le diuron, l'atrazine et le métalaxyl. Le pourcentage des fréquences de quantification le plus élevé concerne les POCIS échantillonnés lors de la campagne de la saison des pluies entre juin et septembre 2019 et les plus faibles pourcentages pour les deux types d'échantillonnage se situent entre avril et mai.

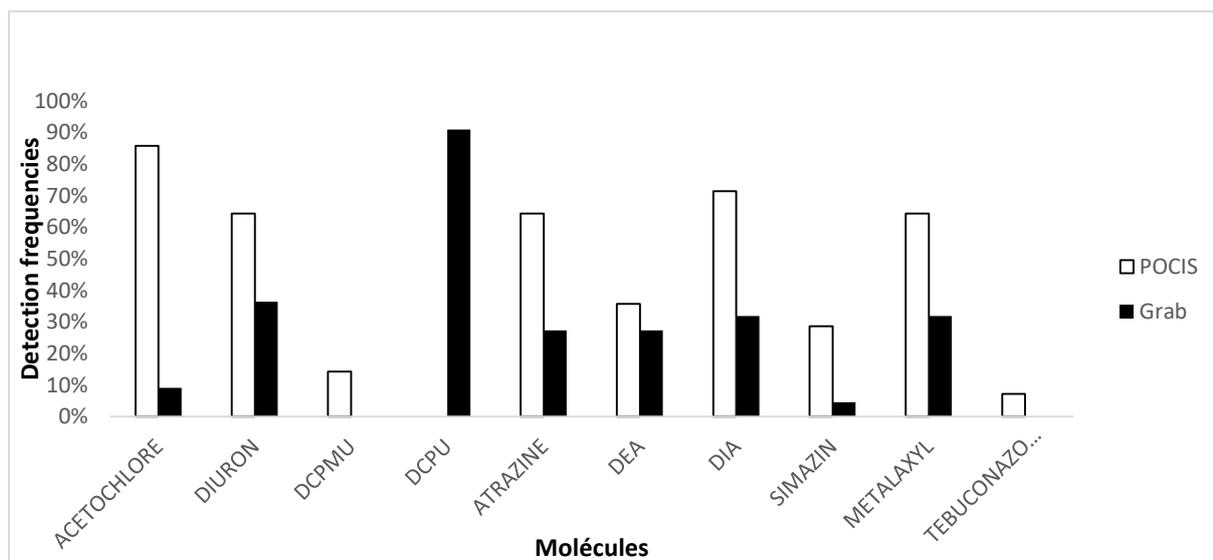


Figure 42 : Fréquence de détection des herbicides et fongicides de la zone d'étude.

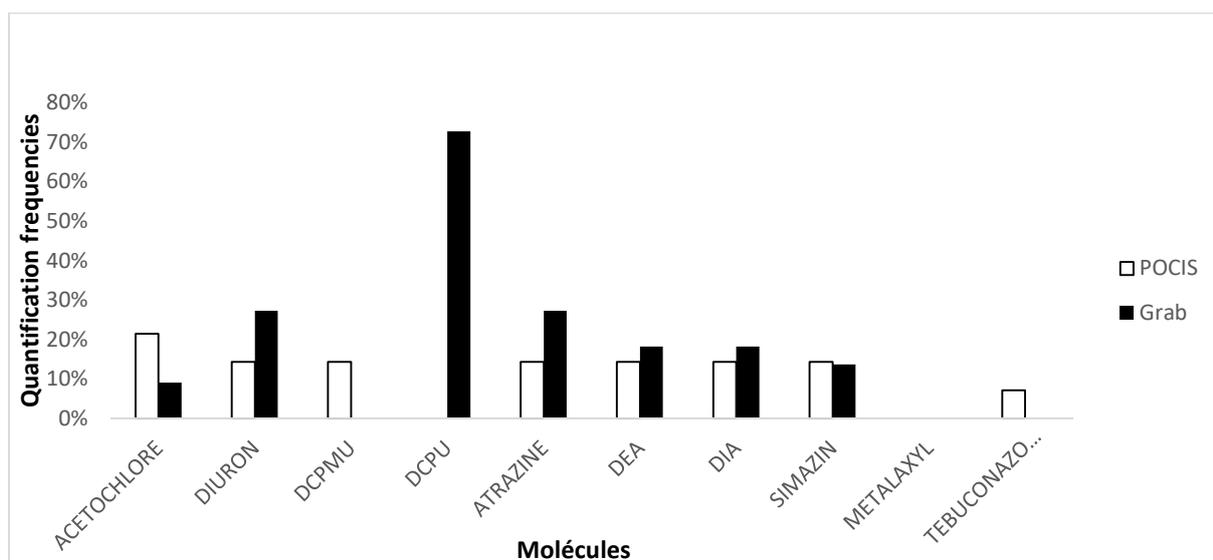


Figure 43 : Fréquence de quantification des herbicides et fongicides de la zone d'étude.

Pendant la saison des pluies, les pesticides qui présentent les fréquences de quantification les plus élevées dans les échantillonnages ponctuels et passifs sont constitués d'herbicides diuron avec 60%, de l'atrazine avec 40% et de l'acétochlore avec plus de 20%. Aucune concentration élevée n'a été mise en évidence au niveau des fongicides.

4.1.5.2 Contamination des eaux du Fleuve Niger et de la rivière Mékrou par les herbicides et les fongicides

4.1.5.2.1 Pour les échantillonnages ponctuels

Les concentrations les plus élevées et qui présentent des fréquences de quantification supérieures à 20% ont été rencontrées dans l'échantillonnage ponctuel. Les principaux pesticides rencontrés sont : le diuron (3281 ± 222 ng/L) et l'atrazine (1476 ± 65 ng/L) avec ses produits de dégradations, suivi de l'acétochlore ($255 \pm 9,3$ ng/L). Les deux principaux pesticides (diuron et atrazine) ont été mesurés au site F6 situé à la confluence entre la rivière *Mékrou* et le *Fleuve Niger* et échantillonnés pendant le mois d'août. La concentration la plus élevée de l'acétochlore a été mesurée au site F4 situé à la sortie de la ville de Niamey et échantillonné pendant le mois septembre. Les concentrations en pesticides de l'eau échantillonnée au site F6 ont diminué en trois semaines (du 09 au 30 août) et varient de 3281 ± 222 à 1057 ± 100 ng/L pour le diuron et de 1476 ± 65 à 814 ± 42 ng/L pour l'atrazine. Les métabolites de l'atrazine ont des concentrations moyennes et ne présentent pas de variation pendant les trois (3) semaines ($99 \pm 3,4$ ng/L pour le DEA et $35,9 \pm 3,2$ ng/L pour le DIA). Pendant la même campagne en saison des pluies, les autres sites d'échantillonnage, F1, F2, F3, F4 et F7 présentent de faibles concentrations en diuron allant de la limite de détection à 19,1 ng/L et de la limite de détection à 18,7 ng/L pour l'atrazine. Les autres campagnes d'échantillonnage ponctuel en saison sèche présentent de très faibles concentrations pour toutes les molécules analysées. Une seule concentration en acétochlore a été mise en évidence au niveau du site F4, à la fin de la saison des pluies, au mois de septembre. Cette concentration est absente pendant la campagne de la saison sèche (entre avril et mai) et la campagne de la saison des pluies et la présence de l'acétochlore sur ce site pourrait être liée à une contamination ponctuelle.

4.1.5.2.2 Pour les échantillonnages passifs par POCIS

L'utilisation d'un échantillonnage passif (POCIS) est recommandée dans le document d'orientation de la Commission Européenne (document d'orientation de la CE n°19) et dans la directive 2013/39/UE (UE 2013) pour les substances prioritaires en tant que méthode complémentaire pour la surveillance de la contamination des eaux de surface. Le POCIS a été

utilisé dans le cadre de cette étude pour déterminer la biodisponibilité des polluants organiques sur une période de trois (3) semaines et aussi évaluer son efficacité pour la surveillance environnementale le long du fleuve Niger.

4.1.5.2.3 Détermination des concentrations en pesticides dans les POCIS

L'accumulation de contaminants par les échantillonneurs passifs suit généralement une cinétique de premier ordre avec une phase d'intégration initiale suivie d'une phase curviligne pour atteindre l'équilibre de partition (Branchet *et al.* 2018, Mhadhbi *et al.* 2019). Dans la région linéaire de l'absorption de POCIS, la quantité d'un produit chimique accumulé dans l'échantillonneur (M) est décrite par l'Eq. (1) :

$$M = C_w \cdot R_s \cdot t \quad (1)$$

Où R_s est le taux d'échantillonnage (L/jour), C_w est la concentration du composé dans l'eau (ng/L) et t est le temps d'exposition (jours).

La concentration moyenne pondérée dans le temps (TWA) dans l'eau est calculée avec l'Eq. (2) :

$$C_{\text{water}} = C_{\text{pocis}} \cdot M_{\text{pocis}} / R_s \cdot t \quad (2)$$

Avec

C_w : concentration moyenne de pesticide dans l'eau ($\mu\text{g/L}$)

C_{pocis} : concentration dans le POCIS ($\mu\text{g/g}$)

M_{pocis} : masse de la phase absorbante dans le POCIS (g)

R_s : taux d'échantillonnage (L/jour)

T : durée du déploiement POCIS (jours)

Les taux d'échantillonnage (R_s) participent à la conversion en nanogrammes par litre, des quantités de pesticides accumulées dans les POCIS. Ils ont été déterminés dans les conditions de laboratoire pour chaque composé en divisant la pente de la courbe de régression linéaire par la concentration aqueuse moyenne des composés sélectionnés sur une période de 15 jours (Ibrahim *et al.* 2012, 2013). Des valeurs R_s des composés dont les taux d'échantillonnage n'ont pas été déterminés dans le laboratoire créer, mais ont été extraites de la littérature (Ahrens *et al.* 2015 ; Desgranges 2015 ; Greenwood *et al.* 2007 ; Poulier *et al.* 2014, Branchet *et al.* 2018).

Le R_s moyen des composés, utilisé dans la présente étude est de 0.215 L/jour et les plus faibles valeurs sont celles de DIA (0.068 L/jour) et de DEA (0.133 L/jour) supposant que leurs concentrations peuvent avoir été sous estimées (Branchet *et al.* 2018).

Le résultat a montré que les concentrations, les plus élevées sont mises en évidence dans les POCIS du site F6 situé à la confluence entre la rivière *Mékrou* et le *Fleuve Niger* et échantillonné pendant le mois d'août. Les deux principaux pesticides sont le diuron avec une concentration moyenne de 311 ng/L et 217 ng/L pour l'atrazine. Les POCIS des sites F1, F2, F4 et F7 des deux campagnes ont donné des résultats inférieurs à la limite de détection.

4.1.5.2.4 Bilan des résultats par site

Selon la Directive 2008/105/CE, la concentration en acétochlore mise en évidence au site F4 ($255 \pm 9,3$ ng/L) est de deux virgule cinq (2.5) fois supérieure à la valeur de la limite environnementale, celle de diuron au site F6 (3281 ± 222 ng/L) est de quinze (15) fois supérieures aux normes et celle de l'atrazine (1476 ± 65 ng/L) est de deux (2) fois supérieure à la norme. Dans tous les pays du CILSS, on dénote une méconnaissance du devenir et du comportement des pesticides dans les petits cours d'eau de bassins versants agricoles, en particulier du fait de la grande variabilité des apports de versant et de la complexité des phénomènes mis en jeu (Rabiet *et al.* 2008). L'utilisation intensive des pesticides le long du *Fleuve Niger* et ses affluents constitue le facteur anthropique à l'origine de la contamination élevée en diuron, en atrazine et en acétochlore.

Les fortes concentrations de l'atrazine et du diuron mesurées dans les eaux du site de Boumba au F6 méritent un regard particulier, au regard des grosses quantités de pesticides utilisées dans l'agriculture intensive du coton qui est vulnérable aux assauts des insectes et les autres ravageurs. La rivière *Mékrou* prend sa source au Bénin et la culture du coton se pratique sur des terrains de hautes altitudes. Une partie des pesticides utilisés peuvent facilement ruisseler vers le *Fleuve Niger*. Ces transferts de polluants du site d'application au niveau de la rivière *Mékrou* vers le *Fleuve Niger* en passant par le Parc du W, classé patrimoine mondial de l'Unesco et situé aux confins entre le Niger, le Bénin et le Burkina, constituent une menace et peuvent générer d'importantes perturbations sur les écosystèmes. Dans la partie béninoise et burkinabée, des travaux ont mis en évidence l'impact de l'utilisation des pesticides par les populations riveraines sur les écosystèmes (Soclo *et al.*, 2003 ; Son *et al.*, 2017).

Bien qu'il n'existe pas de donnée sur l'utilisation intensive des pesticides dans les cultures au Sud du Burkina Faso sur la rivière *Mékrou*, les fortes concentrations en pesticides mises en évidence au Bénin et au Niger par la présente étude montrent des risques d'expositions aux impacts environnementaux et sanitaires dans cette zone. Les impacts potentiels de l'utilisation des pesticides peuvent engendrer la baisse de la fertilité du sol et la libération des polluants. La

pollution des eaux par les nitrates et les métaux lourds (Pb, Zn, Mn) engendrent les intoxications aiguës, l’empoisonnement, la baisse de la fécondité et même les décès (Lawani *et al.* 2017).

Les résultats obtenus par site sont présentés ci-dessous :

Pour le site F1

L’échantillonnage a été réalisé en saison des pluies du 07/08/2019 à 28/08/2019. Les eaux échantillonnées proviennent du Mali et présentent une grande turbidité (Figure 44). Les POCIS sont exposés 21 jours dans l’eau. Le résultat de l’analyse des eaux du point F1 est présenté ci-dessous (Figure 45).



Figure 44 : Site F1 sur le fleuve Niger, en provenance du Mali.

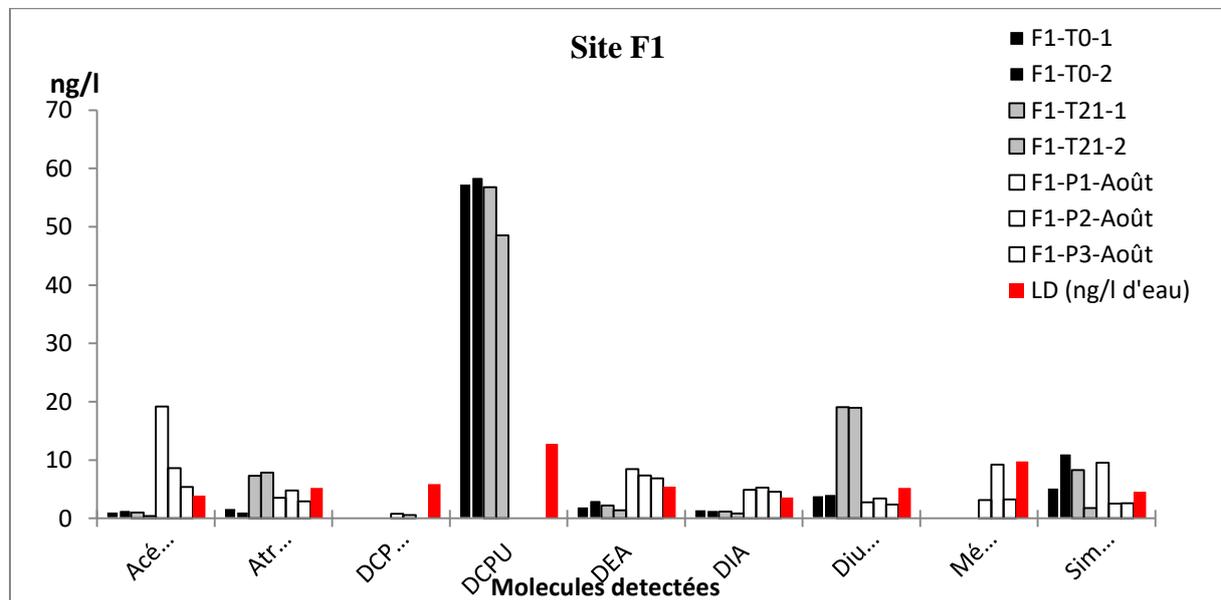


Figure 45 : Résultat des analyses du site F1.

Pour le site F2

L’échantillonnage a été réalisé en saison sèche, sur une période de 15 jours (du 01/05/2019 à 15/05/2019). Le résultat de l’analyse des eaux du point F2 est présenté ci-dessous (Figure 46).

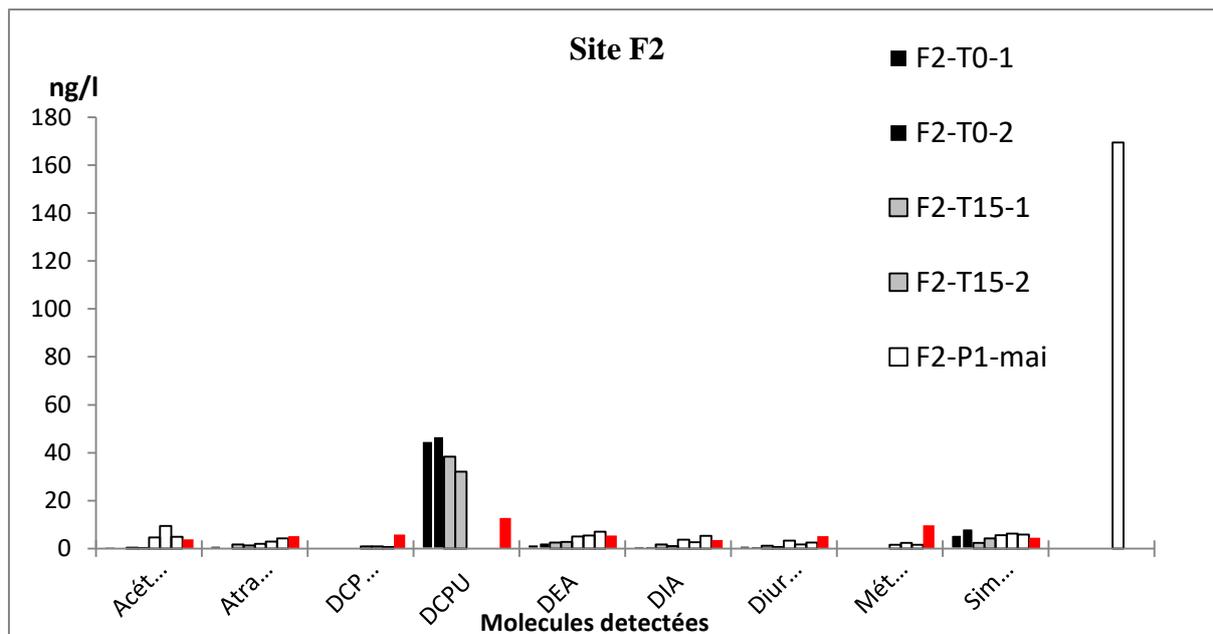


Figure 46 : Résultat des analyses du site F2.

Pour le site F3

Un seul échantillonnage ponctuel a pu être réalisé sur ce site le 01/05/2019 pendant la saison sèche sur une plage en amont de la ville de Niamey (Figure 47). Le résultat de l'analyse des eaux du point F3 est présenté ci-dessous (Figure 48).



Figure 47 : Site F3 sur le fleuve Niger, en amont de la ville de Niamey.

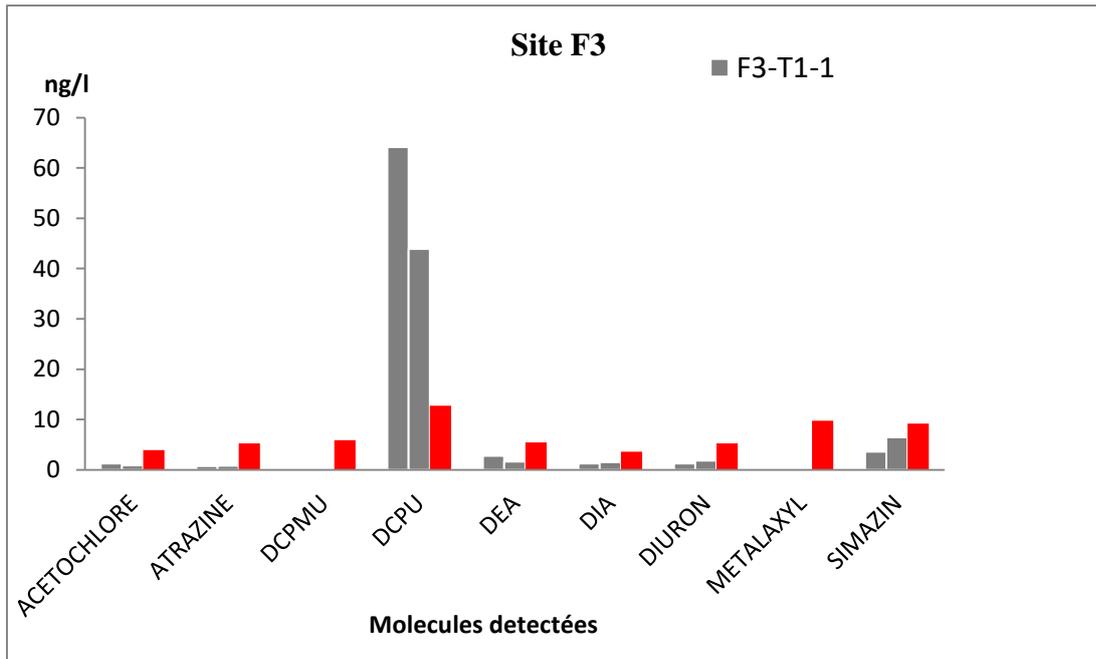


Figure 48 : Résultat des analyses du site F3.

Pour le site F4

Le site a été échantillonné pendant les deux campagnes, pendant la saison sèche du 21/04/2019 à 04/05/2019 et en fin de la saison des pluies, en septembre (Figure 49). Il se trouve à la sortie du fleuve en aval de la ville de Niamey. Les POCIS sont exposés 15 jours dans l'eau. Le résultat de l'analyse des eaux du point F4 est présenté ci-dessous (Figure 50).



Figure 49 : Site F4 sur le fleuve Niger, en aval de la ville de Niamey.

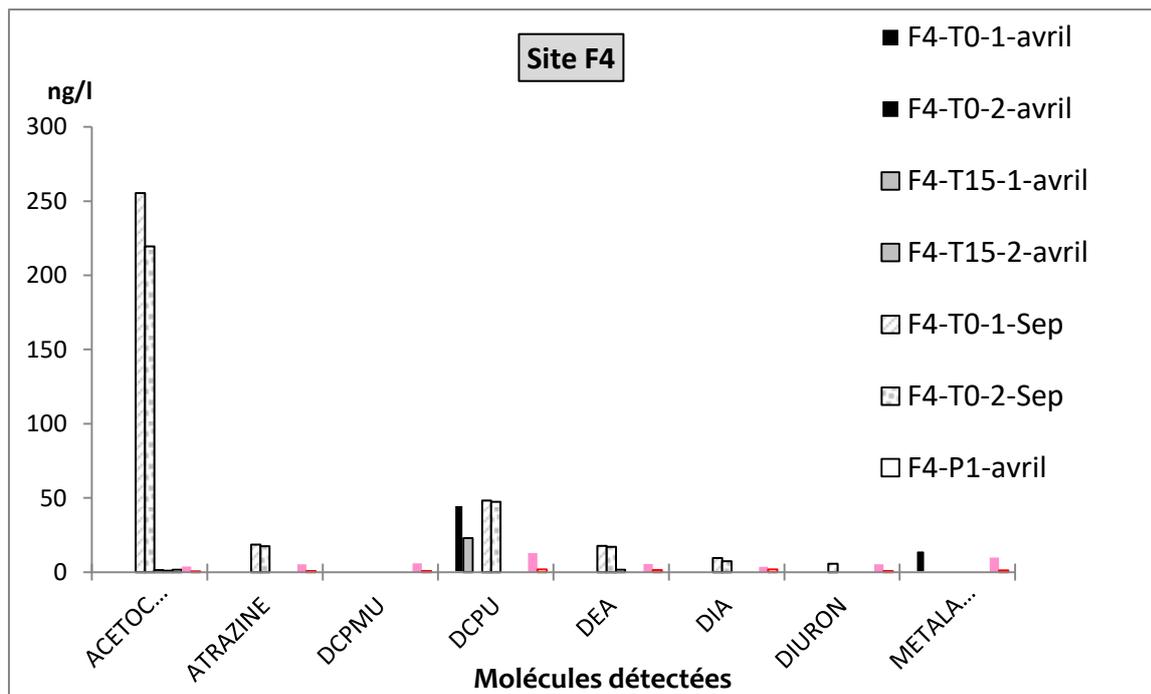


Figure 50 : Résultat des analyses du site F4.

Pour le site F6

Le site a été échantillonné pendant la saison des pluies du 09/08/2019 à 30/08/2019. Il est situé à la confluence entre le *Fleuve Niger* et la rivière *Mékrou* (Figure 51). Les POCIS ont été exposés pendant 21 jours dans l'eau qui présente une grande turbidité. Le résultat de l'analyse des eaux du point F6 est présenté ci-dessous (Figure 52).



Figure 51 : Site F6, à la confluence entre le Fleuve Niger et la rivière Mékrou.

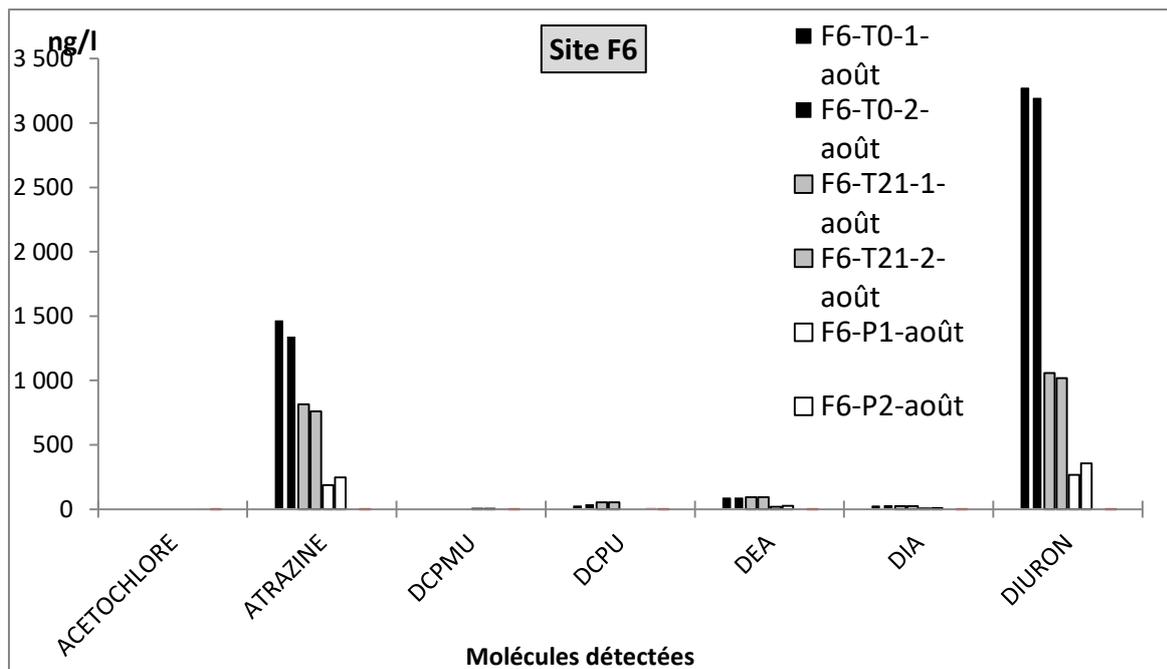


Figure 52 : Résultat des analyses du site F6.

Pour le site F7

Le site a été échantillonné pendant la saison sèche du 06/05/2019 au 21/05/2019. Il se trouve dans la partie aval du Fleuve Niger en territoire nigérien (Figure 5353). Le résultat de l'analyse des eaux du point F7 est présenté ci-dessous (Figure 54).



Figure 54 : Site F7, dans la partie aval du fleuve Niger en territoire nigérien.

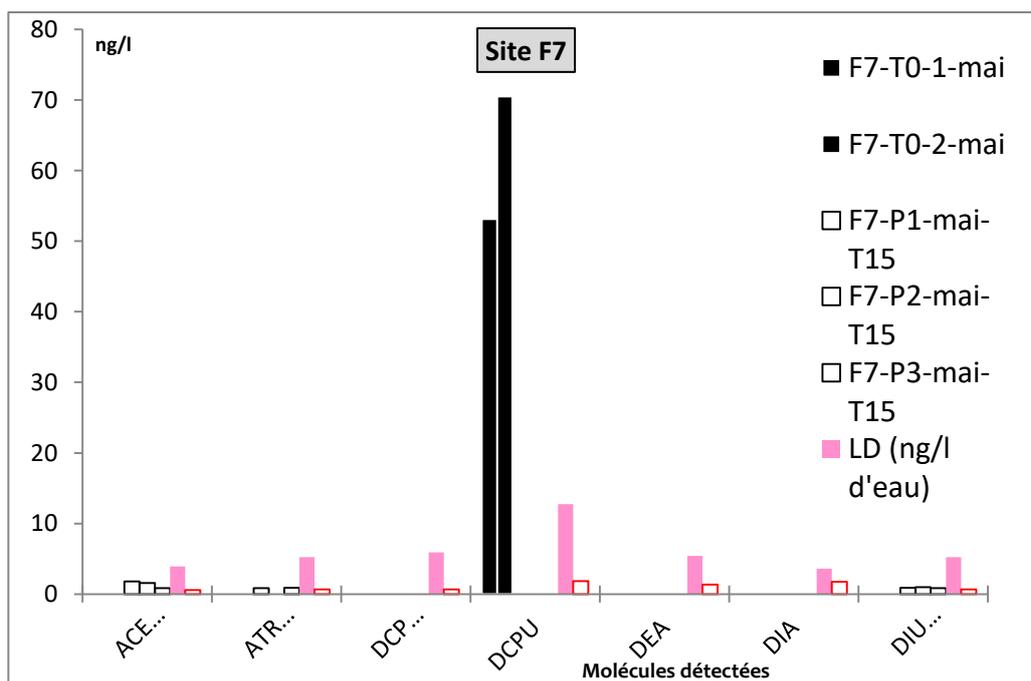


Figure 55 : Résultat des analyses du site F7.

4.2 Discussion

4.2.1 Analyse de l'hydrochimie des eaux de la zone d'étude

L'étude du chimisme des eaux de la zone d'étude a mis en évidence un faciès principal de type bicarbonaté calcique et magnésien pour les deux ensembles géologiques : formations de socle du Liptako nigérien et formation du Ct. La présence des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les altérites est associée aux processus d'altération des minéraux silicatés et ferromagnésiens. Les teneurs en chlorures et en sulfates sont généralement faibles dans les eaux des aquifères fracturés du socle, en accord avec les travaux de Travi et Mudry (1997), portant sur les réservoirs du socle de l'Afrique de l'Ouest.

L'aquifère du Ct présente également deux faciès minoritaires de type chloruré sodique, potassique et chloruré, et sulfaté calcique à magnésien dans les forages. La concentration la plus élevée en chlorure est rencontrée dans cet environnement géologique au niveau du forage de Kiota Oumarou

(point 29) captant le Ct^3 à une profondeur de 30 m (avec une concentration de 252 mg/L, excédant les normes nigérienne et de l’OMS (250 mg/L)), celle du sulfate et du bromure dans le forage de Kollo Bossey (point 07) captant le Ct^2 à une profondeur de 154 mg/L (253,91 mg/L pour le sulfate, excédant la norme nigérienne (200 mg/L) et OMS (250 mg/L) et 0,62 mg/L pour le bromure). La présence des ions chlorures dans les puits et les forages est liée à une pollution fécale due à la présence des latrines. Les concentrations élevées en ions sulfate semblent être d’origine naturelle puisqu’il n’existe aucune activité humaine susceptible de le libérer. Les concentrations en nitrate excèdent les valeurs limites sur trois forages du Ct^3 , situés sur les affluents du fleuve Niger à faible profondeur (< 60 m). Les conductivités mesurées dans ces forages à faible profondeur sont relativement élevées et les concentrations élevées en nitrate mises en évidence ont été notifiées dans les travaux de Elbaz-Poulichet *et al.* (2002) sur l’influence d’une recharge hautement minéralisée avec des résultats similaires à ceux des puits de Bani Kossey (point 36) et Kogorou (point 35) analysés en 2002. Une autre source de nitrates est celle de la rupture du cycle de l’azote après le défrichement de la végétation évoquée par Favreau *et al.* (2003). Dans la zone de Niamey, plusieurs études sur les ressources en eau souterraine ont montré le risque de pollution par les composés azotés et les bactéries (Gross, 1999 ; Ousmane *et al.* 2001 ; Chippaux *et al.*, 2002 ; Aissata, 2010).

L’aquifère du socle du Liptako nigérien présente un faciès minoritaire de type bicarbonatée sodique et potassique pour un puits et un forage. Les ions bicarbonates sont présents à des concentrations élevées dont la plus grande valeur se trouve au niveau du forage de Sona (point 39) captant les zones fracturées du LG (523,92 mg/L). Son origine peut être attribuée notamment à l’altération chimique des minéraux silicatés (Girard *et al.* 1997 ; Sako *et al.*, 2016 ; Babayé *et al.* 2016).

4.2.2 Statistiques descriptives multidimensionnelles et origines des métaux et métalloïdes dans les eaux

A partir des analyses minéralogiques et chimiques de la roche, il est possible de déterminer les origines anthropiques ou naturelles des éléments présents et aussi d’identifier les facteurs qui ont influencé les processus de contamination.

4.2.2.1 Facteurs de variabilité des teneurs en métaux traces Mn, Ni, Ba et B dans les eaux souterraines

Le résultat des analyses montre des concentrations élevées en manganèse, en nickel, en baryum et en bore dans certains puits et forages de la zone d'étude.

Une analyse statistique multidimensionnelle a été réalisée pour évaluer la relation entre les paramètres mesurés et leur distribution entre les différents forages. Les éléments comme le Mn, le Co, le Ni et le Fe évoluent dans le même sens positif par rapport à l'axe 1 avec une bonne corrélation (0,8 pour Mn-Co et Mn-Ni, 0,68 pour Mn-Fe, 0,93 pour Fe-Co, 0,72 pour Fe-Ni, 0,83 pour Co-Ni) reflétant ainsi leur origine commune (Figure 39). La mobilisation de ces éléments dans les eaux souterraines du Liptako nigérien semble être naturelle et liée à l'environnement géologique. Cette mobilisation est favorisée par les processus d'altération de la roche mère et contrôlée par les facteurs tels que le pH et les conditions redox du milieu. Le résultat des analyses au MEB-EDS et à l'ICP-MS indique que le manganèse, le baryum, le cobalt et le nickel sont présents naturellement à des concentrations élevées ou en traces dans les roches du Liptako nigérien.

La concentration la plus élevée en Mn se trouve dans le puits d'orpaillage de Boulounjounga (956 µg/) (point 17) où l'arsenic est déjà présent à une concentration très élevée (189.74 µg/L). Les autres points sont situés dans l'aquifère du Ct³, principalement au niveau des affluents du fleuve Niger. L'origine du Mn dans ces puits et ces forages semble être naturelle puisque qu'il n'existe aucune activité anthropique en rive gauche, susceptible de favoriser sa libération. De même au niveau du Liptako Gourma, l'origine du Mn semble être naturelle et anthropique. En effet, sa libération dans les eaux souterraines est liée d'une part, à l'altération des terrains birimiens, riches en Mn et d'autre part, à l'exploitation aurifère qui crée les conditions nécessaires à sa mobilisation dans l'eau.

L'As et le Ba, quant à eux contribuent le plus à l'axe 2 (Figure 55) et présentent une bonne corrélation. Les concentrations les plus élevées se trouvent dans le forage du village de Kokorou (point 32, Figure 7) et ceux des villages environnants (Doumba, 458 µg/L et Guériel, 443 µg/L), à proximité du site d'orpaillage de Komabangou (point 11, Figure 7). Ces forages sont caractérisés par une concentration élevée en bicarbonate avec des concentrations faibles en ions sulfate. Le résultat de la MEB et de ICP-MS de l'échantillon de roche du pluton de Torodi, au contact de la ceinture de roches vertes, montre des quantités importantes de barytine (BaSO₄). La libération de ce dernier dans les eaux souterraines est probablement liée au rabattement de la nappe favorisant sa dissolution à partir des roches existantes. Les concentrations élevées en Ba sont généralement associées à de très faibles concentrations de SO₄⁻ résultant de la réduction de sulfate, suggérant un contrôle de la solubilité du Ba par précipitation de barytine (BaSO₄) (Bondu *et al.*, 2020).

Les puits et forages dans le Liptako nigérien ont des faibles concentrations en bore. Le résultat de ICP-MS des échantillons de roche confirme les faibles concentrations en bore des roches du Liptako nigérien. Les forages qui présentent des concentrations élevées en bore dans la zone d'étude sont ceux de Kolloy Bossey (point 07) et de Simiri (point 18) situés dans le Continental terminal (Figure 7). La présence du bore dans l'aquifère Ct² semble être d'origine naturelle puisque l'aquifère se trouve à une profondeur de plus de 100 m et dans une zone dépourvue d'activité anthropique. Par contre, son origine pourrait être anthropique dans l'aquifère du Ct³ du fait des activités agricoles pratiquées le long du Kori de Ouallam.

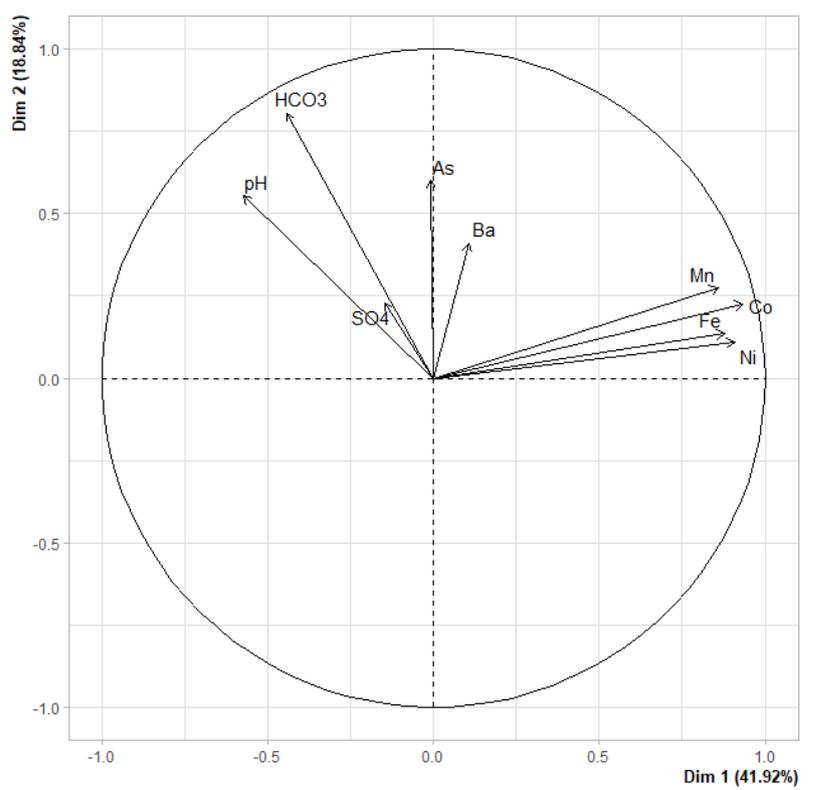


Figure 56 : Projection des caractéristiques physico-chimiques et des concentrations en éléments traces métalliques des eaux souterraines sur le plan factoriel F1-F2.

4.2.2.2 Facteurs de variabilité des teneurs anormales d'arsenic dans les eaux souterraines

Tous les points d'eau qui présentent de fortes concentrations en As captent l'aquifère des altérites des schistes de la ceinture de roches vertes de la *Sirba*, renfermant des minéralisations aurifères. Les puits du site, à concentrations anormales d'As, se trouvent dans les zones d'orpaillage en exploitation depuis les années 1980. Cela montre qu'il existe une relation étroite entre les

concentrations élevées en arsenic mises en évidence dans les eaux souterraines et la minéralisation aurifère. Le résultat de l'analyse minéralogique des roches exploitées dans l'orpaillage au Niger montre qu'elles sont très riches en minéraux sulfurés, constitués principalement de la pyrite et la chalcopryrite, suivies de la sphalérite. En général, la pyrite peut contenir des quantités importantes d'arsenic jusqu'à 2,6 à 2,7 % (Zotov *et al.*, 1972 ; Boyle and Jonasson, 1973 ; Savage *et al.*, 2000). Certains travaux ont mis en évidence la présence de pyrite et d'arsénopyrite dans la ceinture des roches vertes du socle birrimien (eg. Milési *et al.* 1989, 1992 ; Bourges *et al.* 1998 ; Smedley *et al.* 2007 ; Béziat *et al.* 2008 ; Sangaré *et al.* 2014). Les travaux de Bondu *et al.*, (2017) suggèrent que la minéralisation des sources primaires d'arsenic pourrait avoir un impact significatif sur les concentrations en arsenic dans des zones où l'oxydation des sulfures constitue un mécanisme important de mobilisation. Toutefois, les analyses MEB-EDS réalisées au cours de la présente étude n'ont pas permis de mettre en évidence des teneurs anormales d'arsenic associées aux sulfures dans les roches analysées.

Aucun forage ou puits des nappes discontinues des aquifères discontinus de socle ou des nappes alluviales ne présente de concentration élevée en arsenic dans la zone d'étude.

La matrice de corrélation montre que l'arsenic est faiblement corrélé avec le sulfate. Les concentrations élevées en As apparaissent fortement associées au bicarbonate et au pH qui contribuent fortement à la construction de l'axe 1 (Figure 55).

Les travaux de Smedley (1996) et Smedley *et al.* (2007) ont mis en évidence des concentrations en As allant jusqu'à 141 µg/L au nord du Ghana et jusqu'à 1630 µg/L au Burkina dans les eaux souterraines des zones affectées par les minéralisations sulfurées des roches birrimiennes. Smedley *et al.* (2007) suggèrent que les minéraux sulfurés primaires et/ou les oxydes métalliques secondaires des zones minéralisées sont les sources les plus probables de l'As dans les eaux souterraines. Les teneurs élevées en As mises en évidence dans les eaux souterraines du Liptako nigérien semblent donc être liées à la composition minéralogique des roches volcano-sédimentaires du birimien, riches en minéralisation aurifère et en minéraux sulfurés. La relation entre As, pH et bicarbonate suggère l'occurrence d'un processus de désorption à pH élevé et la compétition entre le bicarbonate et l'arséniate au sein de l'aquifère (Smedley and Kinniburgh, 2002). Le résultat d'analyse de la spéciation a montré que l'arsenic présent dans les forages du Liptako nigérien est composé majoritairement de l'As V, tout comme dans les eaux souterraines du Sud-Ouest de Ouagadougou au Burkina (Smedley *et al.* 2007). L'arsenic sous forme d'arséniate AsV est anionique et donc sensible aux processus de sorption/désorption à la surface

des oxydes de fer dont la charge de surface dépend du pH. L'arséniate est désorbé à pH alcalin. Globalement, la libération de l'arsenic dans les aquifères des altérites de la ceinture des roches vertes du Liptako nigérien pourrait donc être contrôlée par le processus de désorption de l'arséniate de la surface des oxydes de fer et de manganèse dans des conditions oxydantes. Si les oxydes de fer secondaires sont les principales sources de l'arsenic dans les eaux souterraines, il est possible que les sulfates libérés pendant l'oxydation initiale des sulfures aient été évacués de l'aquifère depuis longtemps (Smedley *et al.*, 2007). Il est aussi à noter que le manganèse peut également jouer un rôle dans l'oxydation et la séquestration de l'arsenic dans les altérites en conditions oxydantes (Boyle *et al.*, 1998 ; Yang *et al.*, 2015). Plusieurs travaux ont mis en évidence le rôle de l'oxyde de Mn dans le contrôle de la concentration d'As dans les eaux souterraines (Oscarson *et al.*, 1981 et 1983 ; Moore *et al.*, 1990 ; Korte et Fernando ,1991 ; Scott et Morgan, 1995 ; Nesbitt *et al.*, 1997).

Le puits de Mbanga (point 01) est caractérisé par de faibles concentrations en fer (0.8 µg/L) et en manganèse (1,55 µg/L), un pH voisin de la neutralité (pH=7,5) et des proportions élevées d'As (V) (202 µg/L). Des concentrations similaires à celles de ce puits ont été mises en évidence dans certains forages dans le Nord du Ghana (Smedley, 1996) et dans le Liptako du Burkina Faso (Smedley *et al.*, 2007 ; Bretzler *et al.*, 2017). Sur le site d'orpaillage de Boulounjounga (point 17) situé à la frontière entre le Burkina Faso et le Niger (Figure 1), la concentration en As du puits est de 189 µg/L et celle de Mn de 956 µg/L (norme OMS de 400 µg/L et norme française de 50 µg/L). Ce puits est proche d'un gisement de Manganèse mis en évidence par le Plan Minéral de la République du Niger ; à environ 150 km de la mine de Tambao exploitant du Mn dans la région du Sahel au Burkina Faso. Il est caractérisé par de faibles concentrations en sulfate et en fer, une forte concentration en Mn dissous, un pH proche de la neutralité et des proportions élevées d'As (V).

Les concentrations en arsenic des eaux des forages des villages de Tchetchirey (point 28) et Arotondo (point 42) sont respectivement de 15,52 et 15,76 µg/L. Les eaux de ces forages présentent de faibles concentrations en fer (<2,5 µg/L), en manganèse (<0.2 µg/L) et en sulfate (4,5 et 71,16 mg/L) avec des pH proches de la neutralité. Ces puits sont exploités par une population d'environ 500 habitants.

Les deux puits à concentrations élevées en arsenic se trouvent sur des sites d'orpaillage en exploitation depuis les années 1980 avec de nombreux puits atteignant la nappe. L'exploitation de cet or crée une aération accrue de l'aquifère sur toute la zone minéralisée due au rabattement de la

nappe lors du dénoyage principalement au moment des exploitations en saison sèche. De plus, les conditions hydrologiques aléatoires dans le Sahel, dues au contexte de changement climatique avec plusieurs périodes de sécheresses peuvent accentuer le rabattement de la nappe et, dans certains cas, la baisse des niveaux piézométriques. Cette baisse va créer : (i) un déséquilibre chimique, (ii) accélérer l'oxydation des minéraux sulfurés présents et (iii) favoriser ainsi la libération et la mobilité de l'arsenic dans le Liptako nigérien. Les concentrations en arsenic dans l'eau sont ensuite probablement contrôlées par les processus de sorption à la surface des oxydes de fer et de manganèse, la libération d'arséniate étant favorisée par les concentrations élevées en hydrogénocarbonates. Bonnemaïson (2005) note que le processus prend un certain temps et que la contamination ne sera effective que quelques temps (mois ou années) après le début du pompage. Compte-tenu du développement de l'exploitation artisanale de l'or dans la région, la mise en place d'un suivi à long terme des niveaux d'arsenic et de métaux traces dans les forages des zones aurifères utilisés pour l'alimentation des populations s'avère essentielle.

4.2.2.3 Facteurs de variabilité des concentrations en métaux et métalloïdes dans les rivières

4.2.2.3.1 Concentration en éléments traces métalliques dans les eaux de surface

Les concentrations en arsenic dissous mesurées dans la rivière *Sirba* sont supérieures à celles mesurées dans les rivières *Dargol* et *Goroubi* (Tableau 13), avec des valeurs moyennes de $1,5 \pm 0,9$ $\mu\text{g/L}$, $0,3 \pm 0,2$ $\mu\text{g/L}$ et $0,16 \pm 0,04$ $\mu\text{g/L}$, respectivement. La concentration en arsenic dissous augmente d'amont en aval dans la rivière *Sirba* entre les stations 5 et 3, correspondant à une zone d'orpaillage, puis la concentration rediminue. Cette augmentation est corrélée à une augmentation de la conductivité (Figure 56) ; celle-ci correspond à des eaux faiblement à moyennement minéralisées.

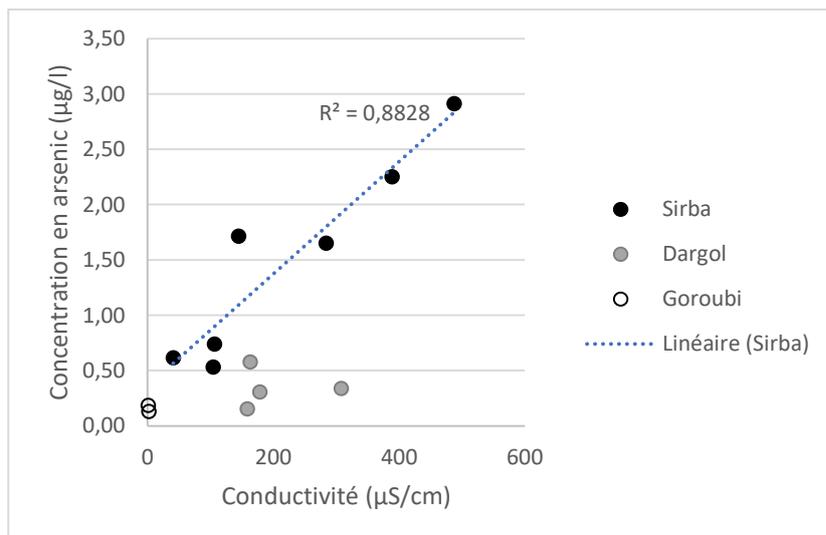


Figure 57 : Concentration en arsenic en fonction de la conductivité dans les eaux de surface des rivières Sirba, Dargol et Goroubi.

L'espèce réduite arsenite As (III) est présente dans cinq échantillons de la rivière *Sirba*. Dans la rivière *Dargol*, seule l'espèce oxydée arséniate a été détectée dans un échantillon. La présence de l'espèce réduite dans les conditions oxydantes de la rivière *Sirba* reflète un déséquilibre thermodynamique, lié à la cinétique d'oxydation lente de l'arsénite en arséniate. Ceci suggère que l'arsenic est mobilisé de la phase solide vers la phase liquide sous forme d'arsénite et progressivement oxydé au cours de son transport dans la rivière à une certaine distance des sources. Les processus évoqués dans la littérature (Smedley and Kinniburgh, 2002) sont d'une part l'oxydation de sulfures dans lesquels l'arsenic est sous forme réduite et d'autre part la réduction d'oxydes de fer et manganèse sur lesquels l'arsenic est adsorbé. Ces sulfures peuvent être présents dans les matières en suspension et les sédiments stockés dans le lit du cours d'eau. Ces différents processus peuvent se produire dans l'eau interstitielle des sédiments ou lors d'échanges avec la nappe.

Tableau 13 : Résultat des concentrations en arsenic des rivières Sirba, Dargol et Goroubi en µg/L

| Rivière | ID | Village | As total dissous (µg/L) | As(III) dissous (µg/L) | As(V) dissous (µg/L) | Somme des espèces arséniées (µg/L)* |
|---------|--------|---------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Sirba | Sirb 6 | Sirba Boulkagou | 0,61 | | | |
| | Sirb 7 | Sirba à SML | 0,53 | | | |
| | Sirb 5 | Village Touré | 1,65 | 0,74 | <0,02 | 0,74 |
| | Sirb 4 | Village Guidaré | 2,25 | 0,68 | <0,02 | 0,68 |
| | Sirb 3 | Village Larba Birno | 2,91 | 0,71 | 0,30 | 1,01 |

| | | | | | | |
|---------|--------|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|-------|
| | Sirb 2 | Village Tallé | 1,72 | 1,11 | <0,02 | 1,11 |
| | Sirb 1 | Sirb 1 | 0,74 | 0,73 | <0,02 | 0,73 |
| Dargol | Darg A | Village Kakassi | 0,34 | <0,02 | <0,02 | <0,02 |
| | Darg B | Village Dartchandé | 0,15 | <0,02 | Présence de traces (<0,22µg/L) | <0,22 |
| | Darg 6 | Abreuvement des animaux | 0,31 | <0,02 | <0,02 | <0,02 |
| | Darg 7 | Barrage de Tera | 0,58 | Présence de traces (<0,21µg/L) | 0,33 | 0,33 |
| Goroubi | Goro1 | Goroubi | 0,19 | | | |
| | Goro2 | Kobadgé - Tigbaré | 0,13 | | | |

La différence entre la somme des espèces arsénite et arséniate et l'arsenic total dissous indique un taux de récupération incomplet des espèces arséniées lors de l'analyse due à une altération de l'échantillon lors du transport ou du stockage. Les concentrations en arsénite mesurées représentent donc des valeurs minimales. Les concentrations en arséniate peuvent être surestimées. Aucune espèce méthyliée n'a été détectée dans les échantillons.

4.2.2.3.2 Facteur d'enrichissement en éléments traces métalliques dans les rivières

Les concentrations en éléments traces de la matière en suspension et de sédiments des rivières *Sirba* et *Dargol* ont été utilisées pour calculer les facteurs d'enrichissement de la façon suivante :

$$F = \frac{\left(\frac{[M]}{[Al]}\right) \text{ échantillon}}{\left(\frac{[M]}{[Al]}\right) \text{ croûte}}$$

Où $\left(\frac{[M]}{[Al]}\right)$ échantillon représente le rapport de la concentration de l'élément à celle de l'aluminium dans l'échantillon et

$\left(\frac{[M]}{[Al]}\right)$ croûte représente le rapport de la concentration de l'élément à celle de l'aluminium dans la croûte terrestre de surface.

Pour les matières en suspension

La figure 57 ci-dessous présente les facteurs d'enrichissement dans les MES.

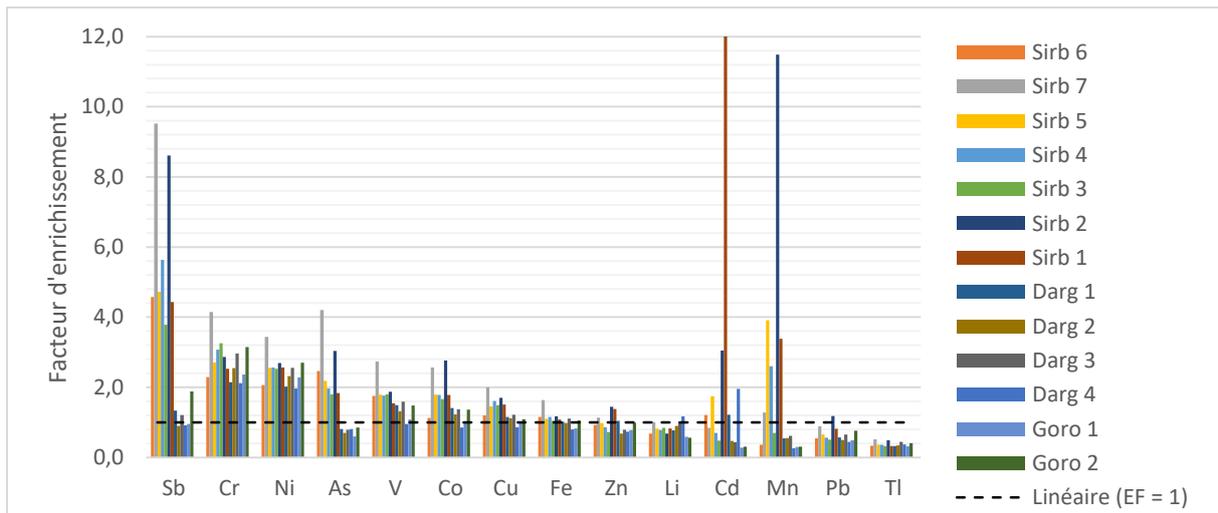


Figure 58 : Résultat en facteur d'enrichissement dans les MES.

Selon le résultat obtenu, le chrome, le nickel, le vanadium et le cobalt sont enrichis dans les MES des rivières de la zone d'étude par rapport à la composition moyenne de la croûte terrestre de surface (Figure 57). L'antimoine et l'arsenic sont enrichis dans les MES de la *Sirba* mais pas dans les MES des rivières *Dargol* et *Goroubi*, comme observé également pour la phase dissoute. Le cadmium et le manganèse sont enrichis localement dans les MES de la *Sirba*.

Pour les sédiments

La figure 58 ci-dessous présente les facteurs d'enrichissement dans les sédiments.

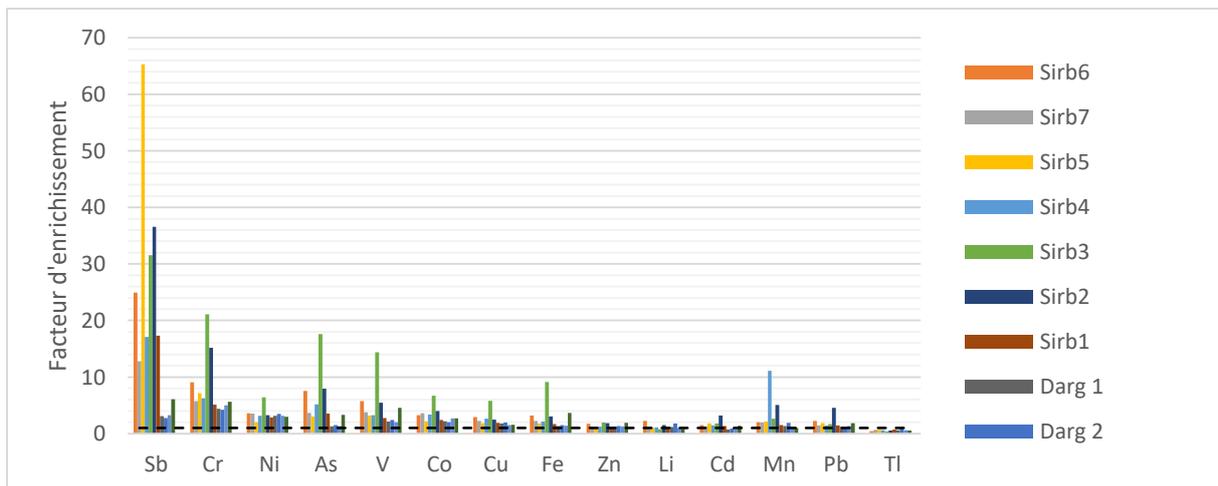


Figure 59 : Résultat en facteur d'enrichissement dans les sédiments.

Les facteurs d'enrichissement les plus élevés dans les sédiments des rivières de la zone d'étude sont ceux de l'antimoine, du chrome, de l'arsenic, du vanadium, du nickel et du cobalt. Comme pour les MES, l'arsenic et l'antimoine présentent des facteurs d'enrichissement plus élevés dans la *Sirba* que dans les deux autres rivières. Sur la *Sirba*, la station Sirb 5 présente un facteur

d'enrichissement deux fois plus élevé que les autres stations. Cette station est située en aval de la zone minière.

Parmi les métaux et les métalloïdes analysés dans les sédiments, un regard particulier a été accordé aux éléments chimiques comme le cadmium, le chrome, le cuivre, le nickel, le plomb et le zinc qui font partie des éléments métalliques énumérés dans la Directive-cadre sur l'eau pour la surveillance de la qualité des environnements aquatiques à l'échelle des bassins versants. Les concentrations en métaux et en métalloïdes dans les sédiments ont été comparées aux sédiments prélevés au site Sirba 7 où aucune activité anthropique n'est recensée, constituant le bruit de fond géochimique.

4.2.2.3.3 Facteurs de variabilité des concentrations

Les concentrations en éléments traces dissous et particulaires dans les eaux de rivière dépendent du lessivage physique et chimique des roches et des sols du bassin versant. Les éléments peuvent être échangés entre la colonne d'eau et le sédiment selon les conditions physico-chimiques et hydrologiques. En fonction de la lithologie, certains éléments traces peuvent être enrichis dans les eaux et les sédiments des rivières. Sur la zone d'étude, les concentrations en éléments traces dans les phases dissoutes, particulaires et les sédiments sont généralement faibles, à l'exception du cadmium. Certains éléments sont enrichis dans les MES et sédiments par rapport à la composition moyenne de la croûte supérieure mais les facteurs d'enrichissement restent modérés. Les facteurs d'enrichissement de l'antimoine sont remarquables mais les valeurs sont très dépendantes de la valeur moyenne de la croûte utilisée, 0,2 µg/g (Taylor and McLennan (1985), bien inférieure à celle proposée par d'autres auteurs (2,5 µg/g, Martin and Meybeck, 1979 ; 1,4 µg/g, Savenko, 2006). L'arsenic est plus enrichi dans la rivière *Sirba* que dans le *Dargol* et le *Goroubi*. Toutefois, les concentrations dans la phase dissoute restent inférieures à la limite de qualité pour les eaux de consommation recommandée par l'OMS de 10 µg/L.

L'étude de la variabilité géochimique à partir de l'ACP montre une bonne corrélation entre l'As, le Sb et le Fe d'une part et l'Al, le Mn, le Co et le Ni d'autre part (Figure 59). Les concentrations en As, Sb et Fe concernent la rivière *Sirba*, celles d'Al, Mn et Ni sont plus dominantes au niveau de la rivière *Dargol*. Les sites de la rivière *Goroubi* présentent des concentrations moindres. La présence des minéraux ferromagnésiens à des concentrations élevées associés aux éléments traces sur l'axe principal (Dim 1 : 58.21%) suggère un apport détritique terrigène provenant de l'érosion des roches du Liptako nigérien. Les analyses chimiques des roches confirment également la

présence naturelle de ces minéraux. L'existence des minéraux ferromagnésiens et alumino-siliceux d'origine naturelle en association avec les métaux et métalloïdes dans les sédiments permet d'envisager une source naturelle dans les rivières, en lien avec la géologie du Liptako nigérien. L'augmentation des concentrations en As en aval de la zone minière sur la *Sirba* montre que l'extraction de l'or dans la rivière *Sirba* a un impact non négligeable.

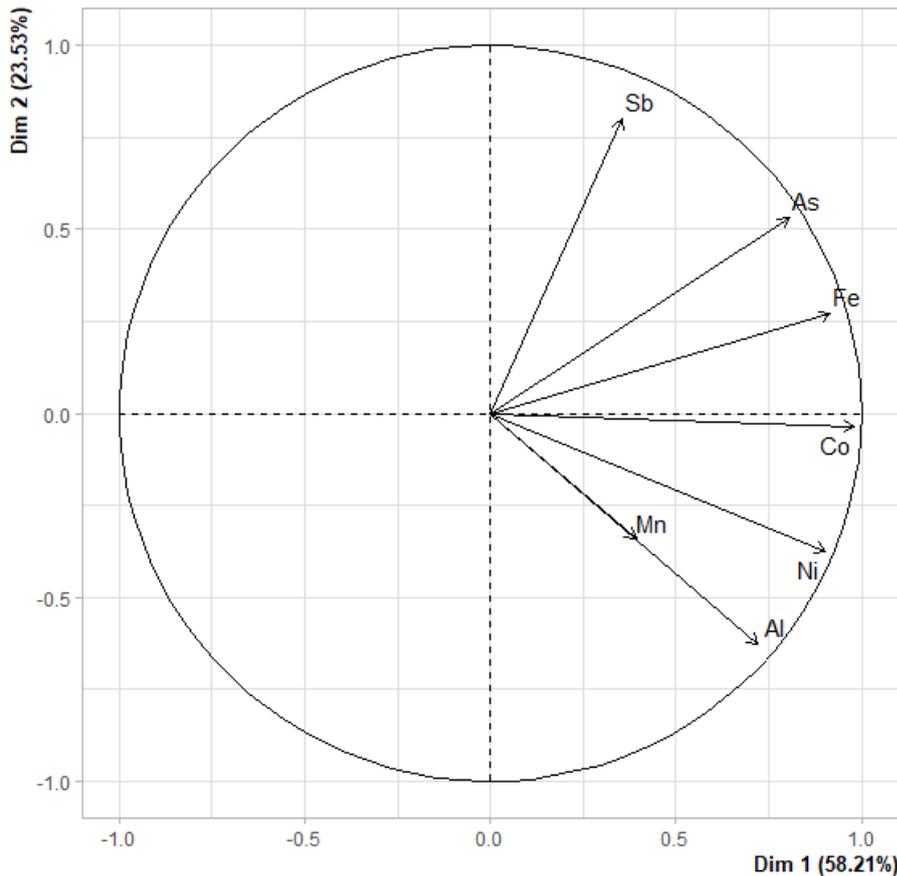


Figure 60 : Projection des caractéristiques physico-chimiques et des concentrations en éléments traces métalliques des eaux des rivières sur le plan factoriel F1-F2.

Les métaux et métalloïdes présentant des concentrations relativement élevées dans les MES sont Al, Mn, Fe, Cr, Co, Cd, Ni et As. Les échantillons ont été collectés en début et à la fin de la saison des pluies et l'augmentation des teneurs des oxyhydroxydes de fer, suite à la diminution des débits des rivières, pourrait participer au surcroît des éléments dans les MES et leur adsorption sur les particules (Holmstrom et *al.*, 2000 ; Salvarredy, 2008). La quantité de MES récupérée et analysée dépend des rivières et des périodes d'échantillonnage. Les MES sont plus importantes en début et à la fin de la saison des pluies.

Les concentrations en arsenic plus élevées dans les eaux, MES et sédiments de la rivière *Sirba* pourraient s'expliquer par un développement plus important des activités d'orpaillage que sur les rivières *Dargol* et le *Goroubi*.

4.2.3 Risque d'exposition à l'arsenic et aux autres éléments traces des ressources en eau

4.2.3.1 Risques d'exposition à l'arsenic

Parmi les quarante-trois échantillons d'eau souterraine, 80% ont des concentrations inférieures à 1 µg/L et quatre présentent des valeurs dépassant la valeur guide de l'OMS dont deux puits sur des anciens sites d'orpaillage et deux forages à proximité du grand site d'orpaillage de Komabangou. Sur ce dernier site, des travaux ont mis en évidence la présence de concentrations élevées en As dans le sol, les eaux et les plantes de la zone aurifère (Ibrahim *et al.*, 2019, Tankari *et al.*, 2014, Tankari *et al.*, 2019). Dans les deux puits des sites de Nbanga et Boulounjounga, qui présentent des concentrations en As de 202.72 µg/L et 189.74 µg/L respectivement, l'aquifère est constitué d'altérites de schistes appartenant à la ceinture de-roches vertes de la *Sirba*, très riches en or.

A grande échelle, l'exploitation artisanale de l'or se développe dans la zone du Liptako Gourma avec de nouvelles découvertes. Plusieurs minéralisations en or dans les veines de quartz restent non exploitées. A la découverte de nouveaux gisements, les orpailleurs creusent à des profondeurs atteignant les nappes phréatiques lors de l'extraction dans les zones minéralisées en or, ce qui peut conduire au dénoyage des puits. L'approvisionnement en eau de consommation de la population environnante se fait souvent à partir de ces puits au moment du dénoyage. La consommation de cette eau constitue un risque potentiel pour les orpailleurs et pour la population environnante.

L'exploitation à la battée est pratiquée le long de toutes les rivières, notamment la *Sirba* qui est exploitée depuis le Burkina Faso. L'étude des critères de prévention de la contamination à l'arsenic a donné une valeur limite de l'arsenic dans la rivière. L'intensification de l'extraction peut donc avoir des conséquences sur le milieu aquatique et aussi sur l'usage de la rivière par la population environnante.

En dehors des puits et des forages des anciens sites d'orpaillage examinés lors de cette étude, il est possible de trouver des concentrations élevées d'As dans les eaux souterraines du Liptako nigérien, à une échelle plus grande, dans les zones d'activité minière industrielle et artisanale où l'oxydation des minéraux sulfurés peut se produire. Selon la répartition des échantillons prélevés

lors de cette étude, on peut noter une variabilité spatiale des concentrations d'As dans les eaux souterraines du Liptako nigérien. Il est donc difficile, voire impossible, de prédire de manière sûre, la concentration probable en As dans un puits particulier à partir des résultats des puits voisins. Cela montre la nécessité d'élaborer une campagne d'échantillonnage sur tous les anciens sites d'orpaillage de la zone actuellement inaccessible à cause de l'insécurité. Les échantillons prélevés sur les nouveaux sites d'orpailleurs, lors de cette étude montrent des faibles concentrations en arsenic.

4.2.3.2 Risques d'exposition aux autres métaux traces des ressources en eaux

Les puits et les forages à concentrations élevées Mn se situent dans des zones à forte densité humaine, à l'exception du puits d'orpaillage de Boulounjounga et du site des réfugiés de Mangaizé. Sa teneur est 10 fois supérieure à la normale dans les eaux de boissons de certains villages comme celui de Kiota Oumarou, de Baylandé et Sassage ainsi que du Centre National de Participation (CNP), et constitue une préoccupation majeure pour la santé publique des habitants. Elle peut causer des nuisances d'ordre organoleptique (goût métallique) et esthétique (couleur noire). Au Burkina, des concentrations élevées en fer, manganèse et thallium ont été mises en évidence dans les forages et les puits de de Yamtenga (AbdoulKadri *et al.* 2015).

Les contaminations naturelles en baryum dans les forages concernent le village de Kokoro avec une concentration maximale de 1 344,26 µg/L. Des valeurs toxicologiques de référence du Ba ont été proposées avec une valeur guide de 700 µg Ba/l par l'OMS (2004) et 1 000 µg/L comme concentration maximale admissible par Santé Canada (1990). Des travaux ont montré que l'exposition au Baryum peut augmenter la pression artérielle chez les hommes et les animaux, avec des conséquences cardiovasculaires (Roza & Berman, 1971, Brenniman *et al.*, 1979, 1981, 1985). Sa Valeur Toxicologique de référence (VTR) chronique est de 02 mg/kg p.c./j (afssa 2007). Les concentrations en Ba mises en évidence constituent ainsi des risques sanitaires pour les habitants du village de Kokoro.

Les concentrations élevées en nitrate ont été mises en évidence dans les villages présentant parfois un seul point d'approvisionnement en eau potable. Le nitrate est toxique quand il se transforme en nitrites et composés nitrosés (nitrosamines et nitrosamides) et peut provoquer des troubles chez les adultes, les nourrissons de 3 mois ou les femmes enceintes (Jalal *et al.* 1999). La Directive OMS 2017 a mis en évidence la possibilité pour des populations sensibles et pour les nouveau-nés nourris au biberon, de faire face à la méthémoglobinémie et aux effets thyroïdiens. La

consommation des eaux à concentrations élevées en nitrate de la zone d'étude constitue donc un risque majeur d'exposition des femmes enceintes et des nourrissons des zones concernées.

Les concentrations en fluor supérieures à la valeur guide concernent les points d'approvisionnement en eau des villages se situant dans la zone du Dallol Maouri. Il faut savoir que le Niger a connu déjà une contamination massive au fluor où des anomalies cliniques et radiologiques ont été observées sur 104 enfants exposés à l'intoxication par le fluor dans la commune de Tibiri (Seidou *et al.* 2012). La Directive OMS 2017 a mis en évidence des preuves épidémiologiques sur le risque accru de fluorose dentaire ou fluorose squelettique suite à la consommation d'une eau à concentration élevée en fluor. De ce fait, les villages concernés et même toute la zone du Dallol Maouri, sont exposés aux risques des anomalies cliniques et radiologiques.

4.2.4 Évaluation des risques d'exposition humaine à l'arsenic

4.2.4.1 Exposition humaine à l'arsenic par la consommation d'une eau contaminée

En Afrique et principalement dans le Liptako Gourma, peu d'études ont fait ressortir les relations entre les problèmes de santé humaine et les concentrations élevées en arsenic dans les eaux de boisson. La majorité des études réalisées ont beaucoup plus porté sur sa caractérisation et sa quantification (Dompé *et al.* 2015). Les quelques études réalisées dans le Liptako Gourma, au Burkina et au Mali, ont permis d'évaluer les risques toxicologiques de l'arsenic dans l'eau potable suite à une exposition chronique à partir des analyses des échantillons d'eau, de nourriture et d'urine des habitants vivant dans les zones d'exploitation aurifère. Les maladies mises en évidence sont constituées de lésions cutanées notamment l'hyperpigmentation et la kératose et des cas cliniques de cancers (Nzihou *et al.*, 2013 ; Somé *et al.*, 2012).

La consommation des eaux à teneur élevée d'arsenic présente des risques sanitaires importants pour les consommateurs. Une intoxication aiguë par ingestion à l'arsenic provoque des atteintes sévères digestives, des troubles neurologiques, des lésions hépatiques et rénales. Une intoxication à long terme quant à elle entraîne des effets dermatologiques (lésions cutanées), respiratoires, neurologiques, cardiovasculaires (hypertension artérielle, cardiomyopathie), hépatiques et rénaux (Proust and Picot, 2000). L'exposition chronique à l'arsenic exposerait aux risques d'avortement spontané, de mort fœtale, d'accouchement prématuré (Ahmad, 2001).

Exposition humain liée à l'arsenic dans le Liptako nigérien

Actuellement, il n'existe pas d'études sur la santé publique dans le Liptako nigérien pour déterminer le lien entre la consommation d'une eau contaminée par les éléments traces et les maladies observées sur les sites d'orpaillage. Pourtant, la présence de concentrations élevées en arsenic dans les puits et les forages destinés à la consommation humaine constitue un risque d'exposition et une préoccupation majeure pour la santé des consommateurs. Les maladies les plus fréquentes inventoriées dans les zones d'orpaillage dans le Liptako nigérien sont représentées par les maladies respiratoires et dermatologiques (Rapport santé CSI de Komabangou, 2018), très proches des signes d'arsénicisme.

Evaluation des risques d'expositions à l'arsenic

L'évaluation d'exposition humaine liée à l'arsenic concerne les 4 forages qui ont des concentrations en arsenic supérieures à la valeur guide de 10 µg/L (OMS, 2017). D'après les informations obtenues lors des missions de terrain et les données du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGP/H, 2012), le nombre d'habitants de la zone d'étude qui consomment les eaux de ces puits et forages serait de 12 000 habitants. Sur le site de Bouloundjounga, les villageoises ont actuellement arrêté de consommer les eaux du puits à cause d'une mauvaise odeur et s'approvisionnent en eau d'un autre puits proche du site.

Pour apprécier cette évaluation d'exposition à l'arsenic, le quotient de danger, le risque de cancer et les doses journalières d'exposition ont été calculés.

Les hypothèses de calcul sont présentées dans le tableau ci-dessous (tableau 14).

Tableau 14 : Hypothèses du calcul d'évaluation de risque d'exposition à l'arsenic par voie orale.

| | |
|--|--|
| Concentration en arsenic dans l'eau souterraine brute (Ceau) | Ceau (en mg /L) |
| Consommation journalière moyenne en eau (Taux d'Exposition - TEeau) | 1,5 L/jour |
| Fréquence d'exposition (FE) | 365 jours (1 an) |
| Durée d'exposition du point d'eau (DE) | Entre 2016 et 2022, donc 8 ans ont été considéré comme l'exposition moyenne (âge du puits) |
| Durée de vie moyenne au Niger (AT) | 22630 jours (62 ans) (PNUD, 2020) |
| Poids corporel (PC) : | On considère un poids adulte typique de 60 kg et 28 kg pour les enfants de 0 à 15 ans |
| Dose Journalière admise Référence (dose journalière maximale tolérable d'arsenic) (Ineris, 2006) | 3×10^{-4} mg/kg-jour |
| Facteur de pente cancérigène par voie orale (Ineris, 2006) | 1,5 mg/kg-jour |

Calcul du quotient de danger (QD) et de la dose journalière

Le risque de toxicité à l'arsenic pour une exposition non cancérigène est calculé sous la forme d'un quotient de danger (QD), selon la formule $QD = DJE/DJA$.

L'évaluation des risques sanitaires liés à la consommation d'une eau riche en arsenic aboutit au calcul de la dose journalière d'exposition (DJE), selon la formule : $DJE = (C_{eau} * T_{eau} * FE * DE) / (DVM/PC)$.

Avec

DJE : Dose Journalière d'Exposition (mg/kg/jour)

DJA : Dose Journalière Admise Référence (mg/kg/jour)

DVM : Durée de Vie Moyenne au Niger

PC : Poids corporel

Si $QD < 1$, la survenue d'un effet toxique est très peu probable ;

Si $QD > 1$, l'apparition d'un effet toxique ne peut pas être exclue.

La consommation journalière moyenne en eau contaminée, par un enfant sera considérée comme égale à celle d'un adulte. Le poids corporel moyen d'un adulte dans les zones rurales du Liptako nigérien est de 60 kg et celui des enfants de 0 à 15 ans est de 28 kg.

Calcul sur le risque de cancer lié à l'arsenic

Le risque cancérigène est la probabilité d'apparition d'un cancer, suite à une exposition liée à la consommation d'une eau contaminée à l'arsenic. Il a été calculé selon le modèle d'évaluation des risques pour la santé, déduit de l'étude de l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis, Integrated Risk Information System (IRIS) (USEPA, 1998).

Il est calculé à l'aide de la formule suivante : $R = - \exp(-(PF * DJE))$

Avec PF : facteur de pente cancérigène de l'arsenic, par voie orale.

Résultats obtenus

Les résultats des différents calculs d'exposition des 4 puits et des forages sont présentés dans le tableau ci-dessous (tableau 15).

Tableau 15 : Résultat des calculs d'exposition.

| Sites | QD | R (mg/kg/j) | DJE adulte (mg/kg/j) | DJE enfant (mg/kg/j) |
|----------------|------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Mbanga | 2,15 | $9,80 \times 10^{-4}$ | $6,54 \times 10^{-4}$ | $1,40 \times 10^{-3}$ |
| Bouloundjounga | 2,01 | $9,18 \times 10^{-4}$ | $6,13 \times 10^{-4}$ | $1,31 \times 10^{-3}$ |

| | | | | |
|-------------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Tchetchirey | 0,16 | $7,51 \times 10^{-5}$ | $5,01 \times 10^{-5}$ | $1,07 \times 10^{-4}$ |
| Arotondo | 0,17 | $7,63 \times 10^{-5}$ | $5,08 \times 10^{-5}$ | $1,09 \times 10^{-4}$ |

4.2.4.2 Evaluation du risque sanitaire liée à la consommation d'une eau contaminée en arsenic

La valeur guide de l'OMS de 10 µg/L est une valeur de gestion et le calcul de risques d'exposition sanitaire permet de déterminer une valeur de protection contre les effets néfastes, notamment des orpailleurs et les habitants des villages environnants qui consomment les eaux souterraines avec des concentrations élevées en arsenic. Le résultat du calcul du quotient de danger (QD) montre que l'apparition d'un effet toxique des habitants des sites de Mbanga (QD = 2,15) et Bouloundjounga (QD = 2,01) ne peut pas être exclue et une probabilité d'apparition d'un cancer des personnes exposées pour ces mêmes sites. Cela montre que les habitants de ces deux villages peuvent souffrir d'impacts toxiques négatifs par rapport aux autres sites de la zone d'étude. Aussi, les doses journalières d'exposition les plus élevées pour les adultes sont celles des sites de Mbanga ($6,54 \times 10^{-4}$ mg/kg/j) et Bouloundjounga ($6,13 \times 10^{-4}$ mg/kg/j).

Selon le rapport de INERIS (2006), la Valeur Toxicologique de Référence (VTR) retenue pour une exposition chronique par voie orale à l'arsenic est de 3×10^{-4} mg/kg/j.

Le tableau 16 ci-dessous indique les VTR des différents organismes.

Tableau 16 : Les différentes Valeur Toxicologique de Référence (VTR).

| Organismes | OMS | US EPA (RIS) | ATSDR | Santé Canada | OEHHA |
|-------------|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| TVR à seuil | ND* | 3×10^{-4} mg/kg/j (1993) | 3×10^{-4} mg/kg/j (2005) | ND* | 3×10^{-4} mg/kg/j (2005) |

* Non disponible

Selon les études sur l'évaluation des risques pour la santé humaine à travers une exposition orale, les maladies des « pieds noirs » apparaissent à partir d'une dose sans effet toxique observable de 8×10^{-4} mg/kg/j pour les valeurs toxicologiques avec effets, non cancérigènes et la VTR avec les effets cancérigènes est fixée à $1,5 \times 10^{-3}$ µg/kg/j (Tseng, 1977 ; Tseng et al. 1968 ; US EPA, 1993). Les valeurs obtenues sont légèrement supérieures à la dose journalière maximale tolérable d'arsenic qui est de 3×10^{-4} mg/kg-jour. Ce qui permet de supposer la possibilité d'un lien entre les maladies dermatologiques observées et la consommation d'une eau riche en arsenic. Des études épidémiologiques détaillées sont donc nécessaires pour vérifier le lien entre ces maladies et les expositions à l'arsenic dans les villages de Nbanga et de Bouloundjounga.

Pour l'instant, la survenue d'un effet toxique est très peu probable au niveau des sites de Tchetchirey et Arotondo (Figure 7) avec des quotients de danger de 0,16 et 0,17 respectivement.

4.2.5 Origine de la contamination des eaux par les pesticides

4.2.5.1 Analyse des résultats sur l'utilisation des pesticides et les pratiques agricoles

Au Niger, il n'existe pas de base de données sur la gestion des pesticides, notamment l'exportation et la consommation. La porosité des frontières facilite la vente frauduleuse des produits toxiques. Le résultat des enquêtes réalisées a montré que 95% des producteurs sont des hommes analphabètes et 60% ont notifié avoir reçu un encadrement sur l'utilisation des pesticides sans danger. La superficie cultivée en irrigation de la zone enquêtée représente environ 390 ha et celle des sites maraichers est d'environ 10 ha. Les principales cultures inventoriées sur le site maraicher sont constituées de la tomate, de la salade, du chou, du poivron, de la carotte, de la courgette, du persil, du céleri et de la laitue, pratiquées principalement pendant la saison sèche.

Les pesticides sont utilisés dans ces zones de cultures par tous les producteurs de tout âge, et selon les périodes et les types de culture, en vue d'améliorer le rendement, en luttant efficacement contre les ravageurs tels que : chenilles, termites, sauterelles, grillons, criquets, vers et mauvaises herbes. Soixante-dix pour cent (70%) des pesticides utilisés ne sont pas homologués par le Comité Inter-états pour la lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) et certains sont interdits sur le territoire nigérien. Malheureusement, ces produits sont vendus dans des flacons de ¼ litre au niveau des marchés de Liboré et de Saga, à proximité des sites. Soixante pour cent (60%) des producteurs affirment avoir reçu un encadrement sur la dangerosité de certains pesticides sur la santé humaine, comme le cas du Daksh qui « pique » les yeux et le nez. L'efficacité de certains produits est réduite depuis quelques années. Ils sont utilisés à 3 reprises avec un intervalle de 3 jours, donc des doses deux (2) fois supérieures à celles recommandées sur les étiquettes, avec comme conséquence l'affaiblissement des feuilles, comme celle du melon. Soixante-quinze pour cent (75%) des producteurs formés ont souligné un manque de recyclage de la formation reçue, quarante pour cent (40%) des enquêtés ont fait cas de manque total de formation et seulement moins de 10% ont manifesté leur satisfaction. Le résultat de l'enquête a permis de dresser un inventaire des pesticides en vente dans la zone et a montré que les producteurs utilisent plusieurs types de produits commerciaux avec 48% de matières actives pour les insecticides, 45% pour les herbicides et 7% pour les fongicides. Les producteurs ne disposent pas de magasin approprié pour

le stockage des pesticides et sur certains sites, on retrouve aussi des emballages vides jetés dans la nature.

L'enquête a permis de comprendre que la majorité des producteurs, y compris ceux qui ont été déjà formés, ont une méconnaissance des doses à appliquer, des fréquences de traitement ainsi que les effets sur la santé et l'environnement. Ils n'arrivent pas à respecter les procédures et certains n'utilisent pas les équipements de protection individuelle lors du traitement (Le Bars *et al.*, 2015 ; Illyassou *et al.*, 2017). Plusieurs études dans des pays africains ont montré que l'utilisation des matériaux inappropriés pour le dosage des pesticides par les producteurs, majoritairement analphabètes est un facteur qui peut augmenter leur exposition (Cissé *et al.*, 2003 ; Kanda *et al.*, 2009 ; Doumbia et Kwadjo 2009 ; Ngom *et al.*, 2013, Ahouangninou *et al.* 2011 ; Ogbeide *et al.*, 2015 ; Son *et al.*, 2017 ; Norbet *et al.*, 2017 ; Lehmann *et al.*, 2017 et 2018 ; Gouda *et al.* 2018 ; Le Bars *et al.*, 2020).

Le tableau 17 ci-dessous donne la liste non exhaustive des matières actives inventoriées sur les différents sites de la zone d'étude selon le type de pesticides, le type de ravageurs et le type de culture. Parmi les trente-deux (32) composés analysés au CREER, 28% sont homologués au Niger et figurent dans la liste des pesticides homologués par le Comité Sahélien des Pesticides (CSP) (CSP INSAH 2015 ; PPAO, 2016). Sur toutes les matières actives trouvées sur la zone d'étude, 15% sont analysées au CREER par HPLC/MS, correspondant à 27% des herbicides. Ces herbicides sont fortement utilisés dans la riziculture pour contrôler les mauvaises herbes. Ils sont appliqués en double cultures dans l'année (pendant l'hivernage et pendant la saison sèche (culture de contre saison)). Les matières actives sont pour certaines homologuées au Niger, d'autres sont interdites sur le territoire nigérien par le CSP et certaines sont analysées au CREER.

Tableau 17 : Inventaire des substances actives utilisées dans l'agriculture le long du fleuve Niger à Niamey.

| Matière active | Famille de la matière active | Ravageurs cibles | Type de culture |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Herbicides | | | |
| Acétochlore ^{b,c} | Chloroacetanilide | Adventices mono et dicotyédones | Coton, maïs, arachide |
| Atrazine ^{b,c} | Chlorotriazine | Adventices annelles | Cultures céréalières |
| Dichlorure Paraquat ^b | Bypyridilium | Adventices mono et dicotyédones | Cultures maraichères et céréalières |
| Glyphosate ^a | Organophosphoré | Adventice mono et dycotylédones | Cultures maraichères et fruitières |
| Propanil ^a | Anilide | Adventices annuelles et pérennes | Riz |

| | | | |
|--|-----------------------------------|---|--|
| Butachlore | Chloroacetanilide | Adventices annuelles et pérennes | Riz et cultures maraichères |
| Bensulfirion-méthyl | Pyrimidinylsulfonylurea | Adventices annuelles et pérennes | Riz |
| Haloxypop-R Méthyl ^a | Organophosphoré | Adventice monocotylédones | Toutes cultures |
| Pendimethaline | Dinitroaniline | Mauvaises herbes annuelles | Cultures maraichères |
| Oxadiazon | Oxadiazolone | Adventices annuelles et pérennes | Riz |
| Propanil ^a | Anilide | Adventices annuelles et pérennes | Riz |
| Propanil + 2.4-D | Phénoxyacétique | Adventices annuelles et pérennes | Riz |
| Pyrazosulfuron-éthyl ^a | Pyrazole | Adventices mono et dicotylédones | Riz |
| Fongicides | | | |
| Carbenzadime ^c + mancozèbe | Carbamate + Dithiocarbamate | Anthraxnose, alternariose, mildiou, oïdium | Riz, canne à sucre |
| Chlorothalonil ^a | Organochloré | Anthraxnose, alternariose, mildiou, | Cultures maraichères |
| Insecticides | | | |
| Abamectine ^a | Avermectine | Piqueurs suceurs, chenilles, mineuses | Cultures maraichères |
| Acétamipride ^a + Indoxacarbe ^a | Néonicotinoïde + Oxidiazine | Piqueurs suceurs, chenilles, | Cultures maraichères et haricot vert |
| Acétamipride ^a + Lambda-cyhalothrine | Néonicotinoïde + pyréthri-noïde | Piqueurs suceurs, chenilles, | Cultures maraichères |
| Carbofuran ^b | Carbamate | Nématodes, chenille, piqueurs suceurs, termites | Cultures maraichères |
| Chlorpyrifos | Organophosphoré | Piqueurs suceurs, termites, Pucerons, mouches blanches, chenilles | Cultures maraichères et céréalières, Niébé, riz, maïs, sorgho, |
| Dichlorvos | Organophosphoré | Large spectre d'insectes | Toutes cultures |
| Emamectine benzoate ^a | Avermectine | Chenille | Cultures maraichères |
| Cyperméthrine ^a + diméthoate | Pyréthri-noïde et organophosphoré | Piqueurs suceurs | Cultures maraichères |
| Deltamethrine ^a | Pyréthri-noïde | Chenille, pucerons, mouches, trips, piqueurs suceurs | Cultures maraichères et riz |
| Fipronil ^b | Phénylpyrazole | Piqueurs suceurs, chenille, coléoptères | Cultures maraichères |
| Imidaclopride ^{a,c} | Néonicotinoïde | Piqueurs suceurs, punaises, chenille, termites, coléoptères | Cultures maraichères |

| | | | | | | |
|--|---|-----------------------------------|---|--|------------------------|--------------------------------|
| Lambda-cyhalothrine Diméthoate ^a | + | Pyréthriinoïde organophosphoré | + | Piqueurs pucerons, sauteriaux, coléoptères | suceurs, chenilles, | Cultures maraichères et riz |
|--|---|-----------------------------------|---|--|------------------------|--------------------------------|

4.2.5.2 Processus hydrologique et contamination

Pour les deux campagnes de prélèvement et pour les différents types d'échantillonnage réalisés par site, les concentrations les plus élevées sont celles du diuron et de l'atrazine suivies de celle de l'acétochlore. Ces concentrations concernent uniquement les sites F4 et F6, échantillonnés pendant la saison des pluies. Les molécules de diuron et d'atrazine sont fréquemment quantifiées dans des cours d'eau (Herrero-Hernàndes *et al.*, 2017 ; Mac Loughlin *et al.*, 2017 ; Ryberg et Gilliom, 2005 ; Branchet *et al.* 2018).

La décroissance des concentrations en diuron et atrazine observée entre le premier et deuxième échantillonnage ponctuel sur une période de trois (3) semaines peut être liée au premier effet de lessivage des pesticides engendré par les fortes pluies. Les concentrations ont dues être diluées avec l'augmentation du débit du fleuve pour le site F4 sur le *Fleuve Niger* et F6 sur la rivière *Mékrou* (Palma *et al.* 2004). Les échantillonnages ont été réalisés après les premières pluies des mois de juin et de juillet en amont du *Fleuve Niger* en Guinée (où il prend sa source), au Mali et au Burkina. Pendant cette même période, le Niger avait enregistré quelques jours de précipitations entre les mois de juillet et d'août, après une longue saison sèche d'octobre à juin. Ces premières pluies en début de la saison des pluies peuvent être à l'origine du drainage des polluants des cultures pendant le ruissellement, notamment pour la culture de coton au Bénin sur la rivière *Mékrou* et les cultures maraichères à Niamey sur le *Fleuve Niger*. Ce qui explique la forte variation des concentrations sur une période de trois (3) semaines. Ce processus montre qu'il existe une influence des précipitations sur la concentration de pesticides dans les eaux du *Fleuve Niger* et de la rivière *Mékrou*.

L'échantillon d'eau pendant le mois de septembre, à la fin de la saison des pluies, sur le site F4 a montré de très faibles concentrations en diuron et atrazine. Cela suggère que les pesticides auraient été dilués dans les eaux pendant le mois d'août.

La présence de diuron et de l'atrazine à des concentrations très variables au niveau du site F6, à la confluence entre la rivière *Mékrou* et le *Fleuve Niger*, permet de suggérer une contamination diffuse de ces molécules. Les échantillons présentant les concentrations les plus élevées, lors du premier échantillonnage, peuvent être liés à une contamination ponctuelle.

Les graphiques 60 et 61 ci-dessous montrent la répartition de la pluviométrie au Niger au niveau des stations proches de Niamey, la hauteur d'eau dans le fleuve Niger en 2019, ainsi que la répartition des molécules de diuron et d'atrazine analysées.

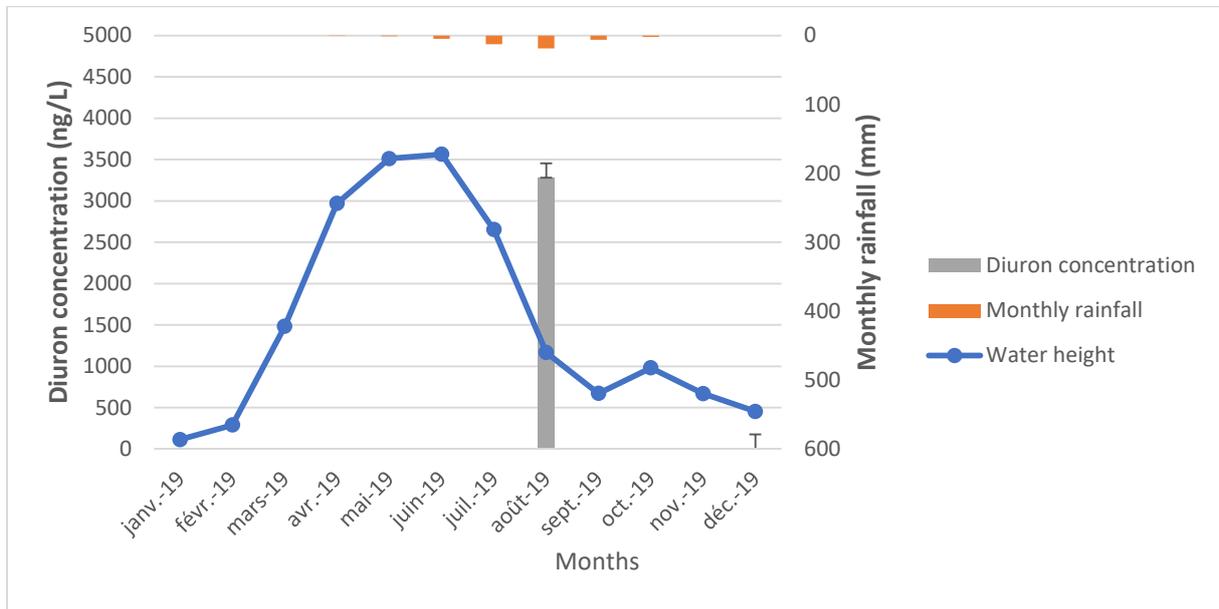


Figure 61 : Concentration du diuron par rapport à la hauteur d'eau et aux précipitations.

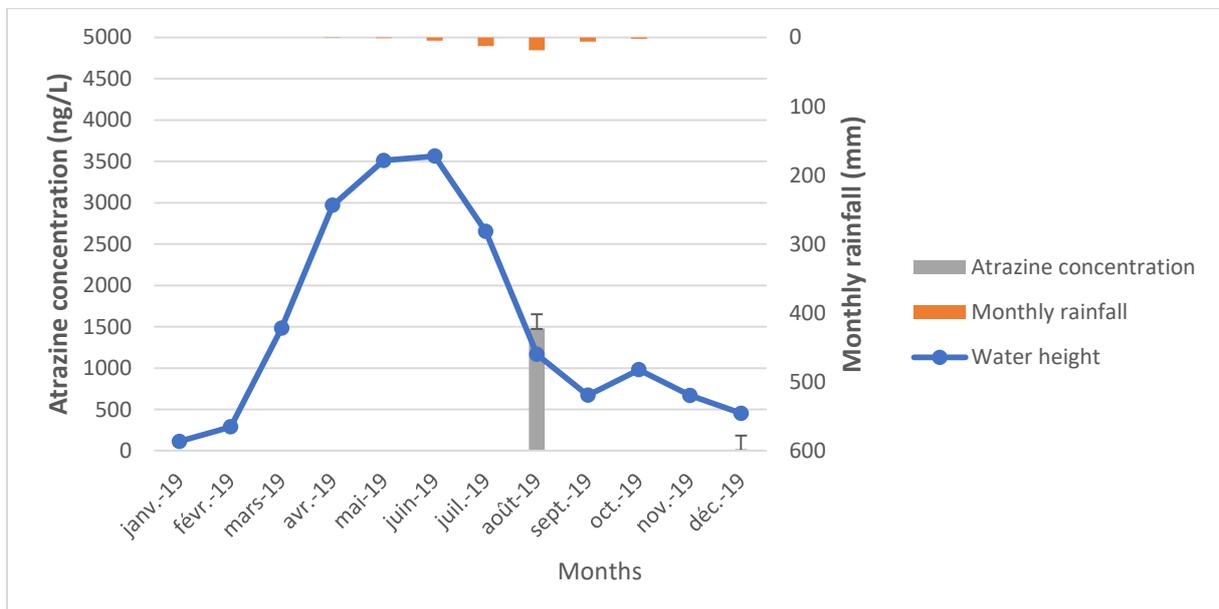


Figure 62 : Concentration de l'atrazine par rapport à la hauteur d'eau et aux précipitations.

Les deux (2) graphiques montrent que les fortes concentrations en diuron et en atrazine se situent dans la zone intermédiaire entre la période d'été et la venue des premières pluies dans le *Fleuve*

Niger et la rivière *Mékrou*. Dans toutes les périodes de l'année où la hauteur d'eau et le débit sont très élevés, les concentrations en pesticides sont diluées et deviennent faibles.

Le site F4 présente une concentration élevée en acétochlore. Il est situé en aval de la ville de Niamey, où se pratique des cultures maraichères sur les sites de Gamkalley et de Saga-concernant deux (2) périmètres irrigués de Saga et de Liboré, destinés à la riziculture. Les enquêtes réalisées ont montré que les agricultures utilisent différents types de pesticides, selon les cultures, pour lutter contre les ravageurs, les maladies et les adventices. L'acétochlore est principalement utilisé dans les cultures maraichères. L'origine de cette contamination semble être principalement liée à l'agriculture urbaine et aux cultures irriguées.

Les contaminations par les pesticides proviennent de la partie amont de la rivière *Mékrou* dans la partie béninoise, à la frontière entre les deux pays. Le Bénin est le premier pays producteur de coton en Afrique et la rivière *Mékrou* est majoritairement concernée par cette production. Cette croissance de la production du coton est accompagnée d'une utilisation frauduleuse de pesticides d'origine et de qualité diverses pour protéger la culture (Agbohessi *et al.* 2011). L'origine donc de cette contamination semble être liée à l'agriculture intensive de coton.

Dans les deux types d'agricultures, une partie des pesticides appliqués peut être adsorbée par les particules du sol puis, celles-ci les transportent vers le *Fleuve Niger* ou la rivière *Mékrou* par ruissellement (Chen *et al.*, 2017 ; Jorgenson *et al.* 2013 ; Mast *et al.* 2007 ; Smernik et Kookana 2015). Une fois dans la colonne d'eau, la polarité des pesticides interagit avec les conditions abiotiques et biotiques du milieu pour influencer leur distribution et leur devenir (Dumas *et al.*, 2017 ; Huang *et al.*, 2016). Leur persistance dans l'environnement est fonction de leur susceptibilité à la dégradation et leur adsorption sur les matières en suspension. Ce qui permet de rencontrer fréquemment les pesticides qui ne se décomposent pas rapidement dans la colonne d'eau.

Parmi les pesticides trouvés à des concentrations élevées dans la zone d'étude, l'acétochlore et l'atrazine ne sont pas homologués par le Comité Sahélien des Pesticides (CSP). Ces deux pesticides sont interdits au Niger à cause de leur forte toxicité et dangerosité. Leur présence s'explique par leur application sur les différentes cultures.

En dehors de l'utilisation de certains pesticides non homologués et interdits, certaines mauvaises pratiques des agriculteurs, notamment lors de la préparation, de la manipulation, de l'épandage ou du stockage des pesticides peuvent aussi favoriser la contamination du milieu.

Le résultat de l'analyse des échantillons des sites F1 et F7 ne montre aucune molécule avec des concentrations supérieures aux normes OMS et EU de qualité des eaux. Ce qui permet de constater que les eaux du *Fleuve Niger* qui proviennent du Mali ne sont pas contaminées ainsi

qu'à son exutoire vers le Nigéria. L'absence de la contamination en amont de la ville de Niamey et sa présence en aval et après les sites maraichers suggère qu'il y a un lien entre l'utilisation intensive des pesticides non homologués et les mauvaises pratiques dans le système de culture.

Diuron

Le diuron est un herbicide utilisé en agriculture et dans certaines activités non-agricoles pour l'élimination des mauvaises herbes sur les surfaces imperméables. Il est stable dans les sols et dans l'eau, en termes d'oxydation et de dégradation, avec un temps de demi-vie de 30 à 40 jours dans le sol et de 150 à 290 jours dans l'eau, à pH neutre (Farran and Ruiz, 2004). Sa dégradation photochimique est partielle, mais les produits de dégradation s'accumulent dans l'environnement. Il se retrouve majoritairement dans l'eau et est faiblement absorbé par les matières en suspension et les sédiments (Tissier *et al.*, 2005 ; Field *et al.*, 2003). Les principaux produits de dégradation du diuron dans les eaux et les sédiments (milieu aquatique aérobie) sont le 3,4-dichloroaniline, le 1-(3,4-dichlorophényl) -3-Méthylurée (DCPMU) et le 1-(3,4-dichlorophényl) urée (DCPU).

La toxicité du diuron est moyenne pour les poissons et les plantes (Turner, 2003). Ses effets chroniques à des doses moyennes et fortes sont : augmentation de la mortalité, retard du développement et anémie par changement de la structure chimique du sang (Plagellat, 2004).

Atrazine

L'atrazine est un herbicide. Il est l'un des désherbants le plus populaire dans le monde entier (Hayes *et al.*, 2002, 2003). Il a été développé en 1952 par la Geigy Chemical Company à Bâle, en Suisse (Knüesli, 1970). Son efficacité pour éliminer une variété de mauvaises herbes, son faible coût et sa flexibilité pour l'application (en présemis et en prélevé) font qu'il est beaucoup plus utilisé pour éviter la perte de rendement et les coûts supplémentaires de désherbage. Il est faiblement adsorbé par les matières en suspension et les sédiments. Ses propriétés chimiques le rendent plus susceptible à se dissoudre dans l'eau. Une fois appliqué sur les sols, l'atrazine peut y rester pendant des jours ou des mois. Son transfert vers les eaux de surface se fait par ruissellement. Son temps de demi -vie est de 335 jours dans l'eau (photolyse) et 40 jours dans les sols (Tissier *et al.*, 2005 et ATSDR 2003). Il varie selon des nombreux facteurs tels que le type de sol, le climat et l'historique d'application (Joblonowski *et al.* 2011).

Pour les algues, l'atrazine est algistatique, inhibant la photosynthèse en bloquant le transport des électrons (Ducruet, 1991). Les réponses des algues à l'atrazine varient considérablement, selon les concentrations utilisées, la durée d'exposition et les espèces d'algues testées (Marie *et al.*, 2000). Selon Torres et O'Flaherty 1976, après 7 jours d'exposition à 1 g/L d'atrazine, une

diminution de la teneur en chlorophylle (41 à 67%) a été observée chez les algues vertes *Chloralla vulgaris* et *Stigeoclonium* et chez l'algue bleu-vert *Oscillatoria lutea*.

4.2.5.3 Evaluation des risques écologiques

L'évaluation des risques écologiques a été effectuée sur la base du calcul de quotient de risque écologique (QR), conformément aux directives de l'OCDE et européenne pour le diuron et l'atrazine. Le QR a été calculé comme un essai de toxicité chronique sur trois niveaux trophiques représentatifs qui sont : les poissons d'espèce *Oncorhynchus mykiss*, les algues d'espèce *Raphidocelis subcapitata* et des algues vertes et des invertébrés aquatiques d'espèce *Daphnia magna* (Branchet *et al.* 2018). L'espèce de *Daphnia magna* est l'une des espèces les plus couramment utilisée dans le cadre de l'évaluation des risques écotoxicologiques. Cet organisme a été utilisé dans la fiche des tests d'écotoxicologie aquatique pour le test écotoxicité chronique (ISO 10706, OCDE, 1998). La concentration minimale avec les effets observés (CMEO) pour chaque pesticide choisi a été obtenue à partir de la base de données sur les propriétés des pesticides de l'Université du Hertfordshire (<https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>). La CMEO correspond à une exposition chronique de 21 jours pour les poissons et les invertébrés aquatiques, et la concentration efficace médiane (CE₅₀) d'une exposition aiguë de 72 h a été utilisée pour les algues. Les effets étudiés sont l'inhibition de la croissance pour les algues, l'immobilisation pour les invertébrés aquatiques et la survie pour les poissons.

La concentration estimée sans effet (PNEC) a été calculée selon la formule. $PNEC = CMEO / 1000$. La valeur 1000, correspond au facteur de sécurité appliqué pour tenir compte de l'incertitude inhérente aux données de toxicité obtenues en laboratoire.

La valeur du quotient de risque QR a été calculée pour les algues, les invertébrés aquatiques et les poissons en utilisant la formule $RQ = MEC / PNEC$ avec MEC correspondant à la concentration environnementale mesurée des échantillons instantanés (µg/L). La concentration la plus élevée de chaque échantillon a été considérée.

Le diuron et l'atrazine sont les deux principaux pesticides identifiés lors de l'état des lieux de contamination.

L'évaluation des risques écologiques est présentée dans le tableau 18 ci-dessous en tenant compte des concentrations mesurées sur tous les sites d'échantillonnage sur le fleuve Niger et la rivière Mékrou. Les concentrations environnementales mesurées (CME) qui ont été utilisées sont les valeurs maximales dans chaque campagne.

Le tableau 18 ci-dessous montre les valeurs calculées du quotient de risque écologique (QR)

Tableau 18 : Quotient des risques écologiques de sites d'échantillonnage sur la base d'atrazine et de diuron sur trois niveaux trophiques.

| Sites | Algues | | | | Daphnées | | | | Poisson | | | |
|-----------|----------------|---------|-----------|--------|----------------|--------|-----------|--------|----------------|--------|-----------|--------|
| | Août/septembre | | Avril/Mai | | Août/septembre | | Avril/Mai | | Août/septembre | | Avril/Mai | |
| | Atrazine | Diuron | Atrazine | Diuron | Atrazine | Diuron | Atrazine | Diuron | Atrazine | Diuron | Atrazine | Diuron |
| F1 | 0,13 | 7,07 | * | * | 0,03 | 0,20 | * | * | 0,00 | 0,05 | * | * |
| F2 | * | * | 0 | 0 | * | * | 0 | 0 | * | * | 0 | 0 |
| F4 | 0,31 | 2,15 | 0 | 0 | 0,07 | 0,06 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0 |
| F6 | 25,01 | 1 215,3 | * | * | 5,90 | 34,18 | * | * | 0,74 | 8,00 | * | * |
| F7 | * | * | 0 | 0 | * | * | 0 | 0 | * | * | 0 | 0 |

 QR > 1 (risque élevé)

 QR entre 0.5 et 1 (risque moyen)

 QR < 0.5 (risque faible)

Selon le résultat obtenu, on constate que les risques écologiques concernent uniquement les sites F1, F4 et F6 pour des échantillons prélevés pendant la saison des pluies. Les sites F1 et F4 présentent des risques chroniques au niveau des algues pour le diuron, qui présente de faibles concentrations par rapport au site F6.

Le site F6 présente des risques écologiques élevés sur les trois niveaux trophiques pendant la saison des pluies, notamment au mois d'août. Les risques sont très élevés pour les trois espèces, en ce qui concerne le diuron, avec un QR atteignant jusqu'à 1 215 pour les algues. *Preira et al.* (2015) dénote que le diuron possède un effet anti-androgénique chez le tilapia du Nil qui altère sa fonction de reproduction. *Coquillé et al.*, 2015 mettent en évidence des effets significatifs chez les microalgues *Tetraselmis suecica* notamment sur une augmentation de 125 % ($\pm 2.3\%$) du temps de doublement et 25 % ($\pm 1.8\%$) de la fluorescence relative à la présence d'espèces réactives de l'oxygène (EROs, par cytométrie en flux) et une diminution de 25 % ($\pm 1.8\%$) du rendement photosynthétique et 38 % ($\pm 1.9\%$) du contenu lipidique relatif.

Pour l'atrazine, le risque est très élevé pour les algues et les invertébrés aquatiques. Il est moyen à faible pour les poissons. Les travaux de *Marie et al.* (2000) montrent que les réponses des algues varient considérablement, selon les concentrations utilisées, la durée et les espèces d'algues testées. *Torres et O'Flaherty* (1976) mettent en évidence une diminution de la teneur en chlorophylle (41 à 67%), après 7 jours d'exposition à 1 g/L d'atrazine chez les algues vertes *Chloralla vulgaris* et *Stigeoclonium* et chez l'algue bleu-vert *Oscillatoria lutea*. La WHO (1990), dénote que sa capacité de bioaccumulation chez les poissons reste peu importante.

La présence de diuron et de l'atrazine notamment sur les sites F4 et F6 constitue un risque écologique majeur pour le milieu aquatique. Aucun risque écologique n'a été mis en évidence

pendant la saison sèche et seul le diuron présente des risques élevés pour les trois niveaux trophiques.

CHAPITRE V : TRANSFERT DE CONNAISSANCE RECHERCHE – TERRAIN SUR LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ET SANITAIRES DE LA POLLUTION DES EAUX PAR LES ACTIVITES HUMAINES AU LIPTAKO NIGERIEEN

5.1 Enjeux du transfert de connaissances recherche – terrain

5.1.1 Etat des lieux des actions de sensibilisation sur les pollutions de l'eau et la santé environnementale au Liptako nigérien

Les états concernés par l'EMAPE, en collaboration avec leurs partenaires techniques et financiers et les ONG ont entrepris plusieurs activités pour réduire les effets négatifs de l'activité minière sur l'environnement et la santé. Les activités d'orpaillage se sont accentuées dans les pays du Liptako Gourma en général et en particulier dans le Liptako nigérien, notamment après la sécheresse des années 1980 dans le Sahel. Pendant cette période, les institutions financières multilatérales ont lancé différentes réformes concernant le secteur minier en Afrique, à travers des programmes d'ajustements structurels (PAS) en vue d'accompagner des transformations politiques et économiques. Ces programmes ont été motivés par la montée des débats au sein des représentants de la société civile, des politiciens, des représentants du secteur privé, les responsables administratifs des Etats et des chercheurs (Campbell et Laforce, 2010 ; Jonsson et Fold, 2011).

De manière spécifique, les actions réalisées par les Etats et leurs partenaires se sont beaucoup plus intéressées à la transformation et à la réorganisation de l'EMAPE pour favoriser le développement d'une exploitation minière acceptable du point de vue social et environnemental (World Bank, 1996). C'est ainsi qu'en 1992, les pays membres du Liptako Gourma, financés par la CEA ont entrepris une étude de diagnostic sur les aspects législatifs, réglementaires et organisationnels du secteur de l'EMAPE (Keita, 2001), avec comme but d'harmoniser la réglementation dans les 3

pays. C'est à partir de cette année que les nouvelles réformes ont véritablement concerné les EMAPE.

Plusieurs travaux ont montré que l'EMAPE est considérée comme une activité qui concerne les populations pauvres (Barry, 1996 ; Luning, 2006 ; Hilson et Banchirigah 2009 ; Jonsson et Fold, 2011 ; Labonne, 2014). C'est dans ce cadre que le Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies (UNDESA) a réalisé plusieurs projets régionaux, sur plusieurs années, en vue de développer des politiques compatibles avec la réduction de la pauvreté (Hilson et McQuilken, 2014). En 2003, l'UNDESA, en collaboration avec le Bureau International du Travail (BIT) avait lancé le projet RAF/99/023 portant sur l'éradication de la pauvreté et le développement de moyens d'existence durable dans les communautés minières artisanales. Ce projet a consisté en une série d'enquêtes participatives au niveau des communautés, des études de cas et un rapport analytique dans quatre pays d'Afrique (Ghana, Mali, Ethiopie et Guinée) (Keita, 2001). Plusieurs séminaires et ateliers ont été réalisés par les partenaires des Etats, notamment les ONGs, à l'endroit des artisans miniers, des maires et des responsables des sites pour les former et les sensibiliser sur le respect du cadre législatif et réglementaire, le changement de comportement face au travail des enfants et des femmes sur les sites, la réhabilitation des puits à la fin des travaux d'extraction et l'utilisation des mesures.

Le caractère informel et temporaire de la majorité des sites d'EMAPE a une influence particulière sur la réalisation des actions d'information et de sensibilisation sur la question de la pollution des eaux et la santé humaine. A cela s'ajoute le problème sécuritaire dans la zone du Sahel. L'Autorité du Liptako Gourma (ALG), regroupant le Niger, le Burkina et le Mali, avait organisée des séminaires sur le développement et la promotion de l'EMAPE dans les trois pays. Pour autant, il n'existe pas d'actions coordonnées ni au sein des états, ni entre eux pour solutionner le problème de la pollution des eaux.

Et pourtant, chaque pays dispose des lois et des règlements nationaux et internationaux qui contraignent certaines pratiques néfastes pour l'environnement notamment sur l'interdiction d'utilisation des substances chimiques toxiques comme le mercure, l'interdiction de l'extraction jusqu'à la nappe d'eau souterraine, la distance réglementaire à observer entre les puits d'orpaillage, la limite de qualité des effluents rejetés dans la nature, la lutte contre la désertification et la conservation de la biodiversité, entre autres.

5.1.2 Portée et limites de ces actions sur la prise de conscience et le changement des pratiques

Malgré ces efforts, les interventions du gouvernement, avec l'appui de ses partenaires techniques et financiers, ne semblent pas parvenir à un changement radical des pratiques et à une prise de conscience des acteurs intervenant dans l'EMAPE. En effet, les analyses des eaux et des sols révèlent des contaminations majeures. D'autre part, les échanges que nous avons pu avoir, sur le terrain, tout au long de ces travaux de thèse, avec les acteurs (acteurs institutionnels, orpailleurs, chefs de village, etc.), font ressortir un manque d'information et de sensibilisation sur le lien entre les mauvaises pratiques d'extraction et de récupération d'or avec les enjeux environnementaux et les conséquences sanitaires. Pourtant, l'EMAPE prend beaucoup d'ampleur dans les pays couverts par les roches vertes du Craton Ouest Africain en général et le Liptako nigérien en particulier. Et l'EMAPE reste une activité indispensable à la population locale dont les activités contribuent au financement des Etats.

Les différentes interventions réalisées se sont intéressées beaucoup plus à la documentation des aspects économiques, sociaux ou historiques de l'activité, mais ne proposent pas de solutions pratiques touchant directement les principaux acteurs. La recherche documentaire a révélé le peu de travaux scientifiques sur les transferts de connaissances, sur les enjeux environnementaux et sanitaires de ces activités auprès des populations locales et des orpailleurs. On peut mentionner les travaux de Andriamoasionoro *et al.* (2020) qui ont récemment ouvert des pistes de recherche sur l'utilisation de jeux sérieux comme outil d'apprentissage social : en partant du même constat de l'inefficacité des approches « top-down » pour formaliser les secteurs complexes des EMAPE, les chercheurs mettent en lumière les mérites d'une approche « bottom-up » pour expérimenter de nouvelles formes d'orpaillage artisanal.

Labonne (2014) dénote que les stratégies de développement de l'EMAPE proposées par les experts et consultants des donateurs, selon leur expérience, ne permettent pas de satisfaire aux demandes exprimées par les communautés. Les décisions sont prises au niveau des administrations centrales, notamment les ministères, sans beaucoup d'implication des communautés rurales, des élus locaux, des chefs traditionnels et des orpailleurs eux-mêmes. Certains travaux dénoncent même une négligence dans la plupart des politiques et programmes économiques, régionaux et locaux des états et un manque d'enthousiasme des bailleurs de fonds à faire le lien entre l'EMAPE et son caractère social (Hilson et McQuilken, 2014 ; Labonne, 2014).

Il est vrai que les Etats, qui doivent être des acteurs de régulation de l'exploitation minière artisanale de l'or pour limiter la dégradation de l'environnement et de la santé humaine, souffrent

d'un manque de moyen pour faire appliquer les lois et les règlements existants face à une activité diffuse et mouvante. Cela se traduit par l'absence de contrôle et de surveillance des sites d'orpaillage, la difficulté de recouvrement des taxes permettant de faire une traçabilité de l'or extrait artisanalement, l'incapacité à mettre fin aux pratiques nocives à l'environnement.

La prise de conscience est pourtant bien là. Le problème de la pollution des eaux et la dégradation de la santé humaine sur les sites d'orpaillage est bien connu par les Etats concernés et par la population locale. La principale cause d'échec de ces interventions est l'absence des acteurs locaux à la table des discussions et, donc la non prise en compte de leurs préoccupations réelles. Les programmes et les projets d'intervention sont conçus par les techniciens du secteur minier en se basant sur les aspects purement techniques.

5.1.3 Préoccupations socio-environnementales et sanitaires : observations de terrain

L'exploitation artisanale et industrielle de l'or constitue une véritable préoccupation socio-environnementale dans la zone du Liptako-Gourma. Les enjeux sociaux et environnementaux de cette activité sont observables sur tous les sites. La dégradation du milieu naturel est plus prononcée et visuelle sur les sites d'exploitation artisanale.

L'EMAPE est beaucoup plus pratiquée par les populations rurales de cette zone dont l'activité principale était l'agriculture. A l'annonce de la découverte d'une pépite d'or dans les alluvions ou éluvions, la ruée vers l'or commence et un nouveau village temporaire se crée en quelques semaines et peut disparaître aussitôt que des nouveaux sites plus avantageux sont découverts. Cette installation engendre différents types de conflits entre les populations riveraines, les agriculteurs, les propriétaires des puits ou les propriétaires terriens, les orpailleurs entre eux, les cantons et les communes, les chefs traditionnels, les ressortissants étrangers ou même avec les mines industrielles (Grätz, 2004). Pour les mines industrielles, l'installation des entreprises étrangères avec un statut légal obligent les orpailleurs à quitter les lieux pour d'autres sites plus éloignés et moins productifs et dans certains cas. La population est même délocalisée (Banchirigah, 2008 ; Lange, 2008 ; Sandrine, 2012). Ces processus favorisent des conflits entre la population locale et les entreprises. Le travail des femmes (Figure 62) principalement pour des tâches moins rentables est fréquent sur les sites d'orpaillage et les enfants quant eux quittent le secteur éducatif pour rejoindre les sites d'orpaillage.



Figure 63 : Extraction de l'or par les femmes avec la méthode gravimétrique sur le site de Komabangou.

L'utilisation de substances chimiques nocives pour l'environnement et la santé humaine comme le mercure, le cyanure et les acides sulfuriques et nitriques, constitue une véritable préoccupation sur ces zones. La majorité des orpailleurs n'utilisent pas les équipements de protection pour manipuler ces produits lors des récupérations d'or parce qu'ils ne connaissent pas leur dangerosité. Sur la majorité des sites, le mercure et le cyanure sont manipulés à mains nues. Les travailleurs ne se protègent pas ou certains se protègent avec leurs habits (Figure 63)



Figure 64 : Evacuation des bassins de cyanuration et manipulation de cyanure sans équipement de protection.

Sur les sites de Seffa Moussa et de Nbanga au Niger, les activités de récupération se font en majorité dans les villages et dans certains cas à proximité des écoles (Figure 64).



Figure 65 : Récupération de l'or dans le village de Nbanga et à proximité des écoles.

Le problème sanitaire sur les sites d'orpaillage est bien notifié dans les rapports annuels des Centres de Santé Intégré (CSI). C'est le cas du village de Komabangou, où plusieurs personnes du village (orpailleurs et populations riveraines) développent des maladies respiratoires comme la toux, les pneumonies et l'angine ainsi que l'apparition de certaines maladies dermatologiques (Figure 65).



Figure 66 : Quelques maladies dermatologiques notifiées par le CSI de Komabangou.

Sur certains sites, les eaux souterraines issues du dénoyage des puits d'extraction sont utilisées pour l'approvisionnement en eau de la population (Figure 66).



Figure 67 : Eaux d'ehaure utilisées pour la consommation humaine.

En dehors des problèmes de dégradation de l'environnement et de la santé humaine, la cohabitation d'un grand nombre d'orpailleurs a des conséquences sur la dépravation des mœurs, qui se traduit par la consommation des stupéfiants, la prostitution, la criminalité, le vol, l'escroquerie. Ces sites constituent souvent des zones de ravitaillement des groupes terroristes (eg Keita, 2001 ; Gräts, 2004 ; PNUE, 2015). La région du Liptako Gourma, et notamment les sites d'orpaillage, est affectée par une insécurité avec la présence de groupes armés comme Al-Qaïda au Maghreb Islamique (AQMI) et le Mouvement pour l'Unité et le Jihad en Afrique de l'Ouest (MUJAO) ainsi que du banditisme. Ces groupes profitent des sites d'orpaillage où l'Etat est faible ou absent pour se ravitailler et asseoir leur capacité de financement du mouvement.

5.2 Préalables épistémologique et méthodologique à la conception d'un dispositif de transfert de connaissance recherche-terrain

5.2.1 Posture épistémologique

Nos observations de terrain et les échanges que nous avons pu avoir avec les différentes parties prenantes de l'EMAPE au niveau du Liptako-Gourma ont affecté en profondeur notre positionnement en tant que scientifique, à l'interface entre la production d'expertises scientifiques et la connaissance locale des orpailleurs. En effet, l'état des lieux des actions de sensibilisation menées par les Etats et les ONGs témoigne d'une réelle volonté de faire changer les pratiques. Les orpailleurs et les habitants des sites d'orpaillage témoignent quant à eux d'une réelle préoccupation socioenvironnementale concernant les impacts de cette activité sur leur

environnement, la santé animale et humaine. Mais les savoirs scientifiques institutionnalisés ne parviennent pas à toucher les populations d'orpailleurs. Et inversement, les constats vécus et les savoirs de terrain des orpailleurs ne sont pas mobilisés par les institutions pour trouver une solution à ces problèmes. L'enjeu est donc bien de restaurer un dialogue entre recherche et terrain, entre science et société, à double sens. Notre objectif a donc été de penser à un dispositif de transfert de connaissances qui puisse favoriser :

- Le transfert des résultats scientifiques obtenus dans ce travail de thèse ;
- L'analyse chimique des eaux et la mise en évidence de concentrations préoccupantes de métaux traces dans les eaux de consommation ;
- Le recueil des perceptions, des savoirs et des pratiques des orpailleurs pour nourrir la réflexion scientifique et institutionnelle et ;
- La co-construction des solutions d'amélioration des pratiques d'orpaillage, compatibles avec la réalité de terrain.

Il s'agit là d'adopter une posture épistémologique différente. Dans les premiers temps de ce travail de recherche, nous avons volontiers adopté une posture scientifique neutre, objective, distanciée, voire désengagée de notre objet de recherche. Nous avons considéré la problématique des pollutions humaines sur les eaux dans la région du Liptako-Gourma avec toute la distance et le recul des outils de prélèvement, de diagnostic et d'analyse en laboratoire. Nous adoptons maintenant une posture qui témoigne de notre attachement à ce territoire, à ces populations. Nous nous sommes mis à l'écoute des savoirs locaux et nous avons accepté d'agir aux côtés des populations et des orpailleurs (Gramaglia, 2020). Avec des auteurs tels que Daré et Venot (2016), nous revendiquons qu'engagement et recherche peuvent se renforcer mutuellement et participer d'une « recherche engagée » qui vise une certaine objectivité qui ne neutralise ni n'ignore notre subjectivité et notre capacité et la volonté d'intervention sur le terrain. Ainsi, le dispositif que nous avons cherché à élaborer est non seulement un outil de sensibilisation mais surtout un outil pour de renforcement des capacités des différents acteurs (chercheurs, des cadres institutionnels, orpailleurs, responsable des sites, chefs de villages etc.). La mise en œuvre de ce dispositif permettra d'agir sur les questions de pollutions environnementales et sanitaires de l'EMAPE dans le Liptako-nigérien.

5.2.2 Parti-pris méthodologique

La modélisation comme outil d'accompagnement s'inscrit pleinement dans cette posture scientifique impliquée, engagée, attentionnée, emprise avec des questionnements à la fois théorique et pragmatique. Elle est née en 1996, de la réflexion d'un groupe interdisciplinaire de

chercheurs travaillant dans le domaine de la gestion des ressources naturelles. Elle reconnaît l'incertitude dans les situations complexes, à l'interface entre l'environnement et la société, et assume l'existence de multiples points de vue légitimes, émanant des acteurs de terrain comme des experts scientifiques (Collectif Commod, 2005). La modélisation d'accompagnement est ainsi la proposition méthodologique de ce collectif de chercheur pour :

- S'adapter et améliorer les connaissances sur la complexité des systèmes étudiés dans un constant va-et-vient entre théorie et terrain ;
- Faire s'exprimer la diversité des savoirs et des points de vue ;
- Assumer le rôle de la recherche dans la modification des perceptions et des pratiques des acteurs de terrain.

La modélisation d'accompagnement propose d'entraîner le chercheur et les acteurs locaux dans un cycle sans cesse renouvelé « terrain-modèle-simulation »

« Le chercheur débute avec un premier modèle, qui a la vertu de le contraindre à expliciter ses préconceptions tant théoriques que vis-à-vis du terrain. Puis, la confrontation à la réalité lui fait réviser et reconstruire ce premier modèle, en prenant progressivement mieux en compte non seulement le terrain, mais aussi les questions que se posent les acteurs. [...] Cette confrontation entre les dynamiques simulées par le modèle et celles observées sur le terrain conduit à la constitution d'un nouveau modèle, qui peut être une simple variante du premier ou un modèle entièrement nouveau. Le cycle se poursuivant, on arrive à une famille de modèles, trace des interactions successives entre modélisateur et terrain. » (Collectif COMMOD, 2005).

Dans la lignée des dynamiques de recherche-action portées par le collectif COMMOD, le dispositif de transfert de connaissances entre recherche et terrain que nous avons élaboré s'inscrit ainsi dans un cycle itératif que nous allons décrire dans ce dernier chapitre.

5.3 Modélisation

A partir des données produites dans le cadre de cette thèse, des observations de terrain et des échanges avec les acteurs locaux sur différents sites d'orpaillage du Liptako Gourma, nous a conduit à débiter par une première modélisation conceptuelle, autrement dit, une première représentation des éléments constitutifs du système qui lie les orpailleurs, leurs pratiques d'orpaillage, leur environnement écologique et sociale, les populations, etc. Pour réaliser cette première modélisation, nous nous sommes inspirés de la méthode ARDI, à savoir l'identification et la cartographie systémique des Acteurs, des Ressources, des Dynamiques et des Interactions qui

participent à des enjeux environnementaux et sanitaires de l'orpaillage sur ce territoire (Etienne, 2009).

5.3.1 Acteurs - Modélisation d'un village typique

Le village de Komabangou, au Niger a été choisi comme village type. Il constitue une portion de territoire nigérien, situé sur la rive droite, le long de la rivière *Dargol*, qui est un affluent du *Fleuve Niger*. L'activité principale de la population est l'agriculture avec des travaux de pêche liée à la présence de la rivière Dargol et des mares permanentes et semi permanentes. L'orpaillage est une activité pratiquée par la majorité des villageois, qui leur procure des revenus complémentaires, essentiels à la vie. Autrement dit, l'orpaillage fait partie intégrante de l'histoire du village et de son évolution. Afin de modéliser ce village typique, nous nous sommes basés sur les données statistiques nigériennes pour en dimensionner les aspects démographiques et économiques.

Caractéristique du village type et adaptation aux données statistiques nigériennes

- Aspect démographique et emploi du village au démarrage du jeu :

Dans le modèle, la population totale du village est de **2 000** habitants, dont **1 160** enfants et jeunes de moins de 18 ans. Le tableau 19 ci-dessous a été conçu sur la base des statistiques nigériennes, notamment sur le genre, la tranche d'âge, la population active, la répartition des emplois et le taux de chômage (www.stat-niger.org).

Tableau 19 : Aspect démographique et activités des habitants du village au démarrage du jeu.

| | | Nombre d'actifs | Part de la population active |
|---|-------------|------------------------|-------------------------------------|
| Hommes | 1000 | 900 | 55 % |
| dont garçons de moins de 10 ans | 180 | | |
| dont garçons de plus de 10 ans | 400 | 168 | |
| dont adulte | 420 | | |
| Femmes | 1000 | 400 | 24 % |
| dont filles de moins de 10 ans | 180 | | |
| dont filles de plus de 10 ans | 400 | 168 | |
| dont adulte | 420 | | |
| Enfants | 1160 | 336 | 21 % |
| Population active | 1636 | | |
| Population active occupée au démarrage de la partie | 1309 | | |
| Population active au chômage au démarrage de la partie | 327 | | |

Selon les statistiques (www.stat-niger.org), le Niger connaît une croissance démographique de +3,83% par an. Ce qui signifie que notre village modélisé s'accroît de 38 habitants (19 femmes, 19 hommes) qui viennent augmenter le nombre des garçons et des filles de moins de 10 ans, avec des conséquences sur la vulnérabilité totale des populations.

- Structure de l'emploi par activité :

L'activité agricole est prédominante au Niger. En effet, 85% de la population active est composée d'agriculteurs. Ainsi la structure et la répartition des emplois entre les agricultures et les orpailleurs sont données dans le tableau 20 ci-dessous :

Tableau 20 : Répartition des emplois entre les agricultures et les orpailleurs.

| | Nombre d'ouvriers | dont: hommes | dont: femmes | dont: enfants |
|---|-------------------|--------------|--------------|---------------|
| Orpillage local | 40 | 22 | 10 | 8 |
| <i>Nombre d'ouvriers par puits</i> | 10 | 6 | 2 | 2 |
| Agriculture locale | 10 | | | |
| <i>Nombre d'ouvriers par exploitation</i> | 5 | | | |
| Activité hors périmètre de jeu | 1 259 | | | |

5.3.2. Acteurs – Cartographie des principaux acteurs

Au Niger, le secteur de l'exploitation artisanale de l'or est très complexe et fait intervenir plusieurs acteurs. Les principaux acteurs identifiés sont :

- Le pouvoir public notamment les Ministères de l'Environnement, des Mines, de l'Hydraulique, de Santé et de la Défense Nationale. L'Etat est chargé de régulariser l'exploitation artisanale de l'or. Il est chargé de l'application des textes, surtout au niveau de l'interdiction d'atteindre des profondeurs maximales, de l'utilisation du mercure, de l'élaboration des procédures et de la formation des orpailleurs ainsi que des mesures de contrôle et de surveillance environnementale et sanitaire ;
- Les maires et les chefs coutumiers des zones concernées sont pleinement partie prenante de l'extraction. Ils sont en relation avec les orpailleurs nationaux et étrangers et sont en majorité impliqués dans la gestion des conflits entre les orpailleurs et les agriculteurs ou les autres types de conflits. Ils jouent le rôle de cadres locaux de concertation et participent à la gestion des sites en collaboration avec le service public ;

- Les orpailleurs peuvent être légaux ou clandestins. Ils utilisent des substances chimiques toxiques comme le cyanure, le mercure et les acides sulfuriques et nitriques lors de la récupération ;
- L'agriculture étant la principale activité de la zone, les agriculteurs sont souvent envahis par les orpailleurs et sont confrontés à des conflits. Certains orpailleurs quittent leurs activités pour se retrouver dans l'orpaillage ;
- La population environnante est directement concernée par l'orpaillage. Les jeunes et les femmes pratiquent quelques activités génératrices de revenus, en marge ou directement au cœur des sites d'orpaillage, pour subvenir aux besoins quotidiens ;
- Les ONGs qui interviennent à différents niveaux sur les sites d'orpaillage, interviennent surtout au niveau de la lutte contre les conflits liés à l'orpaillage.

5.3.3 Interactions et Dynamiques sociales

Sur la base des premières observations menées sur le terrain en marge des campagnes d'échantillonnage, une première cartographie des liens qui peuvent exister entre les différents acteurs de l'exploitation artisanale de l'or dans le Liptako nigérien a ainsi été réalisée (Figure 67). Ces relations peuvent être de plusieurs natures : conflictuelle, collaborative, régulatrice, etc.

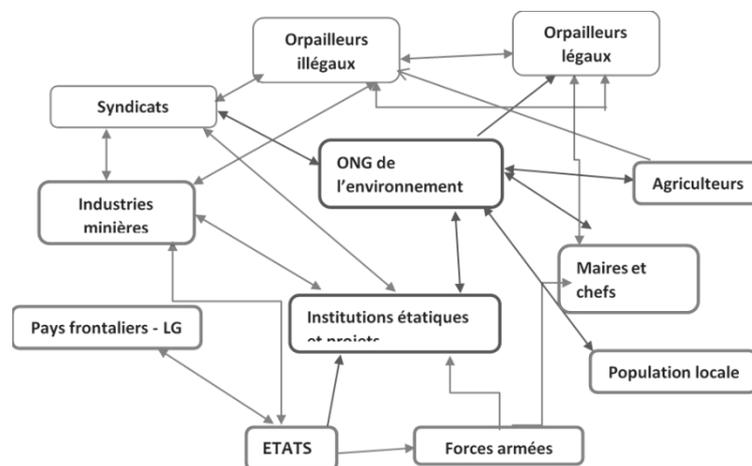


Figure 68 : Relation possible entre les différents acteurs.

5.3.4. Ressources : modélisation d'un socle géologique aurifère

Un socle géologique aurifère a été modélisé. Ce socle est constitué de parcelles sur tout le territoire, avec une géologie variée et des concentrations en or très incertaines sur un territoire modèle de 5 120 km². Des filons de quartz riches peuvent traverser les parcelles et se trouver

dispersés à différents endroits du territoire. La répartition des richesses aurifères sur le territoire modélisé est très variée et suit une loi de probabilité, dite « loi richesse » modélisant la variabilité du gisement. Ainsi, des quantités maximums d'or extraites sont attribuées à chaque parcelle. Sur une même parcelle, on peut obtenir plusieurs grammes d'or par tonne de roche ou ne rien extraire du tout. La quantité maximale d'or qui peut être extraite sur le territoire, si tous les puits sont exploités a été calibré à 6 930 grammes. Le tableau 21 ci-dessous donne la répartition de l'or que nous avons retenu par parcelle.

Tableau 21 : Répartition de l'or par parcelle du socle géologique.

| | | | |
|--|--|--|--|
| A1 Richesse = 1 Quantité max extraite = 330 gr | B1 Richesse = 2 Quantité max extraite = 450 gr | C1 Richesse = 5 Quantité max extraite = 360 gr | D1 Richesse = 2 Quantité max extraite = 450 gr |
| A2 Richesse = 1 Quantité max extraite = 330 gr | B2 Richesse = 3 Quantité max extraite = 750 gr | C2 Richesse = 4 Quantité max extraite = 300 gr | D2 – ESPACE AGRI Richesse = 3 Quantité max extraite = 750 gr |
| A3 Richesse = 1 Quantité max extraite = 330 gr | B3 Richesse = 3 Quantité max extraite = 750 gr | C3 Richesse = 5 Quantité max extraite = 360 gr | D3 – VILLAGE |
| A4 Richesse = 3 Quantité max extraite = 750 gr | B4 Richesse = 5 Quantité max extraite = 360 gr | C4 Richesse = 1 Quantité max extraite = 330 gr | D4 – ESPACE AGRI Richesse = 1 Quantité max extraite = 330 gr |

Les exploitants peuvent choisir un terrain avec des gisements alluvionnaires ou filoniens et peuvent ne rien trouver ou bien obtenir de très petites quantités d'or. Cette modélisation met en évidence le caractère aléatoire de la recherche d'or telle que nous avons pu l'observer sur le terrain. Sur une même parcelle, on peut trouver de l'or en quantité importante à un point qui pourra disparaître quelques mètres plus loin. Les zones agricoles sont supposées contenir les mêmes quantités d'or que les autres zones.

5.3.5. Dynamiques techniques d'orpaillage – impacts sur les ressources territoriales

Les activités d'orpaillage à différentes étapes, et en particulier le choix des techniques d'orpaillage, ont des impacts sur les différentes ressources territoriales au sens des géographes, c'est-à-dire des caractéristiques de l'environnement qui peuvent être mobilisées dans une optique de développement (Gumuchian et Pecqueur, 2007). En ce sens, peuvent être considérées comme ressources territoriales : l'eau, l'air, les sols, la biodiversité, le paysage, et même dans une certaine mesure, la santé humaine, les ressources en eau. Nous avons donc recensé les interactions et les dynamiques à l'œuvre entre les étapes, les techniques d'orpaillage et les différentes ressources territoriales (Figure 68).

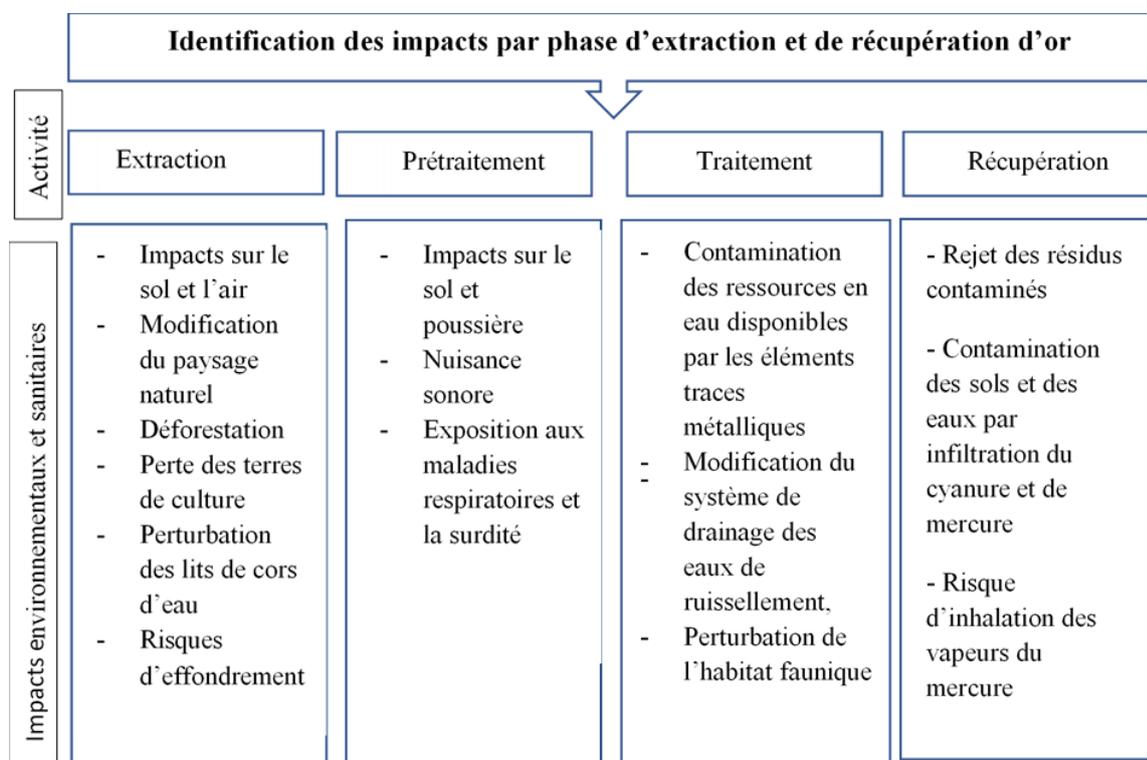


Figure 69 : Identification des impacts de l'exploitation artisanale de l'or par phase d'extraction et de traitement.

Les résultats des travaux de thèse sur les pollutions métalliques des zones d'exploitation artisanale de l'or du Liptako nigérien, en particulier, ont ainsi pu consolider cette approche qualitative par des données quantitatives précieuses pour le travail de modélisation. Pour rappel, nous avons montré des concentrations supérieures aux normes de potabilité des eaux de boisson pour les éléments traces comme l'arsenic (entre 0,018 et 202 µg/l, pour une norme de 10 µg/l) le manganèse (entre 0,089 et 956 µg/l pour une norme OMS de 400 µg/l et une norme française de 50), le nickel (entre 0,045 et 24 µg/l pour une norme OMS 70 µg/l et 20 pour la norme française), le bore (entre 1,98 et 1 380 µg/l), le baryum (entre 98 et 1344 µg/l pour une norme OMS 1300

µg/l et 700 µg/l pour la norme française). Les contaminations en métaux et en métalloïdes des rivières, misent en évidence lors de la thèse, montrent des concentrations supérieures à la normale dans les sédiments de la rivière *Sirba* principalement pour le Fe, le Mn et l'Al avec des concentrations proches de la limite pour le Co, le Ni, le Sb et l'As. La présence de l'arsenic à une concentration 20 fois supérieure à la normale constitue une préoccupation majeure pour la santé des consommateurs.

5.3.6. Dynamique technique d'orpaillage – Santé humaine : création d'indicateur des risques sanitaires

La modélisation doit permettre de rendre manifeste le risque d'exposition des populations aux différents polluants liés à l'orpaillage en fonction du type de personne et de sa vulnérabilité ainsi que des modes d'exposition. Dans une optique de simplification dans le cadre de la mise en place de ce modèle, deux types d'exposition seront considérées :

- L'arsenic et le cyanure ingérés par l'eau,
- Le mercure inhalé dans l'air.

Exposition à l'arsenic et au cyanure

L'utilisation du cyanure lors de l'extraction de l'or et la libération de l'arsenic favorisent la contamination des ressources en eau disponible et une exposition de la population. Cette exposition est principalement liée à la consommation d'une eau potable de mauvaise qualité et à la quantité d'eau consommée par an. Dans notre village type, l'ensemble des habitants peut être exposé en fonction de la qualité de la ressource en eau consommée. Le tableau 22 ci-dessous donne la répartition d'habitants exposés en fonction du volume consommé. Cette répartition a été calculée sur la base d'un taux de 42 % représentant la population ayant accès à une eau de meilleure qualité (source : Banque Mondiale) et 7m³ comme la consommation annuelle moyenne d'eau par personne, au Niger.

Tableau 22 : Répartition de la population exposée sur le territoire.

| | Nombre d'habitants | Nombre de m3 |
|--|---------------------------|---------------------|
| Population moins exposée (ayant un accès à une ressource en eau non contaminée par l'orpaillage) | 840 | 5 880 |
| Population exposée | 1160 | 8 120 |

Comme pour tout type de polluant, on considère que les femmes enceintes (consommation d'eau, transmission fœtale) et les enfants sont plus vulnérables (grande consommation d'eau par poids corporel, absorption du système digestif et neurologique immatures). On considère également que 42 % représente le taux d'accès d'une population moins exposée à la pollution car ayant accès à une eau de bonne qualité. Le tableau ci-dessous donne la répartition des femmes enceintes et des enfants vulnérables à la pollution (tableau 23). Sur le village type, on estime que 100 femmes sont enceintes dans le village modèle chaque année.

Tableau 23 : Répartition des femmes enceintes et enfants vulnérables à la pollution.

| | Nombre d'habitants | Nombre de m3 |
|--|--------------------|--------------|
| Population vulnérable – Enfants | 673 | 4 711 |
| Population vulnérable – Femmes enceintes | 58 | 406 |

Les effets d'une exposition prolongée à des teneurs élevées en arsenic inorganique s'observent au bout d'une durée de 5 ans. Ils se manifestent notamment par des lésions cutanées, des cancers de la peau, de la vessie ou des poumons (Barro-Traoré et al, 2008, Nzihou *et al.*, 2013). Les orpailleurs sont les principaux utilisateurs de cyanure et sont donc plus exposés aux lésions cutanées et à l'inhalation de cyanure.

Exposition au mercure

On estime que deux grammes de mercure sont utilisés pour la récupération d'un gramme d'or, et que 80% de ce mercure partent en vapeur et sont potentiellement inhalé à différentes étapes de sa manipulation (à température ambiante, lors de l'amalgamation, etc.). Le mercure inhalé est à 80% absorbé par l'organisme.

La population exposée est principalement composée d'ouvriers présents sur les sites utilisant l'amalgamation. Parmi ces ouvriers, les enfants et les femmes enceintes sont considérés comme les plus vulnérables. Au lancement du modèle, la population exposée est nulle étant donné qu'il n'y a pas d'amalgamation. L'exposition chronique au mercure entraîne des effets nocifs sur les systèmes nerveux, digestifs et immunitaires, ainsi que sur les poumons et les reins (OMS, 2007 ; Bose-O'Reilly *et al.*, 2010, Adama 2017 ; Black *et al.* 2017). Ces effets nocifs surviennent après plusieurs années d'exposition.

Calcul d'indicateur de risque d'exposition des populations

L'indicateur de risque d'exposition des populations aux problématiques sanitaires liées à la pratique de l'orpaillage est calculé selon la formule usuelle :

$$\text{RISQUE} = \text{ALEA} \times \text{ENJEU}$$

L'**aléa** représente l'apparition de symptômes liés à l'exposition chronique à l'arsenic, au cyanure et au mercure au sein de la population présente sur le territoire. Il est défini par une **intensité** et une **probabilité** :

- **Intensité de l'aléa** : il traduit l'importance de l'exposition aux polluants émis dans l'air et dans l'eau par la pratique de l'orpaillage. Ce **niveau d'exposition** est calculé à partir de la quantité d'arsenic, de cyanure et de mercure diffusé dans l'environnement. Il varie selon la quantité d'or extrait et le choix des technologies (tableau 24).

Tableau 24 : Calcul d'indicateur de risque d'exposition des populations (Intensité de l'aléa).

| EXP _{eau} | Quantité d'arsenic dissous dans l'eau par mgr | Cyanure dissous dans l'eau par mgr |
|--------------------|---|------------------------------------|
| 1 – Faible | 0 – 31 185 | 0 – 277 |
| 2 | 31 186 – 62 370 | 278 – 554 |
| 3 | 62 371 – 93 555 | 555 – 831 |
| 4 | 93 556 – 124 740 | 832 – 1 108 |
| 5 | 124 741 – 155 925 | 1 109 – 1 385 |
| 6 – Maximal | 155 926 – 187 110 | 1 386 – 1 663 |

| EXP _{air} | Mercure dissous dans l'air par gr |
|--------------------|-----------------------------------|
| 1 – Faible | 0 – 1 848 |
| 2 | 1 849 – 3 696 |
| 3 | 3 697 – 5 544 |
| 4 | 5 545 – 7 392 |
| 5 | 7 393 – 9 240 |
| 6 – Maximal | 9 240 – 11 088 |

- **Probabilité** : la probabilité d'occurrence de l'aléa évolue dans le temps, elle augmente avec le temps et à chaque tour de jeu (tableau 25). Les symptômes apparaissant au bout de plusieurs années.

Tableau 25 : Calcul d'indicateur de risque d'exposition des populations (Probabilité).

| Tour de jeu t _i | Probabilité d'occurrence | PROB _{t_i} |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1 | 10% | 1 |
| 2 | 20% | 2 |
| 3 | 30% | 3 |
| 4 | 40% | 4 |

| | | |
|----|------|----|
| 5 | 50% | 5 |
| 6 | 60% | 6 |
| 7 | 70% | 7 |
| 8 | 80% | 8 |
| 9 | 90% | 9 |
| 10 | 100% | 10 |

L'enjeu est lié à la présence humaine et à sa vulnérabilité. On suppose que plus la part de la population vulnérable par rapport à la population totale est grande, plus le système villageois dans son intégralité est vulnérable, et donc ne résiste pas aux impacts liés à la crise sanitaire.

$$ENJ_{\text{eau}} = (\text{enfants} + \text{femmes enceintes}) / \text{population totale}$$

$$ENJ_{\text{air}} = \text{orpailleurs} / \text{population totale}$$

Au premier tour, les enjeux sur l'eau et l'air se présentent comme suit (tableau 26):

Tableau 26 : Enjeux sur l'eau et l'air au premier tour.

| | |
|--------------------------|-------------|
| Population totale | 2000 |
| Enfants | 1160 |
| Femmes enceintes | 100 |
| Orpailleurs | 40 |
| ENJ_{eau} | 0,6 |
| ENJ_{air} | 0,02 |

D'où la règle de calcul suivante :

$$\text{RISQUE} = \text{PROB}_i \times [(\text{EXP}_{\text{eau}} \times \text{ENJ}_{\text{eau}}) + (\text{EXP}_{\text{air}} \times \text{ENJ}_{\text{air}})]$$

Cet indicateur "risque" évolue entre un min = 0,6 (situation initiale au démarrage du modèle) et un max = 48 (cas où l'ensemble des puits fonctionne et où les choix technologiques génèrent un maximum de polluants).

D'où l'échelle suivante (tableau 27):

D'où l'échelle suivante (tableau 27):

Tableau 27 : Echelle des niveaux de risque.

| Niveau de RISQUE | Index |
|------------------|-------------|
| 1 | 0,6 – 9,6 |
| 2 | 9,7 – 19,2 |
| 3 | 19,2 – 28,8 |
| 4 | 28,9 – 38,5 |

5.3.7. Un premier effort de modélisation : discussion sur la simplification/amplification

Sur la base de cette analyse ARDI, nous avons ainsi pu construire un premier modèle des "Dynamiques et Interactions" à l'œuvre entre "Acteurs et Ressources" sur un territoire marqué par une activité d'orpaillage grandissante. Ce premier modèle est présenté dans la figure 69 ci-après.

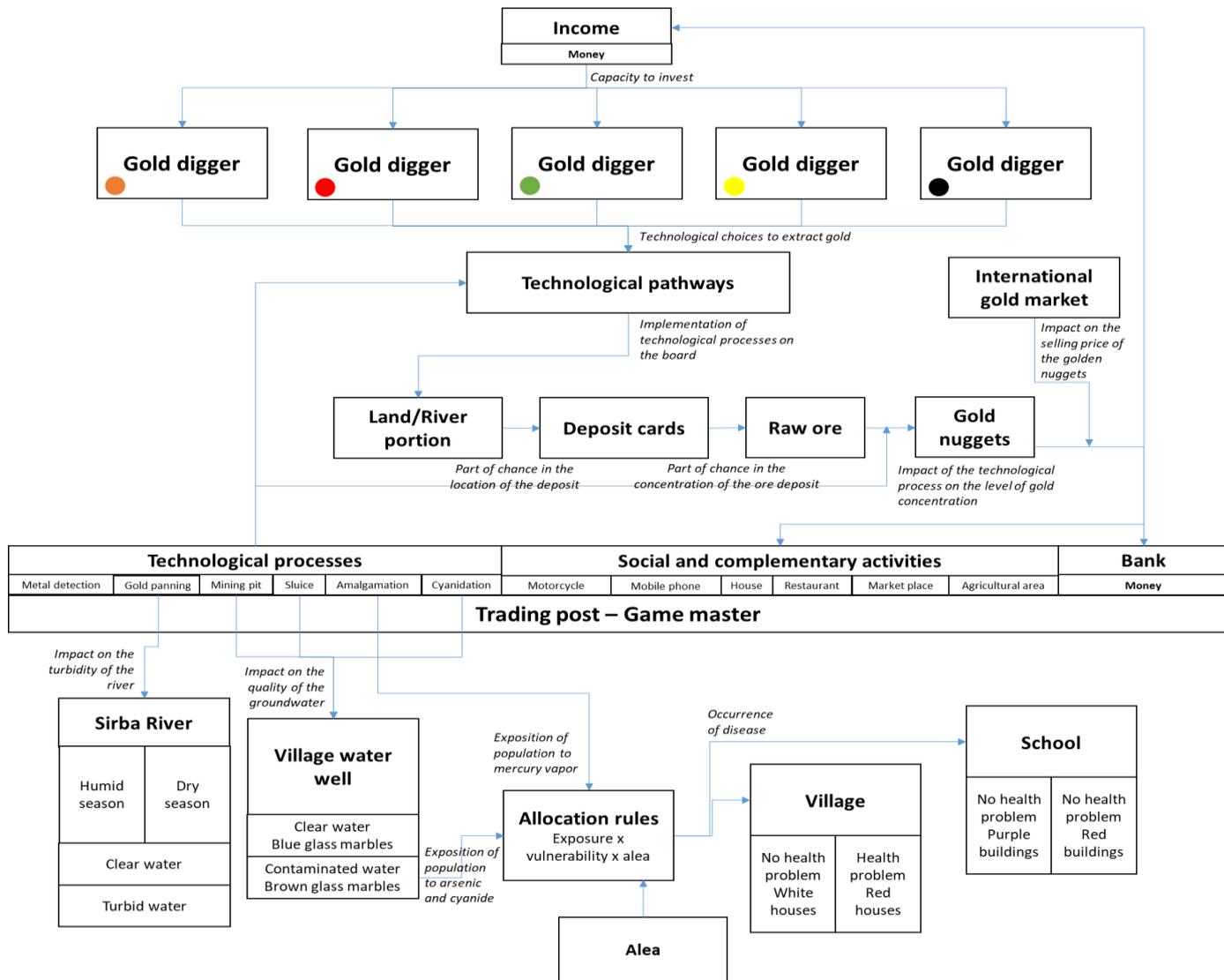


Figure 70 : Modèle des dynamiques et des interactions entre acteurs et ressources du territoire.

En prenant en compte la dégradation possible de la santé humaine, suite à la consommation d'une eau avec des teneurs importantes en éléments traces métalliques, le modèle présenté ici s'intéresse principalement aux impacts de l'exploitation minière artisanale de l'or sur les eaux de surface et souterraines en lien avec l'utilisation de substances chimiques comme le mercure, le cyanure et les acides nitrique et sulfurique lors de la récupération. Il intègre les enjeux sanitaires sur le territoire.

Or, selon le résultat de la cartographie des impacts de l'exploitation minière artisanale de l'or et celui de la contamination des eaux souterraines par les métaux traces, notamment l'arsenic, le manganèse, le baryum et le nickel, les enjeux environnementaux et sanitaires de cette activité touchent plusieurs secteurs et différents milieux naturels. Il n'est pas envisageable que le modèle proposé puisse intégrer tous les impacts socio-environnementaux comme le travail des femmes et des enfants, les conflits, les pollutions par les poussières, la dégradation du paysage ainsi que la complexité de l'activité notamment au niveau de l'application du cadre réglementaire.

Cette simplification de la réalité complexe des interactions socioécologiques à l'œuvre autour des activités d'orpaillage participe d'une dialectique « réduction – amplification » décrite par Bruno Latour (Figure 70).

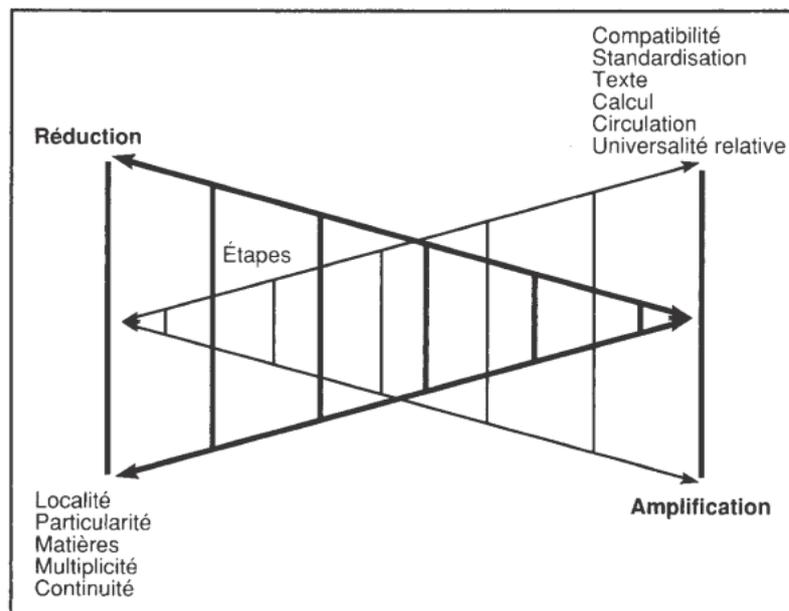


Figure 71 : Dialectique réduction – amplification (Latour, 1993).

Par la modélisation, nous perdons en particularité, en matérialité, en multiplicité, à tel point que, de toute cette complexité réelle, nous ne retenons plus que quelques tableaux et feuilles de calcul. Mais, Latour (1993) décrit qu'à travers cette dynamique de réduction de la complexité, ce travail de représentation et de modélisation permet d'obtenir beaucoup plus de visibilité, de compatibilité, de généralité en amplifiant certains phénomènes qui peuvent ne pas apparaître dans le brouhaha complexe de la réalité du terrain. Nous avons ainsi amplifié notamment les dynamiques

d'interactions entre les techniques d'orpaillage et leurs impacts sur les ressources et la santé humaine.

5.3.8. Du modèle au jeu sérieux « LIPTAKOR »

La modélisation s'insère dans un processus de médiation conduisant les acteurs locaux à partager leurs représentations et à envisager des actions possibles en lien avec leurs pratiques sur leur territoire (Collectif COMMOD, 2005). Elle participe ainsi d'une dynamique d'apprentissage collectif autour d'une problématique commune. L'approche socioconstructiviste des apprentissages montre que l'apprenant développe ses compétences par une démarche interactionnelle et réflexive avec son environnement. Elle rassemble, en particulier, l'ensemble des apprentissages relatifs à une activité coopérative, qui fixe les règles de fonctionnement de l'environnement social et culturel de l'apprenant. La notion de coopération fait référence à la poursuite d'un but supposé commun et à l'absence de connaissances mutuelles parfaites parmi les membres du groupe, ce qui exige une interaction communicative (Baker *et al.*, 2006). Cette approche ajoute les bénéfices de l'interaction sociale entre les apprenants lors de situations d'apprentissage collectif propices à la réorganisation des connaissances au cours du conflit cognitif (De Vries *et al.*, 2006) ou en situation d'incertitudes.

Cette médiation passe par le recours à un « objet-frontière », révélateur de collaboration et d'échanges entre des mondes sociaux hétérogènes. Cet « objet-frontière » a pour objectif de favoriser la création d'une signification commune à partir de représentations très différentes. Cet « objet-frontière » prend ici la forme d'un jeu sérieux. Il n'y a pas aujourd'hui de consensus autour de la définition de jeu sérieux. Nous défendons le parti-pris que le jeu comme outil d'apprentissage collectif s'inscrit au cœur des approches socioconstructivistes en offrant aux acteurs un espace privilégié pour expérimenter, sans risques, en se prémunissant des conséquences.

L'espace de jeu crée, représente le territoire du village avec les ressources et activités qui se développent. Il comporte des parcelles terrestres du socle du Liptako nigérien avec des indices d'or dispersés, des parcelles le long de la rivière *Dargol* destinés à l'exploitation à la battée et des espaces agricoles représentant la principale activité de la population et sa cohabitation avec les activités d'orpaillage. L'espace de jeu prend en compte la présence de points d'approvisionnement en eau de la population, des habitations et des écoles ainsi que la présence d'espaces arborés pour matérialiser les enjeux liés à la déforestation.

Les éléments physiques du territoire, présentés comme espace de jeu, sont en interaction les uns avec les autres pour permettre de mieux matérialiser les dynamiques de la libération des polluants et la contamination des eaux de surface et souterraines ainsi que les conséquences sur la santé humaine. En dehors des aspects de la contamination des ressources, cet espace de jeu prend en compte l'ensemble des interactions entre les acteurs locaux, notamment les conflits d'usage entre les agricultures et les orpailleurs et les enjeux de la déforestation. La monnaie virtuelle utilisée dans le jeu s'appelle AKO permet de matérialiser une partie de ses interactions. Un AKO représente 10 000 FCFA et est utilisée par les achats des choix technologiques et des matériels d'extraction, le paiement des ouvriers et de l'alimentation de la famille, le paiement des taxes et des divers biens personnels.

Le dispositif du jeu est ainsi construit, sur la base de données bibliographique et statistique nigériennes, ainsi que les observations de terrain, (Figure 71). Le but collectif du jeu est de parvenir à maîtriser les impacts des activités humaines du territoire sur la qualité des ressources en eau, en identifiant et adoptant des pratiques moins polluantes pour l'environnement et moins impactantes pour la santé humaine. La dynamique de jeu s'intéresse prioritairement aux processus de contamination des rivières et des eaux souterraines et leurs conséquences sur le milieu aquatique et la santé humaine. Le but individuel de chaque joueur est de maximiser ses revenus, garantir les conditions d'exploitation de son activité et d'étendre son activité sur des sites plus rentables.



Figure 72 : Transposition des données en éléments du jeu.

Ces différents éléments seront plus détaillés dans les figures qui suivront.

5.4. Evolution du modèle et accompagnement

5.4.1 Première étape : le jeu numérique

5.4.1.1 Description de l’outil numérique

Un premier plateau numérique a été conçu pour répondre aux contraintes liées à la Covid 19. Il représente spatialement le territoire organisé autour de la rivière *Dargol* qui est proche du site d’orpaillage de Komabangou. Il comporte des emplacements terrestres qui représentent des parcelles identifiables par les coordonnées en colonne et en ligne dont un espace occupé par un village avec un puits, deux espaces agricoles et quatre sites d’orpaillage légal (Figure 72). Les actions des joueurs vont avoir un impact sur l’occupation des sols, notamment les espaces naturels non exploités et les zones agricoles. Les échelles à droite du plateau (Figure 72) suivent les impacts de leurs actions sur la biodiversité comme la population de poissons et la qualité des eaux de surface et souterraines ainsi que la création de richesses locales.

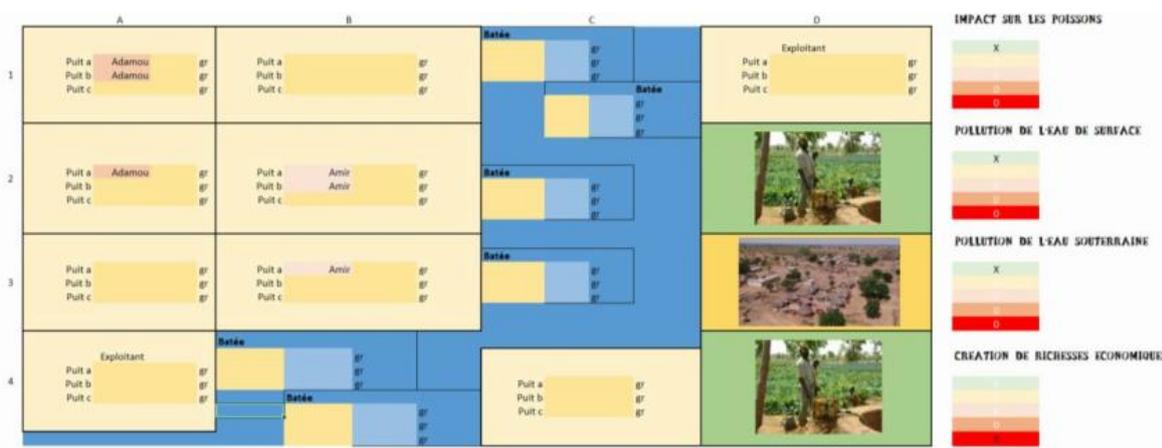


Figure 73 : Présentation du plateau numérique du jeu « LIPTAKOR ».

Des calculateurs Excel par joueur ont été élaborés et calibrés sur la base des informations recueillies sur le terrain et issues d’une recherche bibliographique sur les données du Niger. Des cartes de filons sont calibrées pour donner une plus grande chance d’obtenir un bon niveau d’extraction dans les espaces du territoire qui se trouvent sur le filon particulièrement riche. Il représente un générateur aléatoire de données sur le volume du minerai extrait par site et par puits. Chaque joueur doit disposer d’une carte acteur qui lui permet de suivre l’évolution de son activité et de ses choix technologiques tout au long de la partie du jeu (Figure 73). Ces cartes sont ainsi un élément d’observation supplémentaire lors de l’animation des débriefings. Elles définissent également les capitaux de départ de chaque joueur. Pour ce plateau numérique, les cartes

présentées concernent deux familles villageoises, deux orpailleurs légaux et un orpailleur clandestin.



Figure 74 : Carte « acteurs » comme élément de jeu et d’observation.

Les différents choix technologiques possibles des joueurs sont répertoriés dans un catalogue qui est transmis à chaque joueur. Ce catalogue sert de guide pour orienter les choix des joueurs, dans une optique d’optimisation économique et environnementale de leur activité (Figure 74).

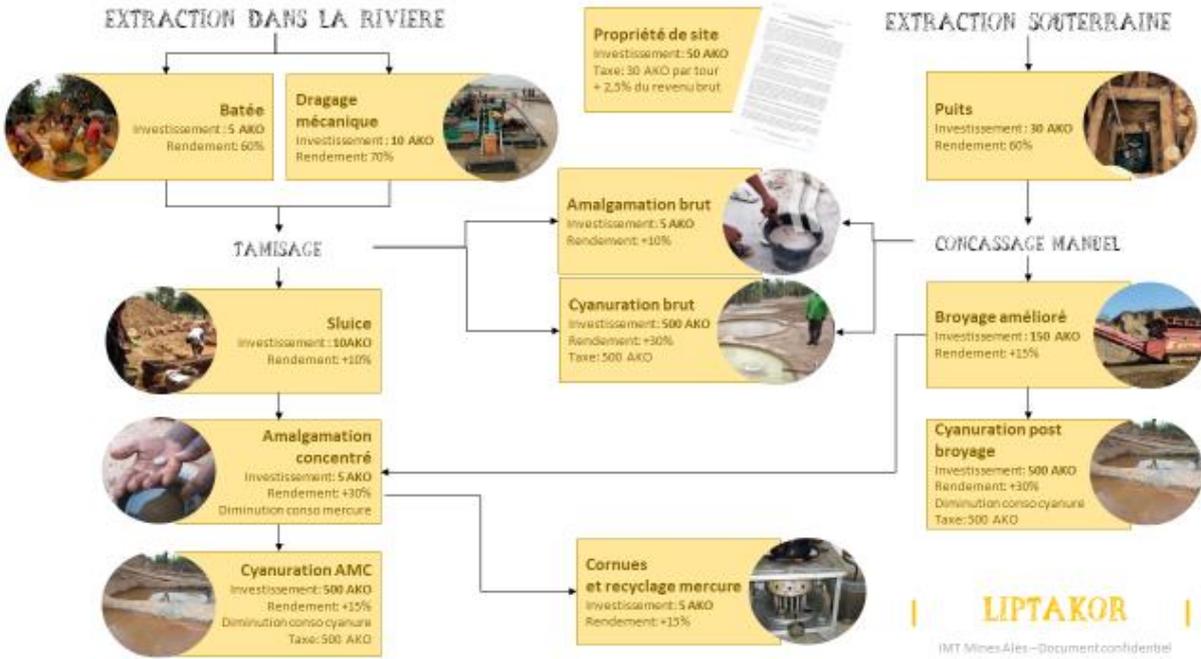


Figure 75 : Catalogue des choix technologiques.

Les cartes des actions concernent l’extraction à la battée, l’amalgamation, la cyanuration, les puits d’extraction, les filons de quartz, les puits d’extraction, la pompe d’exhaure et les propriétaires de site ou de zone de culture. La monnaie utilisée pour les investissements, revenus et les négociations monétaires entre les joueurs, est une monnaie entièrement virtuelle.

Tableau 28 : Répartition des cartes d’acteurs et les ressources attribués au démarrage du jeu.

| | |
|-----------------------|--|
| Famille villageoise 1 | 1 carte « propriété d’un ha cultivable » |
|-----------------------|--|

| | |
|-----------------------|---|
| | 5 AKO |
| Famille villageoise 2 | 2 cartes « propriété d'un ha cultivable » 10 AKO |
| Orpailleur légal 1 | 1 carte « propriété d'un puits d'extraction » 15 AKO 1 carte filon |
| Orpailleur légal 2 | 2 cartes « propriété d'un puits d'extraction » 45 AKO 1 carte filon |
| Orpailleur clandestin | 35 AKO |

5.4.1.2 Premier crash test

La mobilisation des parties prenantes de l'orpaillage dans la création du dispositif et son évolution a été réalisée dans un premier temps avec les acteurs de l'administration publique, des ONGs et un représentant des syndicats des orpailleurs. En tant que partie prenante, ils sont directement concernés par l'exploitation minière artisanale de l'or dans le Liptako nigérien. Deux sessions de jeux ont ainsi été organisées en co-animation à distance et sous les contraintes liées au COVID19. L'objectif de ces sessions dites « crash test » est de pratiquer le jeu avec les principaux acteurs en vue de le tester et de recueillir leurs appréciations et leurs recommandations d'amélioration. Un dispositif d'observation (basé sur une prise de note systématique) a été mis en place afin de recueillir un maximum d'informations verbales et non verbales pour évaluer l'atteinte de ces objectifs.

Le premier crash test a été réalisé en septembre 2020, avec la participation en présentiel, du représentant du directeur de l'environnement minier au ministère des mines du Niger, du responsable intervenant dans la promotion de la paix au Sahel, du chef de projet ressources extractives de l'ONG, du chargé de communication de l'IRD à Niamey et d'un doctorant travaillant sur les ressources en eau au Niger (Figure 75). Trois enseignants de l'IMT Mines Alès ont participé en distanciel, pour la co-animation et la prise de notes ainsi que le partage et l'utilisation du plateau numérique du jeu et le tableur numérique de calcul par joueur.

Après une présentation sur le contexte de la thèse, le résultat obtenu dans les zones d'orpaillage sur la question des polluants métalliques et l'objectif du jeu sérieux, le maître du jeu a expliqué le plateau du jeu qui représente un territoire et les autres éléments du jeu, notamment les cartes acteurs, les catalogues et l'utilisation de la monnaie virtuelle. Les étapes du déroulement du jeu ont explicité et le maître du jeu a demandé aux joueurs de choisir librement le rôle qu'ils veulent jouer. La session du crash test avait commencé avec l'attribution de rôles, du capital et des

éléments du jeu à chaque joueur et le jeu s'est déroulé à tour de rôle pendant une session complète. Après chaque passage, le maître du jeu lance le calcul aléatoire des cartes filons et informe le joueur de la quantité de minerai d'or brut produite. Le joueur procède ensuite au choix technologique qu'il souhaite mettre en place. Ces ambitions peuvent être liées à l'ouverture de nouveaux puits ou placer une nouvelle équipe pour la battée enfin d'augmenter la chance d'accroître ses ressources ou même d'acquérir une nouvelle autorisation d'exploitation artisanale de l'or. Cette étape peut faire l'objet des discussions et de négociations entre les différents joueurs sur l'occupation des nouveaux sites et aussi sur les choix technologiques. Pour chaque joueur, les investissements retenus ainsi que les échanges monétaires sont renseignés dans le calculateur et son revenu final lui ait transmis discrètement par le maître du jeu.



Figure 76 : Session du jeu numérique « LIPTAKOR ».

A l'issue du premier tour de jeu, les échelles ont été renseignées automatiquement, et ont permis aux joueurs de constater l'impact de leurs activités sur les indicateurs environnementaux et économiques. Les chiffres d'extraction par puits ou à la battée sont remis à zéro et le prochain tour de jeu peut commencer. Au bout de plusieurs séries de jeu, les impacts négatifs sont visibles sur le territoire et à travers les indicateurs. La partie prend fin lorsque l'ensemble des sites est exploité.

A la fin de la session du jeu, au moment du débriefing, des questions ont été posées aux joueurs pour recueillir leurs avis sur leurs ressentis par rapport à ce qu'ils ont vécu pendant la session et aux améliorations à apporter pour l'amélioration du plateau numérique.

5.4.1.3 Conclusion du crash test plateau numérique

Le premier crash test a permis d'évaluer l'efficacité de l'utilisation du plateau numérique pour comprendre les enjeux environnementaux et sanitaires sur le territoire et aussi pour recueillir les critiques constructives et prendre de recul sur la finalisation de l'outil ou même son actualisation. En premier lieu, la session du jeu a permis de recueillir des difficultés d'animation et d'appliquer l'outil numérique. La principale difficulté rencontrée lors de la session du jeu concerne l'affichage du plateau numérique et du calculateur et le transfert des résultats au maître du jeu. Cette technique initialement prévue lors de l'animation n'a pas pu véritablement se réaliser à distance à cause des contraintes techniques. Le plateau numérique n'était pas totalement associé au calculateur, ce qui nécessite un remplissage manuel qui pourrait être une source d'erreur ou de mauvaise manipulation. Le calculateur ne permet pas aussi de visualiser de manière claire la variation de couleur des indicateurs de la dégradation de la santé humaine et de l'environnement.

A la fin de la session, les participants ont fait une bonne appréciation de l'outil tout en questionnant son adaptation pour un transfert des connaissances efficaces vers les orpailleurs et la possibilité de les toucher directement pour les sensibiliser et les impliquer.

« Mon sentiment, c'est : le jeu s'adresse à qui ? qui veut-on sensibiliser ? s'il s'agit des orpailleurs, est-ce que c'est possible ? est-ce qu'ils vont comprendre ? » (Propos recueillis auprès des participants au crash test, septembre 2021)

Le catalogue des choix technologiques, en particulier, nécessite une lecture et une compréhension de la technique à utiliser. Ce qui ne facilitera pas son appropriation par la population cible qui est constituée principalement des orpailleurs analphabètes. Les participants se sont accordés sur l'intérêt de revenir à un plateau physique : *« le jeu gagnerait à être plus physique avec un plateau sur une bâche par exemple, à rouler et à dérouler »* (Propos recueillis auprès des participants au crash test, septembre 2021).

Parmi les autres pistes d'amélioration qui ont été mentionnées dans ces échanges, nous retiendrons :

- La mise en évidence des processus à l'œuvre liant les choix technologiques aux impacts
- Le caractère non-pertinent voire contre-productif de distinguer les orpailleurs clandestins des orpailleurs légaux : *« curieusement, je suis rentré dans l'esprit du clandestin. Les clandestins sont fatalistes. [...] Donc je suis resté dans la clandestinité »* (Propos recueillis auprès des participants au crash test, septembre 2021). Ce crash test a ainsi permis de

comprendre qu'il n'était pas nécessaire de garder la distinction entre les deux catégories des orpailleurs (légaux et clandestins) : recourant aux mêmes techniques, ils participent tous de la même manière à la diffusion des polluants dans l'environnement et à l'exposition sanitaire. De plus, cette distinction des orpailleurs légaux et clandestins crée une complexité dans l'évolution du jeu et ne permet pas aux joueurs de se focaliser sur le principal objectif du jeu, en termes de la pollution des ressources en eau disponible liée à l'orpaillage.

Ainsi, à l'issue de ces premières sessions de jeu, nous avons décidé de transformer le jeu numérique en plateau physique tout en gardant le calculateur et de surseoir sur la distinction entre les orpailleurs légaux et clandestins.

5.4.2 Deuxième étape : le jeu de plateau

Le dispositif physique a été conçu pour répondre aux recommandations du premier crash test. L'objectif reste inchangé concernant la sensibilisation et d'implication des acteurs liés aux activités d'orpaillage concernant les pollutions dues à l'utilisation de substances chimiques et à la diffusion d'éléments naturels toxiques ayant un impact sur l'environnement et la santé humaine. Il prend en compte uniquement les enjeux environnementaux et sanitaires de l'orpaillage avec un regard particulier sur la pollution des ressources en eau sur le territoire. Il ne prend pas en compte les exploitations légales ou clandestines, ni les familles villageoises.

5.4.2.1 Description de l'outil physique

Les éléments du plateau se présentent comme suit (Figure 76) :

- Les **espaces végétalisés** (au sud du plateau) sont représentés par des cartes amovibles ; permettant aux joueurs de renoncer à ces espaces au profit de l'orpaillage ;
- Le **village** est positionné sur une des rives de la rivière ;
 - Les maisons blanches ont une exposition faible aux risques sanitaires,
 - Les maisons rouges ont une exposition forte aux risques sanitaires,
- L'**école** est positionnée au nord du village et est représentée par 6 salles de classe (maisons violettes).
- L'**eau de surface** et l'**eau souterraine** sont matérialisées sur le plateau par :

- La rivière, située au nord-ouest du plateau, qui est représentée par des courants (flèches) des billes ;
 - Le puits d'eau situé à proximité du village est représenté par un gobelet rempli des billes. On suppose que l'eau souterraine suit le sens d'écoulement de l'eau de surface et que les pollutions en amont du puits affectent la qualité de l'eau.
- Le **sens du vent** est représenté par une manche à air en bas du plateau, afin de pouvoir prendre en compte l'orientation des vapeurs de l'amalgamation.

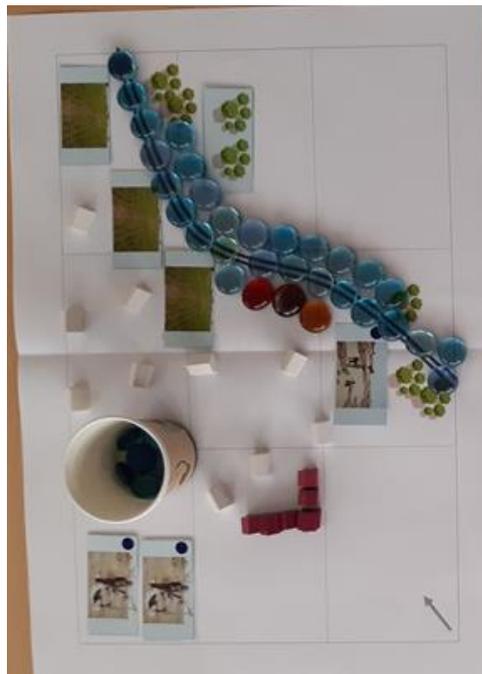


Figure 77 : Plateau physique du jeu.

En dehors du plateau physique de jeu, les autres éléments sont constitués des éléments suivants :

- Des **jetons au couleur des différents joueurs représentant leur emplacement dans l'extraction de l'or** avec des puits ou les batées ainsi que les ouvriers qui y travaillent ;
- Des **pierres marron** représentant le minerai ;
- Des **pierres jaunes** représentant les pépites d'or ;
- Des **cartes billets**, de différentes coupures, qui représentent la monnaie, réparties selon les revenus des joueurs ou les pépites d'or produites. Le cours de l'or peut changer à chaque tour de jeu et le gestionnaire du comptoir sera en charge de faire un tirage pour attribuer un prix de l'or.
- Des **cartes « Choix technologiques »** permettent de représenter les choix technologiques des joueurs et de les positionner sur le plateau en prenant en compte (ou pas) le sens d'écoulement des eaux, le sens du vent, et la proximité des populations :

- Broyage mécanique,
- Gravimétrie,
- Amalgamation brute ou post broyage mécanique,
- Cyanuration brute ou post broyage mécanique ou post amalgamation.

Un calculateur permet de calculer les indicateurs des externalités négatives. Des cartes de filons, représentant le gisement, sont positionnées en même temps que le plateau du jeu et respectent la répartition sur le plateau pour faire un tirage au sort aléatoire de l'or prélevé (Figure 77).



Figure 78 : Cartes de filon.

Ce plateau est accompagné d'un comptoir physique destiné à l'achat des choix technologiques, aux ventes d'or extrait et aux négociations..

5.4.2.2 Deuxième crash test

Le deuxième crash test a été également réalisé au Niger, en janvier 2021 et co-animé avec les enseignants de l'IMT Mines Alès en distanciel dans la salle des réunions de l'IRD à Niamey. Son objectif était double :

- Tester la praticabilité de l'outil physique après l'intégration des recommandations issues du premier crash test ;

- Evaluer le potentiel de transfert de connaissance et d'apprentissage auprès d'un public d'institutionnel.

Parmi les participants en présentiel, on comptait du directeur de l'environnement minier du Ministère des Mines du Niger, deux représentants d'une ONG qui intervient dans la promotion de la paix au Sahel, du responsable Ressources Extractives du Projet d'Appui à la Compétitivité et à la Croissance (PRACC) et du Chargé de Communication de l'IRD à Niamey (Figure 78). Les joueurs se sont répartis les rôles d'orpailleurs et une personne a pris le rôle de Chef de village, en charge de négoce de l'or, du marché des outils, du tirage des cartes « cours de l'or ».



Figure 79 : Session du jeu de plateau « LIPTAKOR ».

Pour chaque joueur, les investissements retenus ainsi que les échanges monétaires sont renseignés dans le calculateur et son revenu final lui ait transmis discrètement par le maître du jeu.

Etapes du déroulement du premier tour de jeu :

- Les orpailleurs qui ont des puits ou des bâtées tirent la carte « Filons » ;
- Le maître du jeu distribue les pierres de minerais et les positionne sur chaque carte « Puits » placée devant les joueurs. Il compte le nombre total de minerais extraits par la bâtée (B) et dans les puits (P) ;
- Les orpailleurs font passer leurs minerais dans le parcours technologique dont ils disposent pour obtenir leurs pépites. Le maître du jeu compte le nombre de minerais qui sont passés par la gravimétrie (G) et distribue les pépites en contrepartie du minerai ;
- Le chef du village tire sa carte « Cours de l'or » ;

- Les orpailleurs vont voir le chef du village pour avoir de l'argent en contrepartie de leurs pépites ;
- Les orpailleurs procèdent aux choix technologiques qui seront valables pour le prochain tour :
 - o Investissements dans un nouveau puits,
 - o Investissements dans de nouvelles technologies.
- Le maître du jeu renseigne le tableur puis place les billes marrons sur le plateau, qui désigne le degré de contamination des ressources en eau ;
- Le chef de village lance le dé pour connaître le nombre de maisons réellement affectées par l'arsenic (1-3 pas affecté ; 4-6 affecté).

En dehors du renseignement du tableur sur la contamination des eaux, le maître du jeu est en charge du calcul de la probabilité d'apparition des impacts sanitaires et de la mort des poissons dans les rivières. Il faut noter que le degré de la contamination des eaux de surface ou souterraines dépendent du choix technologique des joueurs. Au total, trois tours de jeu ont été réalisés lors de la session et chaque tour correspond à 5 ans d'exploitation artisanale de l'or, soit 15 années d'extraction.

5.4.2.3 Conclusion du crash test du plateau physique

Un dispositif d'observation a permis de recenser les informations verbales (prise de note systématique) et non verbales (Figures) pour évaluer les deux objectifs de la session à savoir l'évaluation de l'ergonomie du jeu et sa capacité de transfert de connaissances.

Afin d'évaluer le rôle du dispositif dans le transfert de connaissance et l'apprentissage des impacts environnementaux et sanitaires de l'orpaillage, nous avons au préalable demandé aux participants de se prononcer sur les plus grands dangers des pratiques artisanales. Il ressort une prédominance de préoccupations sociales liées à l'orpaillage clandestin :

*« Les dangers sont multiples. [...] Le problème du manque de réhabilitation de ces sites-là, cela pose des **risques sociaux**, des risques de **conflits** entre exploitation minière et artisanale, **tensions** entre des ethnies, entre les exploitants et les propriétaires terriens, les **violences** sur les gens entre autres. »* (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021).

« *Le danger, c'est surtout la création d'une zone de non loi. C'est la loi de la jungle sur la majorité des sites. On note aussi l'absence de l'état sur certains sites.* »

(Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021)

« *Un autre aspect est lié à la **dépravation des mœurs**. Sur les sites, les mœurs sont flouées complètement.* » (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021).

« *J'ajouterais aussi que malheureusement nous sommes dans des contextes et des situations où nous avons à faire à **l'analphabétisme**, la **non maîtrise des enjeux sociaux**... avec des comportements qu'on peut qualifier d'innocent... »*

« *Ils n'ont pas de papiers.* » (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021).

Les enjeux environnementaux et sanitaires n'apparaissent donc pas spontanément dans les propos recueillis avant la session de jeu.

Pendant la session de jeu, nous avons tenté de recenser les éléments verbaux et non verbaux rendant manifeste une dynamique d'apprentissage à l'œuvre entre les participants et le dispositif (tableau 29).

Tableau 29 : Eléments verbaux et non verbaux.

| Tour | Eléments non verbaux | Eléments verbaux |
|-------------|--|--|
| Tour 1 | Rire face au hasard de la teneur en or du gisement Déplacement des joueurs autour du plateau Volonté de prendre en main les éléments de jeu (tirer son propre gisement) | Des questions sur le coût des investissements « <i>Dans quel sens elle coule, la rivière ?</i> » - influence pour positionner la batée par rapport à la turbidité existante |
| Tour 2 | Satisfaction/insatisfaction (« <i>décidément !</i> ») face au tirage du gisement Choix de deux joueurs de changer d'activités pour investir dans l'agriculture | « <i>C'est le village ?</i> » - éléments de réflexion pour positionner le puits « <i>C'est quoi la gravimétrie ?</i> » - un joueur explique à un autre joueur le principe de la sluice. « <i>cela n'a rien à voir avec la rivière ?</i> » Demande de précision sur le fonctionnement du nombre de billes et le fichier Excel Prise de conscience de la variabilité du cours de l'or |
| Tour 3 | Positionnement de l'activité agricole à côté de la rivière, loin de l'activité d'orpillage Les nouveaux agriculteurs dissuadent l'orpilleur de positionner un puits à proximité des champs. | Demande d'informations sur l'optimisation du process par rapport aux choix technologiques (amalgamation) « <i>Comme la rivière à l'air polluée, je ne vais pas le mettre à côté. Je vais le mettre à côté du puits du village.</i> » |

On constate que, dans la prise en main progressive du dispositif de jeu, et par l'expression d'un certain nombre de questionnements, les joueurs affinent progressivement leurs stratégies vers une meilleure prise en compte des enjeux environnementaux et sanitaires. Et ce constat est également exprimé après la session de jeu, lors de la phase de débriefing : « *On se rend compte au début qu'il y avait des trucs qu'on n'avait pas compris. La compréhension des règles se fait chemin faisant. Le mieux on connaît les règles, le mieux on peut jouer.* » (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021). Cet apprentissage semble ainsi participer d'une prise de conscience des interdépendances et d'une vulnérabilité commune autour des enjeux environnementaux et sanitaires de l'orpaillage : « *On voit la relation entre ceux qui ne sont pas concernés par l'orpaillage (habitant du village) et les orpailleurs et que les dégâts sont partagés.* », « *On voit la relation entre les activités d'orpaillage et les pollutions environnementales générées.* » (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021). Le plateau du jeu semble donc plus adapté à la réalité du terrain des zones d'orpaillage dans le Liptako nigérien et à la typologie des orpailleurs et permet ainsi d'une manière claire à mettre en évidence les enjeux environnementaux et sanitaires de l'orpaillage notamment sur la question de la contamination des eaux. Les observations visuelles, à travers la présence des billes marrons, dans les eaux de surface et souterraines montrent clairement les enjeux de la turbidité des rivières et de la contamination des eaux de boisson. L'apparition de certaines maladies en lien avec la consommation des eaux constitue des facteurs d'inquiétude des orpailleurs, des responsables des villages et de la population environnante. Après 15 ans d'extraction, le plateau physique du jeu a changé de couleur avec l'apparition des billes marron, signes de la dégradation des eaux et du milieu naturel.

Et au-delà de cette prise de conscience, les échanges manifestent la volonté de trouver des solutions pour y remédier, avec deux postures complémentaires :

- Une approche qui s'en remet à la responsabilité des autorités gouvernementales : « *quand le village devient rouge, il faut agir. Un pouvoir public doit agir.* » (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021)
- Une approche en faveur d'une mise en capacité des populations locales : « *Comment faire pour que l'orpailleur et l'habitant puissent apprécier lui-même que son activité a un impact sur son milieu ? comment peut-il être acteur du suivi et du contrôle de la pollution ? le changement de couleur de l'eau, l'orpailleur voit le changement de couleur.* » « *Il faudrait pouvoir tester l'eau extraite l'eau du puits. Sinon, cela peut aussi générer d'autres problèmes sur la santé de la population elle-même.* » (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021)

Quant à la pertinence du format et de l'ergonomie du dispositif de jeu, ce deuxième crash test avec les parties prenantes locales de l'orpaillage a permis de valider le jeu de plateau. A été notamment souligné :

- L'intérêt pour le format : « *Cela peut attirer beaucoup de monde, cela permet d'acquérir des connaissances à travers ça. Et cela peut entraîner des changements sur le terrain.* », « *C'est un outil parlant.* » (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021)
- Le lien avec le réel : « *Certains sont devenus riches, d'autres un peu moins. On se trouve dans une situation où la population est affectée, la turbidité de l'orpaillage est forte. Cela reflète la situation actuelle après 30 ans d'exploitation d'orpaillage.* » (Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021)

Enfin, de nouvelles pistes d'améliorations du jeu de plateau ont été suggérées, pour intégrer de nouveaux éléments dans le jeu sur une bonne explication des étapes du jeu tels que de nouvelles activités économiques (station-service, vente d'eau), des activités de contrôle (présences de gendarme et hasard des contrôles), ainsi que des actions durables (actions de remédiation).

5.5 Atelier de formation et de sensibilisation des acteurs de l'orpaillage avec « LIPTAKOR » et un dispositif d'animation et d'observation

5.5.1 Description de l'atelier des orpailleurs

Un atelier des orpailleurs a été organisé le 6 juillet 2021 avec pour objectif affiché de :

- les former et les sensibiliser sur les enjeux environnementaux et sanitaires de l'exploitation minière artisanale de l'or,
- les amener à réfléchir à des initiatives qu'ils peuvent eux-mêmes porter pour protéger l'environnement, les terres agricoles, les ressources en eau du territoire et de la santé humaine et animale.

Les personnes ont été mobilisées sur sept sites d'orpaillage du Liptako nigérien. Vingt-deux participants étaient ainsi présents dont quinze hommes et sept femmes, en considérant trois (3) membres par site, dont une femme et deux (2) hommes ainsi que le responsable de la radio locale. Dans le cadre de notre recherche, cet atelier avait pour objectif fondamental d'évaluer la capacité du dispositif dans le transfert de connaissances entre recherche et terrain sur les enjeux environnementaux et sanitaires des activités d'orpaillage.

5.5.2 Animation et déroulement de l'atelier

L'atelier a été animé en plusieurs activités pour renforcer les capacités des participants sur la connaissance des effets et des impacts de l'orpaillage sur l'environnement et la santé et pour faciliter les échanges et l'appropriation des connaissances en utilisant l'objet-frontière qu'est le jeu sérieux « LIPTAKOR ».

5.5.2.1 Phase de renforcement des capacités des participants

Elle a été animée à travers trois activités qui sont :

- i. Le rappel des normes environnementales et réglementaires en vigueur sur l'exploitation minière artisanale de l'or au Niger ;
- ii. L'établissement d'une fresque de l'environnement minier basée sur l'intelligence collective, pour mieux comprendre la situation de référence des connaissances sur : la dégradation de l'Environnement, les terres agricoles, les ressources en eau et de la Santé humaine et animale ;
- iii. La présentation powerpoint sur les effets et les impacts négatifs de l'orpaillage sur : l'Environnement, les terres agricoles, les ressources en eau et la Santé humaine et les animaux ;

Après chaque étape, une évaluation sur la perception des risques environnementaux par les acteurs est réalisée.

Pour cette partie, les matériels utilisés sont constitués de :

- un jeu de photo imprimé en deux exemplaires ;
- un tableau avec un rouleau de papier kraft ;
- une laine pour les liens avec un scotch ;
- des post-its de couleur rouge jaune et bleu.

5.5.2.2 « Fresque » de l'environnement minier

L'objectif est de parvenir à bien comprendre le dérèglement de l'environnement dans le domaine de l'exploitation minière artisanale de l'or. Pour mieux sensibiliser et informer les acteurs, il faut d'abord comprendre les enjeux environnementaux et sanitaires du territoire. La première étape a commencé par la présentation d'un jeu de 28 images qui montrent les effets et les impacts de

l'orpaillage sur l'environnement, les terres agricoles, les ressources en eau et la dégradation de la santé animale et humaine (Figure 79).



Figure 80 : Présentation d'un jeu de 28 images.

Cette activité s'est réalisée en trois étapes :

- i. Présentation des images recueillies sur les différents sites concernés et les sites environnants, concernant les questions de l'environnement, des terres agricoles, les ressources en eau et des aspects sanitaires liés à l'orpaillage ;
- ii. Choix confidentiel d'une ou deux photos par chaque participant ;
- iii. Tour de table pour permettre à chaque participant d'expliquer les raisons de son choix. Ce choix peut être rattaché à une histoire vécue, en termes d'émotion, de questions, etc.).

La deuxième étape a permis à chaque participant d'expliquer son choix sur l'image choisie et de la rattacher à une histoire personnelle, en termes d'émotion ou de question. Elle a également permis de croiser les réponses obtenues sur chaque image et de voir les différences entre les discours sur une même photo afin de dresser une liste des risques.

A l'issue des choix, la liste suivante des vingt-deux (22) principaux risques liés à l'exploitation de l'or dans le Liptako nigérien a été dressée :

1. Risque lié à l'utilisation du mercure,
2. Risque d'exposition à la pollution des eaux,
3. Risque d'exposition par rapport aux effluents et résidus d'extraction,

4. Risque d'exposition sanitaire des orpailleurs,
5. Risque d'exposition sanitaire des femmes et des enfants liés à la cohabitation entre les activités d'orpaillage et la population,
6. Risque de consommation d'une eau cyanurée par les humains et les animaux,
7. Risque d'exposition humaine par la poussière (cas des maladies pulmonaires) et la contamination de l'air ambiant,
8. Risque d'exposition à la poussière dans les habitations,
9. Risque de destruction du couvert végétal et du paysage,
10. Risque de la contamination des produits alimentaires et de la fertilité des sols,
11. Risque de la perte de la végétation,
12. Risque d'exposition sanitaire des enfants,
13. Risque d'exposition des enfants aux risques d'accident et à la poussière lié à la fragilité de leur organisme,
14. Risque lié au contact avec les substances chimiques utilisées lors de l'extraction,
15. Risque d'exposition des femmes sur les sites de la gravimétrie et lors des concassages du minerai,
16. Risque de destruction des terres végétales,
17. Risque de chute des animaux dans les puits abandonnés,
18. Risque de contamination des eaux de surface et de la consommation de cette eau par les animaux qui pâturent autour dans la zone,
19. Risque d'accident de travail (lié aux techniques utilisées et aux manques des équipements de protection individuelle),
20. Risque d'éboulement et d'effondrement des puits non soutenus,
21. Risque d'exposition lié à la contamination des eaux souterraine d'exhaure,
22. Risque de conflit entre les orpailleurs / éleveurs / agriculteurs.

La troisième étape a consisté à faire un débriefing sur le résultat obtenu et de regrouper les risques (Figure 80) en vue de les classer dans l'ordre et par le degré d'importance à travers un vote par couleur (Figure 81) dont :

Rouge : représente le risque maximal,

Jaune : représente un risque moyen,

Bleu : représente l'absence de risque.



Figure 81 : Classement des principaux risques par les participants.



Figure 82 : Vote par couleur.

La dernière étape a permis de tracer le lien qui existe entre les images. Cet exercice a fait l'objet d'échanges entre les participants, notamment sur les différentes perceptions des risques liés à certaines images. Le classement final a tenu compte des différentes étapes d'extraction du minerai de l'or et de sa récupération.

5.5.2.3 Apport de connaissance

L'apport de connaissances a été réalisé à partir d'une présentation powerpoint sur les enjeux et les impacts de l'orpaillage sur l'environnement, les ressources en eau, la santé humaine et animale et les terres agricoles. L'objectif est d'informer et de sensibiliser les participants sur les impacts

générés par l'exploitation artisanale de l'or à chaque phase de l'activité. Elle a permis aux participants à travers des images et des vidéos projetées de mieux comprendre les enjeux et les impacts de l'orpaillage à l'échelle du continent africain en général, et dans les sites d'orpaillage du Liptako nigérien en particulier. A la fin de la présentation une série de questions a été posée aux participants pour recueillir leurs perceptions entre les risques énumérés dans la présentation et la liste des risques précédemment établie.

5.5.2.4 Jeu sérieux « LIPTAKOR »

Les vingt-deux participants ont été répartis en équipes de onze personnes chacune et les rôles sont joués par binôme, donnant ainsi cinq binômes d'orpailleurs et 1 chef de village en charge du négoce, par session de jeu (Figure 82 et 83). Après l'installation du dispositif du jeu et du comptoir, le maître du jeu donne un aperçu global du déroulement du jeu et explique le plateau du jeu. La première équipe s'était installée autour du plateau du jeu pour la première session et l'animateur explique les rôles de chaque binôme et la répartition des richesses et des ressources au démarrage du jeu. Cette session a duré 1h15 minutes, suivi d'un débriefing de 40 minutes sur le vécu du jeu, la stratégie utilisée par les joueurs, les choses qui les ont étonnés ou qu'ils n'ont pas bien compris, ainsi que le lien entre le jeu sérieux et la réalité du terrain. La deuxième session du jeu s'est déroulée dans les mêmes conditions que la première avec la deuxième équipe.



Figure 83 : Dispositif du jeu.



Figure 84 : Comptoir d'achat du choix technologique et divers matériel.

A la fin de chaque session du jeu, des questions sont posées aux participants et permettent de recueillir les avis.

5.5.3 Description du dispositif d'observation

L'objectif de l'atelier était donc d'évaluer la capacité du dispositif à favoriser le transfert de connaissances entre recherche et terrain sur les enjeux environnementaux et sanitaires de l'orpillage. Afin de recueillir l'évolution des perceptions et des apprentissages tout au long de l'atelier, un dispositif d'observation a été mis en place composé des éléments suivants :

- Enregistrement audio,
- Enregistrement vidéo,
- Prise de photos,
- Prise de note systématique.

Ce dispositif a ainsi eu pour objectif de recueillir l'ensemble des éléments verbaux et non verbaux manifestant une évolution des connaissances et des apprentissages. Nous nous sommes ainsi inspirés des grilles d'observation proposées par Hassenforder *et al.* (2020) en recueillant en particulier les phrases exprimant les savoirs, les connaissances et les perceptions (« cela a attiré mon attention », « j'ai compris que... », « Je ne savais pas que... », « cela m'étonne que... ») ainsi que les questions de compréhension qui ont pu être formulées. Nous avons également prêté une

attention particulière aux comportements des personnes présentes et à l'influence qu'ils pouvaient avoir les uns sur les autres dans ce processus d'acquisition des connaissances.

A l'issue de l'atelier, l'ensemble de ces données collectées a été retranscrit et traduit, dans la limite de notre capacité à entendre et comprendre les propos recueillis. Nous présentons ici les premiers résultats de l'analyse de ce matériel.

5.5.4 Evolution des connaissances et des pratiques des orpailleurs

Il est question dans cette section de faire le point sur l'identification et la perception des orpailleurs autour des enjeux sanitaires et environnementaux liés aux pratiques artisanales d'orpaillage avant la séance du jeu sérieux, puis d'évaluer leur façon d'appréhender ces risques après le transfert des nouvelles connaissances.

5.5.4.1 L'identification et la perception des risques par les orpailleurs autour de l'orpaillage artisanal au démarrage de l'atelier

L'activité d'orpaillage artisanal, en dépit des revenus qu'elle procure pour les pays et les orpailleurs, comporte des impacts nocifs sur la santé humaine, animale et environnementale. Au cours de l'atelier avec vingt et un (21) orpailleurs venus des sept (7) sites différents plusieurs risques liés à l'exploitation artisanale de l'or ont été énumérés. En sus, ces orpailleurs s'accordent pour prioriser ces risques en fonction de leur importance. Entre autres treize (13) risques ont été retenus et classés selon leur degré d'importance à savoir :

- le risque lié à l'utilisation du mercure ;
- le risque d'exposition au cyanure ;
- le risque de consommation d'une eau cyanurée par les humains et les animaux ;
- le risque de destruction du couvert végétal ;
- le risque de contamination des eaux souterraines ;
- le risque d'exposition sanitaire ;
- le risque d'accident de travail ;
- le risque de contamination des eaux de surface ;
- le risque d'exposition sanitaire des femmes et des enfants ;
- le risque d'exposition par les effluents et les résidus ;

- le risque d'exposition à la poussière ;
- le risque lié aux effondrements et aux éboulements ;
- le risque lié à l'activité agricole.

Il reste entendu qu'en Afrique l'exploitation artisanale de l'or demande l'utilisation des produits chimiques pour faciliter le traitement et la récupération de l'or. Parmi ces substances chimiques le mercure et le cyanure sont les polluants les plus récurrents. Comme mentionné plus haut, l'usage du mercure et du cyanure sur les sites aurifères peut provoquer des désagréments sur la santé des orpailleurs et de la population environnante. Les débris du mercure et du cyanure jeté dans l'espace minier détruisent la qualité de l'alimentation de la population minière et les autres populations riveraines qui dépendent des activités connexes à l'orpaillage. Ceci est illustré par les propos suivants :

« On nous a informés que même les poissons sont contaminés par le mercure et si les gens en consomment cela leur provoquent des maladies, des maladies qui commencent à se développer petit à petit avant de s'aggraver » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Les revers de ces substances chimiques ne s'arrêtent pas à ce point, ils sont observables dans le secteur d'élevage. L'utilisation des produits chimiques dans l'activité d'orpaillage autour des points d'eau engendre des conséquences désastreuses sur le cheptel et peut entraîner des troubles sociaux entre orpailleurs et éleveurs. C'est dans cette perspective qu'un de nos interlocuteurs affirme cela :

« L'eau contaminée par les produits chimiques peut tuer les animaux qui en boivent. Moi j'ai vu un cas pareil à 8 km de Oubanga, les animaux des éleveurs étaient morts après avoir consommé l'eau contaminée et cela a créé des conflits entre éleveurs et orpailleurs. Après les orpailleurs ont été amandés d'une somme dépassant un million » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

D'autres propos recueillis corroborent ce point de vue et mettent en lumière les conséquences sur le couvert végétal :

« Si les animaux s'abreuvent autour des points d'eau cyanurés ils meurent et tous les débris de cyanure jetés par terre seront emportés par la pluie dans la brousse et appauvrissent le couvert végétal » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

En outre, l'orpaillage artisanal est associé à des risques d'accident au cours des différentes étapes d'exploitation. Sur les sites d'orpaillage plusieurs morts sont enregistrées chaque jour pour cause d'éboulements et d'effondrements des puits. Les anciens sites abandonnés sont couverts des puits non restaurés qui constituent des « pièges » pour les personnes et les animaux. Aussi les anciens sites, sans réhabilitation, ne peuvent plus être utilisés pour les travaux agricoles. Un orpailleur affirme ceci à propos des sites abandonnés :

« Le risque est qu'il y a des puits qui peuvent s'écrouler et les animaux et les gens en passant peuvent tomber. (...). Cet espace ne servira plus à rien, on ne peut plus y pratiquer d'autres activités. Le paysage environnemental est détruit » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Les étapes de concassage et de broyage du minerai exposent les populations minières à des risques d'accidents. Cela concerne surtout l'utilisation des techniques rudimentaires de concassage et de broyage qui peut occasionner des blessures aux personnes présentes sur les sites d'orpaillage. Cet extrait d'un orpailleur rend encore plus saisissant ce point de vue :

« L'orpailleur risque de nuire à santé et il risque de blesser les autres s'il jette des pierres pendant le concassage » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Les éclats des pierres constituent donc un réel danger pour les exploitations minières de type artisanal.

L'eau la plus utilisée sur les sites de mine artisanale est majoritairement boueuse. Elle provient essentiellement des puits d'exploitation et peut engendrer des maladies pour les consommateurs. L'utilisation de cette eau impropre par les orpailleurs est surtout due à la minimisation et à la méconnaissance des risques qui peuvent en résulter, comme le témoigne cet orpailleur :

« Si ces gens-là qui boivent cette eau rentrent dans les puits pour voir là où elle est puisée ils changeront d'avis. Il y a donc un risque sanitaire lié à la consommation des eaux d'exhaure » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Un autre phénomène qui prend de plus en plus d'ampleur sur les sites d'orpaillage est celui du travail des femmes et des enfants. Jadis considérée comme inférieure à l'homme et qu'elle doit s'occuper des tâches ménagères, la femme participe de nos jours à toutes les activités économiques. Ce mythe d'infériorité est brisé par la présence de femmes dans certains secteurs d'activités considérées comme pénibles et réservées aux hommes comme l'orpaillage artisanal. Ces femmes orpailleuses se spécialisent souvent dans le petit commerce sur le chantier minier comme le notifie une femme orpailleuse du site Oubanga :

« Sur notre site il y a plusieurs activités que les femmes mènent mais c'est le commerce qui nous intéresse le plus. Je suis également une enseignante dans une école sur notre site » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Toutefois, cette présence de femmes sur les sites d'orpaillage est mal vue par certains hommes orpailleurs qui estiment que la femme ne doit pas être sur les sites d'orpaillage comme on peut le constater dans ces propos :

« (...) il y a des femmes dans l'orpaillage et cela fait vraiment pitié parce que le rôle des femmes c'est de rester à la maison pour exécuter les tâches ménagères et voilà qu'elles se trouvent sur les

sites d'orpaillage. C'est vraiment pitoyable selon moi » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Mais ces travaux exercés par les femmes sur les sites d'orpaillage ne restent pas sans inconvénients. En effet, en plus du commerce, les femmes se spécialisent dans les travaux de concassage et de tamisage du minerai. Des travaux qu'elles font sans des mesures de protection. Il n'est pas rare aussi de voir des femmes qui fouillent sur les lieux d'orpaillage pour espérer trouver l'or. Ces étapes précitées sont des véritables sessions d'émissions de poussière et constituent des risques majeurs pour la santé de ces orpailleuses. Ces mots forts de sens d'un orpailleur mettent cela en évidence d'une part :

« Il y a un risque parce que parmi ces femmes il y a celles qui fouillent sur les sites d'orpaillage pour chercher de l'or. J'ai vu des exemples pareils lorsque j'étais au Mali l'année passée, on nous a même rapportés qu'il y avait une femme qui est morte suite à une maladie contractée sur un site d'orpaillage dans ce pays. Elles sont également dans l'eau où se pratique la batée et cela leur provoquent des malaises sur leur corps » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

D'autre part un nombre important d'orpailleurs pointent de doigt le risque des maladies pulmonaires liées à l'exposition de poussière.

5.5.4.2 Analyse de la perception des risques sanitaires et environnementaux liés à l'orpaillage après le jeu sérieux

Le jeu sérieux a favorisé le transfert des connaissances nouvelles aux orpailleurs, ce qui a changé leur façon de percevoir les enjeux sanitaires et environnementaux liés à l'activité d'orpaillage. Grâce aux sessions de jeu sérieux, ces orpailleurs commencent à se rendre compte d'autres risques qui sont associés à l'exploitation artisanale de l'or. Cela s'observe à différents niveaux mais le point le plus marquant est la contamination des eaux de surface. En effet, les orpailleurs affirment avoir compris à travers le jeu que la couleur et la qualité de l'eau changent au fur et à mesure qu'ils exercent leur activité d'orpaillage. On peut lire cela dans les propos d'un orpailleur présent à l'atelier :

« Le jeu est une sorte de guide car cela nous a permis d'avoir des connaissances sur l'activité d'orpaillage artisanal car il y a des champs, des habitations, des écoles, l'eau à côté des sites d'orpaillage qui ont commencé à changer de couleur. Cela a attiré notre attention » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Les orpailleurs ont également compris que l'orpaillage artisanal n'a pas que de côté positif pour eux car génère des effets pervers sur leur santé et l'environnement :

« *Le jeu nous a fait comprendre qu'il y a des avantages et des inconvénients sur la pratique d'orpaillage. Au début on pensait qu'on est en train de gagner mais finalement on a vu ce qu'on est en train de faire à l'environnement, l'eau est devenue rouge, les classes et ainsi de suite* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Nombre d'orpailleurs sont à même d'estimer qu'ils sont capables désormais de transmettre des connaissances sur les enjeux sanitaires et environnementaux de l'orpaillage artisanal à leurs pairs qui sont sur les sites comme l'atteste un orpailleur : « *avec les connaissances que j'ai acquises à travers ce jeu je peux former et sensibiliser les gens de mon site sur les enjeux sanitaires et environnementaux liés à l'activité d'orpaillage* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021). Ils ont en plus acquis de nouvelles stratégies d'investissement quand ils trouvent de l'or en délaissant leur ancienne manière de faire qui consistait aux orpailleurs à s'offrir des objets de prestige avec tout l'argent qu'ils gagnent sans épargne. Dorénavant les orpailleurs savent qu'ils doivent entreprendre d'autres activités en dehors de l'orpaillage pour maintenir l'équilibre de leur vie familiale. Un orpailleur racontait ceci :

« *J'ai compris à travers ce jeu qu'il n'est pas du tout utile d'acheter des objets de luxe avec l'argent qu'on gagne dans l'orpaillage mais plutôt chercher du matériel de travail en plus le champ peut aussi aider dans la résilience des ménages* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Bien qu'ils semblent avoir compris et appris de nouvelles connaissances à travers le jeu, les orpailleurs suggèrent que le jeu soit répété afin de s'en approprier. Selon eux, la formation doit être continue pour permettre aux représentants des orpailleurs des différents sites d'en saisir le contenu et être à mesure de transmettre ces connaissances aux communautés minières de leurs sites respectifs. C'est dans cette optique qu'un orpailleur avance ceci :

« *“zari fo djawandi yan assi nan alberi kan lakalo go nango fo ma faham”* ».

Autrement dit l'enseignement d'une seule journée ne peut pas permettre à un chef de famille qui a l'esprit ailleurs (la charge familiale) de tout assimiler. Il continue avec ces mots :

« *Nous avons un peu compris mais nous proposons que la formation soit continue pour que nous puissions nous en approprier de ces connaissances* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021). Les orpailleurs expriment donc leur désir de continuer à apprendre des nouvelles manières de faire sur les sites à travers le jeu sérieux pour exercer leur activité sans compromettre leur santé humaine et sans modifier le paysage environnemental, du moins, sans entraîner une dégradation massive de l'environnement.

En somme, les représentants des orpailleurs de sept (7) sites différents de la zone de Liptako nigérien ont connaissance des enjeux sanitaires et environnementaux qui sont joints à l'orpaillage

artisanale. Mais, le jeu sérieux était l'origine du transfert de nouvelles visions sur les risques qui sont rattachés à l'exploitation artisanale de l'or. Ceci a changé leur manière de percevoir les risques qu'ils peuvent quotidiennement rencontrer dans leur activité d'orpaillage. Toutefois, les orpailleurs ont affiché leur souhait aux partenaires d'étendre la formation pour leur permettre une meilleure maîtrise du contenu afin de pouvoir le transmettre aux orpailleurs de leurs sites de provenance.

5.5.4.3 « Qui sait détruire doit savoir réparer » - De la perception des risques à l'identification de pistes d'action : le terrain donne des pistes pour la recherche à venir

« *Zarma kine ra day hassay gono : ine hala bora ga wani ga hassaraw koul ma wani ga hansey* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021). En langue zarma il y a un proverbe qui dit : qui sait détruire doit savoir réparer).

Les échanges ont également suscité des réflexions entre les participants sur les pistes d'actions concrètes à mener pour pallier aux risques environnementaux et sanitaires des activités d'orpaillage. Parmi les actions identifiées, les actions de sensibilisation prédominent : « *Selon moi pour pouvoir protéger l'environnement on doit sensibiliser les orpailleurs sur l'utilisation des produits chimiques comme le cyanure et le mercure. Ils doivent savoir comment s'y faire face pour éviter les contaminations des eaux et de l'environnement. Il faut qu'ils sachent...* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021). Cette sensibilisation doit notamment passer par des relais locaux, les représentants des orpailleurs : « *selon moi ce sont les représentants des orpailleurs des différents sites qu'on doit sensibiliser sur les enjeux environnementaux et sanitaires et à leur tour ils vont informer et discuter avec des orpailleurs de leurs sites respectifs* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021).

Des pistes d'action ont également été discutées concernant le remblai des anciens puits, la récupération des terres voire la revégétalisation et la restauration du couvert végétal. Des verrous sont identifiés : la question de l'alimentation en eau de ses plantations, la question de la stabilité de ces anciens puits, la question de la diffusion des polluants dans le temps long... autant de pistes de recherche dont les scientifiques devraient s'emparer au côté des populations.

Concernant les pollutions au cyanure et au mercure, selon les participants, ces actions doivent nécessairement être collectives : « *Pour la santé aussi, il faut qu'on s'unisse en un seul bloc pour lutter contre l'utilisation de cyanure au niveau des habitations* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021), il faut « *trouver un consensus avec les orpailleurs* » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021). En effet, l'équilibre social et économique est délicat entre diminution des pollutions et maintien de l'activité et de la paix sur les sites d'orpaillage : « *Si les partenaires*

partent avec nous sur les sites pour sensibiliser les orpailleurs ils diront que nous, les représentants, vous avons appelés pour venir leur interdire l'utilisation du cyanure. Déjà ils véhiculent les rumeurs selon lesquelles nous œuvrons avec les partenaires pour empêcher leurs travaux de cyanuration. » (Propos recueillis lors de l'atelier, juillet 2021). Ce qui ouvre des perspectives de recherche intéressantes pour les humanités, les sciences économiques et les sciences politiques afin de co-construire de nouveaux modèles de gouvernance de ces sites d'orpaillage informels basés sur la préservation de la ressource en eau et de la santé.

5.5.4.4 Evolution des connaissances et des pratiques après l'atelier

L'objectif de cette analyse est de recueillir les avis des participants sur l'évolution de leurs connaissances et pratiques après avoir suivi la formation. Elle a été réalisée à travers des entretiens à froid réalisés, après quelques semaines auprès des participants, à l'aide d'un questionnaire.

Les participants ont notifié avoir bien compris le fonctionnement de leur site respectif en termes de la diffusion des pollutions dans l'environnement et particulièrement dans les ressources en eau disponibles. Ils ont affirmé avoir échangé avec les autres orpailleurs sur l'utilisation du plateau de jeu sérieux comme outil de transfert de connaissance ainsi que la connaissance des conséquences de l'orpaillage mis en évidence lors de la formation à travers la fresque pour l'environnement minier et l'apport de connaissance. Parmi les risques discutés lors de la formation, les pollutions des eaux ont été évoquée sur tous les sites et par tous les participants et autres orpailleurs. Les enquêtés ont rapporté que les autres orpailleurs des sites n'ont pas connaissance des processus de la contamination des eaux et ont manifesté le besoin d'être également formés sur la connaissance de ces processus. Ils ont notifié que l'élément de compréhension le plus évoqué lors des échanges est le changement de couleur des habitations, des écoles et des rivières suite à la diffusion de la pollution sur le territoire.

Certains orpailleurs ont commencé à changer certaines pratiques polluantes notamment sur le déversement des eaux cyanurés dans l'environnement et les rivières et même la sécurisation des sites ; bien qu'il existe certaines pratiques polluantes qu'ils ne peuvent pas changer par manque de solutions alternatives (cas de la récupération du mercure et un manque de plan de gestion des résidus de cyanuration).

Selon le résultat des premières enquêtes, les différents points discutés entre les orpailleurs autour des puits d'extraction concernent les liens entre la mort des poissons, la pollution des eaux, les maladies pulmonaires et dermatologiques et les pratiques de l'orpaillage. Des questions de

changement des pratiques évoquées au niveau de certains sites concernent l'abandon des puits d'extraction sans réhabilitation et les risques que cela peut engendrer sur le territoire.

Tous les participants ont souligné avoir réalisé des communications verbales auprès des autres orpailleurs sur les connaissances reçues, les différents enjeux des pratiques d'orpillage et cela a suscité des débats sur le changement de certaines pratiques pour améliorer et limiter la diffusion des polluants dans la nature et pour aussi améliorer la qualité de l'environnement, la santé humaine et animale.

5.5.4.5 Perspectives pour la diffusion de l'outil

La diffusion de l'outil « LIPTAKOR » et la poursuite de sa co-construction se feront en trois étapes suivantes :

- Une déclinaison auprès des orpailleurs du Niger en vue de couvrir le maximum des sites d'orpillage et toucher le maximum d'orpailleurs ;
- Une adaptation auprès des orpailleurs du Burkina et du Niger en collaboration avec les ONGs intervenant dans le secteur de l'orpillage et l'ALG ;
- Une utilisation en formation auprès des élèves ingénieurs des écoles de l'IMT et des institutions des pays concernés.

CHAPITRES VI : CONCLUSION GENERALE

Les résultats obtenus, suite à la démarche générale adoptée au cours de cette thèse, confirment bien les hypothèses émises au départ, à travers un cheminement comprenant trois étapes.

La première étape a concerné la recherche des contaminants et des sources de contaminations des eaux souterraines et de surface dans les zones d'orpaillage. Il a été établi que les principaux contaminants sont représentés par des métaux (Fe, Mn, Co, Ni etc.) et des métalloïdes (As, Cd, B etc.). Les analyses minéralogiques et chimiques des roches ont permis de mettre en évidence la présence de certains minéraux sulfurés dans les basaltes, les diorites et certaines veines de quartz. Le résultat de ces analyses suggère que la présence des minéraux sulfurés dans ces roches pourrait avoir joué un rôle important dans la concentration de l'arsenic, notamment dans les zones où l'oxydation peut favoriser sa mobilisation. Les processus d'oxydation se font lors du rabattement de la nappe lors des travaux de dénoyage des puits d'orpaillage. Certains éléments, comme le manganèse, le baryum, et parfois le cobalt ou le nickel, sont présents naturellement à des concentrations élevées dans les ceintures de roches vertes. La présence des oxydes de Mn en quantité abondante peut également avoir joué un rôle dans la mobilisation de l'arsenic. Il ressort des analyses réalisées que l'arsenic est présent à des concentrations inférieures à 10 mg/kg dans les basaltes, les diorites et certaines veines de quartz.

Par ailleurs, l'analyse de la répartition spatiale des concentrations en éléments traces dans la zone d'étude a montré que la contamination des eaux souterraines et de surface est étroitement associée aux zones d'exploitation artisanale de l'or. Cela montre qu'il existe une relation entre les concentrations élevées en arsenic mises en évidence dans les eaux souterraines et la minéralisation aurifère. Le résultat des analyses chimiques des eaux souterraines donne des concentrations excédant les limites de potabilité pour l'arsenic, le manganèse, le nickel, le bore et le baryum. Les puits et les forages à fortes concentrations d'arsenic captent l'aquifère des schistes et des altérites de la ceinture des roches vertes à une faible profondeur (environ 60 m). Ces roches constituent donc le principal environnement géologique à l'origine de cette contamination.

L'étude du chimisme a montré que le principal faciès est de type bicarbonaté calcique et magnésien pour les deux ensembles géologiques avec deux faciès minoritaires de type chloruré sodique, potassique et chloruré sulfaté calcique et magnésien dans les forages. Les concentrations les plus élevées en éléments majeurs sont celles du chlorure, du sulfate et du bromure, liées à une pollution fécale due à la présence des latrines ou d'origine naturelle. Le nitrate excède également les valeurs limites, sur neuf points d'eau, avec une origine vraisemblablement liée à l'application des engrais chimiques et aux rejets d'eaux usées dues à la concentration humaine (oxydation de matières azotées contenues dans les excréments humains).

La caractérisation de la contamination en métaux et en métalloïdes dans les rivières a montré des concentrations élevées en éléments traces dans les sédiments, les matières en suspension et dans les eaux.

Les concentrations élevées en métaux et en métalloïdes mises en évidence dans les eaux du Liptako nigérien montrent qu'il est indispensable de réaliser un état des lieux des concentrations en arsenic et en éléments traces au niveau des forages et des puits. Cette approche permet d'identifier les zones polluées et d'envisager leur traitement pour favoriser un approvisionnement de la population en eau de qualité. Des investigations complémentaires s'avèrent donc nécessaires pour mieux évaluer le niveau d'exposition à l'arsenic des populations vivant dans ces zones.

Il ressort de ces investigations que la pollution à l'arsenic est plus marquée dans la rivière *Sirba* que dans le *Dargol* et le *Goroubi*. Toutefois, les concentrations dans la phase dissoute restent inférieures à la limite de qualité (10 µg/L), pour les eaux de consommation, recommandée par l'OMS. Dans le Liptako nigérien, les concentrations en arsenic et en métaux traces sont plus élevées dans les eaux souterraines que dans les eaux de surface.

La seconde étape a concerné l'analyse de la contamination en pesticides polaires des eaux du Fleuve Niger, au Niger et de son affluent la rivière *Mékrou*. Les résultats ont permis de mettre en évidence de fortes concentrations en diuron, atrazine et acétochlore. Ces concentrations ont été mises en évidence pendant la saison des pluies. L'origine de cette contamination semble être liée à l'utilisation accrue de pesticides dans l'agriculture urbaine d'une part, et, d'autre part, dans l'agriculture intensive du coton au Bénin. Les concentrations en pesticides mises en évidence pourraient être influencées par les variations des précipitations, l'augmentation du débit des cours d'eau et l'utilisation des pesticides non homologués. Elles sont plus élevées lors de la première venue des pluies. Les pesticides se diluent avec l'augmentation du débit. L'échantillonnage au moyen de POCIS a permis d'avoir des résultats similaires à ceux des échantillonnages ponctuels.

Il constitue donc une méthode appropriée pour la surveillance environnementale des contaminants en pesticides, dans l'espace et dans le temps, le long du *fleuve Niger* et sur la rivière *Mékrou*, pour pallier au manque local de laboratoire spécialisé. La concentration en diuron de plus de seize (16) fois la norme de qualité environnementale (NQE), celle de l'atrazine et de l'acétochlore, à plus de 2,5 fois le seuil fixé par la norme, constituent une situation préoccupante sur la qualité des eaux du *Fleuve Niger* et de la rivière *Mékrou*. L'évaluation des risques écologiques a mis en évidence un risque élevé pour les algues (*Raphidocelis subcapitata*), les invertébrés aquatiques (*Daphnia magna*) et les poissons (*Oncorhynchus mykiss*) pour le diuron. Le risque lié à l'atrazine est également très élevé pour les algues et les invertébrés aquatiques et moyen à faible pour les poissons.

La troisième étape des travaux a consisté à développer et à mettre en place un outil de transfert de connaissance entre les travaux de recherche et le terrain. L'utilisation de la modélisation d'accompagnement à partir de la méthode ARDI a permis de cartographier les interactions et dynamiques sociales autour de l'exploitation artisanale de l'or et en particulier, de proposer une première modélisation conceptuelle des liens de la contamination des eaux avec les pratiques d'orpaillage. Cette connaissance des interactions et des pratiques d'orpaillage a permis de mettre en place le dispositif de jeu sérieux « LIPTAKOR », qui est un outil co-construit entre les scientifiques et les différents acteurs de terrain. Le développement du jeu sérieux a permis de favoriser le partage de connaissances entre les acteurs de terrain et les acteurs de recherche. Le dispositif que nous avons cherché à élaborer est, non seulement, un outil de sensibilisation, mais surtout, un outil de renforcement des capacités au niveau des différents acteurs (chercheurs, cadres institutionnels, orpailleurs, chefs de village, responsables de puits, etc.).

Ainsi, cette thèse reconstitue-t-elle un cheminement, un parcours scientifique, qui inscrit le sujet des impacts environnementaux et sanitaires des activités humaines dans le Liptako-Gourma dans le champ grandissant de la science de la durabilité telle que définie notamment par l'Unesco. En visant à comprendre le fonctionnement des interactions hydrogéologiques, hydrochimiques et physico-chimiques entre les activités humaines et l'eau, notre travail de recherche participe d'une science sur la durabilité qui cherche à analyser et modéliser la complexité des systèmes socio-écologiques. En visant à améliorer le transfert de connaissances entre la recherche et le terrain, entre le scientifique et l'orpailleur, notre travail de recherche participe d'une science au service de la durabilité qui vise à soutenir des politiques durables et à susciter des changements techniques et sociaux des pratiques. Mais, plus fondamentalement, la science de la durabilité questionne la façon dont nous produisons, nous mobilisons et nous appliquons les connaissances. Notre

cheminement de recherche nous a amenés à nous appuyer et à nous fonder sur la co-construction des savoirs et des connaissances. Il nous a conduits à repenser les formes de collaboration entre scientifiques de différentes disciplines et acteurs de territoire, dans des démarches scientifiques participatives, engagées, attentionnées. Il nous invite aujourd'hui à faire de la science autrement, en mettant les modèles théoriques conceptuels à l'épreuve des enjeux et des savoirs situés.

Perspectives

Pour atténuer, voire endiguer les pollutions relevées dans les zones étudiées, nous suggérons les dispositions ou les mesures suivantes :

- Sensibilisation des orpailleurs sur les processus de transfert des polluants dans l'environnement ;
- Favoriser l'appropriation des concepts clés du jeu sérieux « LIPTAKOR » ;
- Suivi des pratiques d'orpillage et des pratiques agricoles, notamment dans l'utilisation des substances nocives pour l'environnement (mercure, cyanure, acides sulfuriques et nitriques et les pesticides tels que diuron, atrazine et acétochlore) ;
- Renforcer la surveillance environnementale au niveau des autres acteurs : les cadres institutionnels, les chefs de village, les responsables des sites, etc. .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdoul Habou, Z., Mamane, M., Mamane, G., 2015. Rapport de synthèse du diagnostic participatif rapide d'identification des principales contraintes et des activités des sites d'intervention du projet PADSR, 62 p.

Abdoulkadri, A.M., Boubié, G., 2015. Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(1): 517 - 533, DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i1.44>.

Amadou Abdoul Razack, 2002. Propositions pour l'optimisation de la mine artisanale Juin 2002. CESAM 02/RAP/2002-01

Adama, S., Christophe, D. B., Hervé, H., 2017. Knowledge and perceptions of health and environmental risks related to artisanal gold mining by the artisanal miners in Burkina Faso: a cross-sectional survey. *Pan African Medical Journal*, 2017 ; 27 : 280

Adamou, R., Bassirou, A., Zibo, G., 2015. Impact de la pollution anthropique du fleuve Niger sur la prolifération de la jacinthe d'eau. *J. Sci. Vol. 15, N° 1 (Janvier 2015) 25-38*

Adeyemi, D., Anyakora, C., Ukpo, G., Addayo, A., Darko, G., 2011. Évaluation des niveaux de résidus de pesticides organochlorés dans des échantillons d'eau de la lagune de Lagos à l'aide de la méthode d'extraction en phase solide. *J Environ Chem Ecotoxicol 3:160-166*.

Affaton, P., Gaviglio, P., Pharisat, A., 2000. Réactivation du craton ouest-africain au Panafricain : paléocontraintes déduites de la fracturation des grès néoprotérozoïques de Karey Gorou (Niger, Afrique de l'Ouest). *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 331, pp 609-614.

Ahmadou, Y., Kouebou, C., Malaa, D., Bourou, S., Olina, J.P., Mbiandoun, M., 2016. Les engrais et les pesticides dans la riziculture périurbaine de la ville de Garoua, au Nord-Cameroun : cas de Nassarao et Boklé. *International Journal of Innovation and Applied Studies*. ISSN 2028-9324 Vol. 18 No. 1 Oct. 2016, pp. 26-35.

Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa), 2015. Avis de l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. Saisine n°2013-SA-0049 Saisines liées n°2010-SA-0280 et 2008-SA-0390.

Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa), 2007. Évaluation des risques sanitaires liés aux situations de dépassement de la limite de qualité baryum dans les eaux destinées à la consommation humaine. Afssa – Saisine n° 2004-SA-0060. Saisine liée n° 2003-SA-016.4

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2004. Toxicological profile for Cobalt. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

Aissata B. H. (2010) – Aquifers superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER). Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni de Niamey-Niger, 198p.

Agbohessi, T.P., Imorou, Toko I., Yabi, A.J., Dassoundo, C.F.J., Kestemont, P., 2011. Caractérisation des pesticides chimiques utilisés en production cotonnière et impacts sur les indicateurs économiques dans la commune de Banikoara au nord du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5(5): 1828–1841.

Agbohessi, T.P., Toko, I. I., Kestemont, P., 2012. Etat des lieux de la contamination des écosystèmes aquatiques par les pesticides organochlorés dans le Bassin cotonnier béninois. *Cah Agric*, vol. 21, n°1, 2012. <https://doi.org/10.1684/agr.2012.0535>.

Agboyi, L.K., Ketoh, G.K., Martin, T., Glitho, I.A., Tamò, M., 2016. Pesticide resistance in *Plutella xylostella* (Lepidoptera : Plutellidae) populations from Togo and Benin. *Int. J. Trop. Insect. Sci.* 36, 204–210. <https://doi.org/10.1017/S1742758416000138>.

Ahmad, S.A., Sayed, M.H.S.U., Barua, S., Khan, M.H., Abdul Jalil, F.M.H., Abdul Hadi, S., Talukder H.K., 2001. Arsenic in drinking water and pregnancy outcomes. *Environ Health Perspect* ; 109 : 629-31.

Ahouangninou, C., Fayomi, B.E., Martin, T., 2011. Évaluation des risques sanitaires et environnementaux des pratiques phytosanitaires des producteurs maraîchers dans la commune rurale de Tori-Bossito (Sud-Bénin). *Cahiers Agricultures* 20(3): 216–222. DOI: 10.1684/ agr.2011.0485.

Ahrens, L., Daneshvar, A., Lau, A.E., Kreuger, J., 2015. Characterization of five passive sampling devices for monitoring of pesticides in water. *Journal of Chromatography A*, 1409(2015) 1-11.

Alhou, B., Micha, J-C., Dodo, A., Awaiss A., 2009. Etude de la qualité physico-chimique et biologique des eaux du fleuve Niamey à Niamey. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 3(2): 240-254, 2009. ISSN 1991-8631.

Alhou, B., 2000. Approche géochimique de la pollution des eaux souterraines du continental terminal de la ville de Niamey. Mémoire de DESS, CRESA, Univ. Niamey, 53 p.

Ama Salah, I., Liègois J.P., Pouclet, A., 1996. Evolution d'un arc insulaire océanique birimien précoce au Liptako nigérien (Sirba) : géologie, géochronologie et géochimie. *Journal of African Sciences*, Vol. 22, n° 3, pp 235-254.

Amadou A-R., 2020. Propositions pour l'optimisation de la mine artisanale au Niger, Proposals for optimising artisanal mining in Niger. *Pangea infos, Société Géologique de France*, 2002, 37/38, pp.7-23. Insu-00947881.

Andres, L., Lebailly, P., 2011. Peri-urban Agriculture : The Case of Market Gardening in Niamey, Niger. *African Review of Economics and Finance* 3: 69-85.

Arrêté du gouvernement de la région de Bruxelles-Capitale (AGRBC) du 17 décembre 2015 modifiant l'arrêté du 24 mars 2011 établissant des normes de qualité environnementale, des normes de qualité de base et des normes chimiques pour les eaux de surface contre la pollution causée par certaines substances dangereuses et autres polluants. MB du 08.01.2016. 19 pp. p.456-474.

Assanvo, W., Dakono, B., Théroux-Bénoni, L-A., Maiga, I., 2019. Extrémisme violent, criminalité organisée et conflits locaux dans le Liptako-Gourma. *Institut d'études de sécurité (ISS)*

ASTM D1246-16, 2016. Standard Test Method for Bromide Ion in Water, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 2003. Toxicological profil for Atrazine (<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp153.pdf>).

Babaye, A. M. S., Orban, P., Ousmane, B., Favreau, G., Brouyère, S., Dassargues, Al., 2018. Characterization of recharge mechanisms in a Precambrian basement aquifer in semi-arid south-west Niger. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1799-x>, May 2018.

Babaye, A.M.S., Sandao, I., Saley, M.B., Wagani, I., Ousmane B., 2016. Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 10(6): 2728-2743, Décembre 2016.

Babaye, A.M.S., 2012. Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). Thèse de doctorat, Université de Liège-Belgique et Université Abdou Moumouni de Niamey-Niger, 235p.

- Baker, M., Bronner, A., Lehuen, J., Quignard, M., 2006. Gestion de l'interaction et modèles de dialogues, dans : L. Hermès (Ed.), Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Paris, Science Publications : 117-138.
- Banchirigah, S., 2008. Challenges with eradicating illegal mining in Ghana : A perspective from the grassroots. *Resources Policy* Volume 33, Issue 1, March 2008, Pages 29-38.
- Barbash, J.E., 2014. 11.15 The Geochemistry of Pesticides. in: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.). *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Elsevier, Oxford, pp. 535-572.
- Baron, C., Bonnassieux, A., Maiga, I. M., Nguyen, G., 2010. Gouvernance hybride et viabilité des grands périmètres irrigués au Niger. *Mondes en Développement* 2010/3 (n°151), PAGES 51 à 66.
- Barro-Traoré, F., Tiendrébéogo, S.R.M., Lallogo, S., Tiendrébéogo, S., Dabal, M., Ouédraogo, H., 2008. Manifestations cutanées de l'arcénicisme au Burkina Faso : aspects épidémiologiques et cliniques. *Mali Medical*, Tome. XXIII.
- Bartsch, A.F., Ingram, W.M., 1967. Stream life and the pollution environment. *Biology of water pollution*. US Department of Interior, F.W.P.C.A. : 119-127.
- Barry, M. (éd.), 1996. Régulariser l'exploitation minière informelle : un résumé des travaux de la table ronde internationale sur l'exploitation minière artisanale. Organisé par la Banque mondiale, Washington, DC, 17–19 mai, Publication hors série n ° 6 du Département de l'industrie et de l'énergie
- Bassirou, A. 2007. Impact des rejets de la ville de Niamey (Niger) sur la qualité des eaux du fleuve Niger. Prom. : Micha, Jean-Claude <http://hdl.handle.net/2078.2/4238>
- Bedos, C., Cellier, P., Calvet, R., Barriuso, E., 2020. Occurrence of pesticides in the atmosphere in France, *Agronomie* 22 (2002) 35–49.
- Berthe, D.S., Cobb, J.M, Mullins, D.E., 2007. Pesticide residues in soil and water from four cotton growing areas of Mali, West Africa. *J Agric Food Environ Sci* 1:1–12.
- Béziat, D., Dubois, M., Debat, P., Nikiéma, S., Salvi, S., Tollon, F., 2008. Gold metallogeny in the Birimian Craton of Burkina Faso (West Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 50, 215–233.
- Black, P., Richardk, M., Rossink, R., Telmerk, K.k., 2017. Assesing occupational mercury exposures and behaviours of artisanal and small-scale gold miners in Burkina Faso using passive mercury vapour badges. *Environmental Research* 152 (2017) 462-469.
- Black, R., 1985. Le Panafricain et son influence sur l'évolution géologique au Phanérozoïque. Séminaire de formation sur l'évolution géologique de l'Afrique. CIFEG (Centre international pour la formation et les échanges géologiques), Paris, pp 115-141.
- Boedeker, W., Watts M., Clausing P., Marquez E., 2020. The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning : estimations based on a systematic review, *BMC Public Health* 20, DOI : 10.1186/s12889-020-09939-0.
- Bollag, J-M., Myers, C. J., Minard, R.D., 1992. Biological and chemical interactions of pesticides with soil organic matter. *Science of The Total Environment*. Volumes 123–124, 12 August 1992, Pages 205-217.
- Bondu, R., Cloutier, V., Benzaazoua, M., Rosa, E., Bouzahzah, H., 2017. The role of sulfide minerals in the genesis of groundwater with elevated geogenic arsenic in bedrock aquifers from western Quebec, Canada. *Chemical Geology* Volume 474, 10 December 2017, Pages 33-44.

- Bonnemaison, M., 2005. L'eau, facteur de libération de l'arsenic naturel. *Géosciences*, 2, p. 54-59.
- Bose-O'Reilly, S., McCarty, K.M., Steckling, N., Lettmeier, B., 2010. Mercury Exposure and Children's Health. *World's Worst Pollution Problems Report 2010 : Top Six Toxic Threats*. Blacksmith Institute/Green Cross, Switzerland. Blacksmith Institute : New York, USA ; pp. 33-38, 188-189.
- Boureima, A.G., Harouna, M., 2007. Insécurité alimentaire au Niger : rôle des politiques sous régionales et régionales. Les états-nations face à l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest : cas du Niger. Maman Wariri Mato (éd.).
- Bourges, F., Debat, P., Tollon, F., Munoz, M., Ingles, J., 1998. The geology of Taparko gold deposit, Birimian greenstone belt, Burkina Faso. *West African Mineralium Deposita*, 33, 591–605.
- Bowell, R.J., Morley, N.H., Din, V.K., 1994. Arsenic speciation in soil porewaters from the Ashanti Mine, Ghana. *Applied Geochemistry*, Volume 9, Issue 1, January 1994, Pages 15-22.
- Boyle, R.W., Jonasson, I.R., 1973. The geochemistry of arsenic and its uses as an indicator element in géochemical prospecting. *Journal of Geochemical Exploration*. Volume 2, Issue 3, October 1973, Pages 251-296
- Boyle, D.R., Turner, R. J.W., Hall, G.E.M., 1998. Anomalous arsenic concentration in groundwaters of an island community, Bowen Island, British Columbia. *Environmental Geochemistry and Health* 20, 199-212.
- Branchet, P., Cadot, E., Fenet, H., Sebag, D., Ngatcha, B.N., Borrell-Estupina, V., Ngoupayou, J.R.N., Kengne, I., Braun, J-J. Gonzalez, C., 2018. Polar pesticide contamination of an urban and peri-urban tropical watershed affected by agricultural activities (Yaoundé, center region, Cameroon). *Environ Sci Pollut Res* 25:17690–17715. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1798-4>.
- Brenniman, G.R., Namekata, T., Tojola, W.H., Carnow, B.W., Levy, P.S 1979. Cardiovascular disease death rates in communities with elevated levels of barium in drinking water. *Environnemental Research* 1979, 20:1-324.
- Brenniman, G.R., Tojola, W.H, Levy, P.S., Carnow B.W., Namekat, T., 1981. High barium levels in public drinking water and its association with elevated blood pressure. *Arch Environ Health* 1981, 36 (1), 28- 32.
- Brenniman, G.R., Levy, P.S., 1985. Epidemiological study of barium in Illinois drinking water supplies. In : Calabrese EJ, Tuthill RW, Condie L, eds. *Inorganics in water and cardiovascular disease. Advances in modern environmental toxicology*. Vol. IX. Princeton Publishing Co., Princeton, NJ. p. 231-240 (1985).
- Bretzler, A., Lalanne, F., Nikiema, J., Podgorski, J., Pfenninger, N., Berg, M., Schirmer, M., 2017. Grounwater arsenic contamination in Burkina Faso, West Africa: Predicting and verifying region at risk. *Science of the Total Environment* 584-585 (2017) 958-970.
- Bucheli, T.D., Mulle, S.R., Herberle, S., Schwarzenbach, R.P., 1998a. Occurence and behavior of pesticides in rainwater, roof runoff, and artificial stormwater. *Environmental Science and Technology*, 32 :3457–3464.
- Burkhardt, M.K.T., Hean, S., Schmid, P., Haag, R., Rossi, L., Boller, M., 2007. Release of biocides from urban areas into aquatic systems. In *Novatec*, volume 3, pages 1483–1489, Lyon-France.
- Camail, M., Mahamane, M., Pucci, B., Rigaud, J.P., 1987. Analyses chimiques des eaux du fleuve Niger à Niamey : premiers résultats d'une campagne annuelle de mesures. *Hydrologie Continentale*, 2 (2), p. 87-99. ISSN 0246-1528.

- Campbell, B., Laforce, M., 2010. La réforme des cadres réglementaires dans le secteur minier : les expériences canadienne et africaine mises en perspective. *Recherches amérindiennes au Québec*, 40 (3), 96-84. <https://doi.org/10.7202/1009370ar>.
- Campbell, Bonnie, (ed.). 2004. *Regulating Mining in Africa : For Whose Benefit ?*, Discussion Paper 26, Uppsala (Sweden), Nordic Africa Institute (NAI), 89pp ; Bonnie Campbell (dir.). 2004. *Enjeux des nouvelles réglementations minières en Afrique*, Document de recherche 3, Uppsala (Sweden), NAI, 97pp.
- Cheilletz, A., Barbey, P., Lama, C., Pons, J., Zimmermann, J.L., Dautel, D., 1994. Age de refroidissement de la croûte juvénile Birimienne d'Afrique de l'Ouest, données U-Pb, Rb-Sr et K-Ar sur les formations à 2.1 Ga au SW-Niger. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 319(II), 435-442.
- Chippaux, J.-P., Houssier, S., Gross, P., Bouvier, C., Brissaud, F. 2002. Étude de la pollution des eaux souterraines de la ville de Niamey, Niger. *Bull Soc Pathol Exot*, 2002, 94, 2, 119-123.
- Chen, L., Feng, Q., He, Q., Huang, Y., Zhang, Y., Jiang, G., Zhao, W., Gao, B., Lin, K., Xu, Z., 2017. Sources, atmospheric transport and deposition mechanism of organochlorine pesticides in soils of the Tibetan Plateau. *Sci Total Environ* 577 :405-412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.227>
- Cissé, I., Tandia, A.A., Fall, S.T., Diop, E.-HS., 2003. Usage incontrôlé des pesticides en agriculture périurbaine : cas zone des Niayes au Sénégal. *Cah. Etud. Rec. Francoph. Agric.*, 12, 181-186.
- CNEDD, 2004. Etude prospective afin d'évaluer les tendances des secteurs LCD-GRN régions de Tillabéry et de Maradi (Niger) à l'horizon 2025. Rapport. Coopération italienne, République du Niger, cabinet du premier ministre.
- Collectif ComMod, 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures Sciences Sociétés* 13, 165-168 (2005). *NSS-Dialogues*, EDP Sciences 2005. DOI : 10.1051/nss :2005023.
- Coulibaly, L., Coulibaly, S. Kamagaté, B., Sékongo, N. Savané, I., Gourène, G., 2012. Distribution des pesticides d'origine agricole et évaluation de la vulnérabilité des ressources en eau dans un bassin versant transfrontalier : Cas du Comoé, Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 76 (4): 601-613.
- Compaoré, G., Lachassagne, P., Pointet, T., Travi, Y., 1997. Evaluation du stock d'eau des altérites : expérimentation sur le site granitique de Sanon (Burkina Faso). *Hard Rock HydroSystems (Proceedings of Rabat Symposium S2, May 1997)*. IAHS Publ. no. 241, 1997.
- CSP INSAH, 2015. Liste globale des pesticides autorisés. Version de Mai.
- Culioli, J.-L., Ferrandini, J., Ferrandini, M., Furt, J-M., Khoumeri, B., Mori, C., Orsini, A., Romani, P-M., 2008. La mine d'arsenic de Matra et la concentration de la Bravona (Corse). 13th IWA World Water Congress 2008. 1-4 septembre, Montpellier, France (<http://www.worldwatercongress2008.org>)
- Daré, W., Venot J-P., 2016. Dynamique des postures de chercheurs-engagés Retours sur la participation dans les politiques de l'eau au Burkina Faso, *Anthropologie et développement [En ligne]*, Vol. 44, URL : <https://journals.openedition.org/anthropodev/514>, Consulté le 30 novembre 2016.
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J.C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I., Sighomnou, D. 2009. Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa : a synthesis. *J. Hydrol.* 375(1-2), 90-102.
- Desgranges, N., 2015. Développement d'échantillonneurs passifs de type POCIS pour l'évaluation de la contamination en pesticides des eaux de bassins versants languedociens. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Bordeaux.

- De Vries, R.E., Van den Hoof, B., de Ridder, J.A., 2006. Explaining knowledge sharing : the role of team communication styles, job satisfaction, and performance beliefs. *Communication Research*, 33(2),115-135.
- Diello, P., Paturel, J. E., Mahé, G., Karambiri, H., Servat, E., 2006. Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'Ouest. In: *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts* (ed. by S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena & E. Servat), 691–697. IAHS Publ. 308. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Direction Générale Protection des Végétaux (DPV), 2003. Forum sur la problématique de la protection des végétaux au Niger, Niamey 8 au 11 décembre 2003.
- Dompé, G.A., Franck, L., Julie, M., Stephan, B., Amadou, H.M., 2015. Arsenic in African Waters : A Review. *Water Air Soil Pollut* (2015) 226: 302.
- Doumbia, M., Kwadjo, K.E. 2009. Pratiques d'utilisation et de gestion des pesticides par les maraîchers en Côte d'Ivoire : cas de la ville d'Abidjan et deux de ses banlieues (Dabou et Anyama). *Journal of Applied Biosciences* 18: 992 – 1002. ISSN 1997–5902.
- Dubois, D., 1979. Etude des formations ferrugineuses du bassin des Iullemmeden (Niger). Thèse de spécialité Univ. Orléans-Niamey, 123.
- Ducruet, J.M., 1991. Les herbicides inhibiteurs du photosystème II. In: Inra (ed). *Les herbicides, modes d'action et principes d'utilisation*, René Scalla, Paris, p 79.
- Dumas, E., Giraudo, M., Goujon, E., Halma, M., Khili, E., Stauffer, M., Batisson, I., Besse-Hoggan, P., Bohatier, J., Bouchard, P., Celle-Jeanton, H., Costa Gomes, M., Delbac, F., Forano, C., Goupil, P., Guix, N., Husson, P., Ledoigt, G., Mallet, C., Mousty, C., Prévot, V., Richard, C, Sarraute, S., 2017. Fate and ecotoxicological impact of new generation herbicides from the triketone family : an overview to assess the environmental risks. *J. Hazard Mater* 325 :136-156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.059>.
- Dupuis, D., Pons, J., Prost, A.E., 1991. Mise en place de plutions et caractérisation de la déformation birimienne au Niger occidental. *Compte Rendus Acad. Sci. Paris*, n° 312 (II), pp 769-776.
- Ehrnrooth, A., Dambo, L., Jaubert, R., 2011. Projets et programme de développement de l'irrigation au Niger (1960 – 2010) : Elément pour un bilan. Centre d'Etudes et d'Information sur la Petite Irrigation.
- Elbaz-Poulichet, F., Favreau, G., Leduc, C. & Seidel, J. L., 2002. Major ion chemistry of groundwaters in the Continental Terminal water table of southwestern Niger (Africa). *Appl. Geochem.* 17, 1343–1349.
- Eldrige, B. 2008. Pesticide application and safety training for applicators of public health pesticides. California. Department of Public Health.
- Engalenc, M., 1981. Eléments pour la quantification des ressources hydrauliques dans les roches cristallines. *Bull. BRGM* (2e série). Section III, 4, 1980, 325-326.
- Engalenc, M., 1978. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Comité interafricain d'étude hydrauliques (CIEH) – Géohydraulique, 318p.
- Etienne, M., 2009. Co-construction d'un modèle d'accompagnement selon la méthode ARDI : guide méthodologique.
- FAO/WHO, 2013. Codex Maximum Residue Limits for Pesticides and Extraneous. Maximum Residue Limits Adopted by the Codex Alimentarius Commission up to and including its 36th Session. Joint fao/who food standard programme.

- FAO, 2011. Etat des lieux de la riziculture au Niger. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome 2011.
- Farran, A., Ruiz, S., 2004. Application of solid-phase extraction and micellar electrokinetic capillary chromatography to the study of hydrolytic and photolytic degradation of phenoxy acid and phenylurea herbicides. *Journal of Chromatography*, 1024 :267–274.
- Favreau, G., Ledu, C., Seidel, J.L., 2003. Land clearance and nitrate-rich groundwater in a Sahelian aquifer, Niger. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*. IAHS Publ. no. 278, 2003.
- Favreau, G., 2000. Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel. Thèse de doctorat. Université de Paris XI, France, 258 pp.
- Field, J.A., Reed, R.L., Sawyer, T.E., Griffith, S.M., Wigington, P.J., 2003. Diuron occurrence and distribution in soil and surface and ground water associated with grass seed production. *Journal of Environmental Quality*, 32 :171–179.
- Gallaire, R., 1995. Données sur les transports du Niger moyen entre Kandadji et Niamey. In « Grands bassins fluviaux périatlantiques », J.C. Olivry & J. BOULEGUE (Eds), Edition ORSTOM, p. 317-332
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupré, B., 2003. Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry*. 5, pp. 225–272.
- Garba, G.S., Konaté, M., Ahmed, Y., Soumaila, A., 2017. Les minéralisations de manganèse du Nord Tera (Liptako, Ouest Niger): origine et conditions de mise en place. *Science de la vie, de la terre et agronomie*. REV. CAMES – VOL.05 NUM.02.2017. ISSN 2424-7235.
- Garcia, P.K., Emerman, S.H., Roberston, S.A., Bunds, M.P., 2011. The role of poor sanitation in the mobilization of arsenic in Mali, West Africa. In: Presented Rocky Mountain (63rd Annual) and Cordilleran (107th Annual) Joint Meeting (18-20 May 2011).
- Girard, L., Reix, N., Mathelin, C., 2020. Impact des pesticides perturbateurs endocriniens sur le cancer du sein. *Gynécologie Obstétrique Fertilité & Sénologie* 48 (2020) 187-195
- Girard, P., Hillaire-Marcel C., 1997. Determining the source of nitrate pollution in the Niger discontinuous aquifers using the natural $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios. *J. Hydrol.* 199, 239–251.
- Gnankiré, O., Mouton, L., Savadogo, A., Martin, T., Sanon, A., Dabire, R.K., Vavre, F., Fleury, F. 2013. Botype status and resistance to neonicotinoids and carbosulfan in *Bemisia tabaci* (Hemiptera : Aleyrodidae) in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of pest Management*. Volume 59-102, 2013. <https://doi.org/10.1080/09670874.2013.771806>.
- Gouda, A-I., Toko I.I., Salami S-D., Richert M., Scippo M-L., Kestemont P., Schiffers B., 2018. Pratiques phytosanitaires et niveau d'exposition aux pesticides des producteurs de coton du nord du Bénin. *Cah. Agric.* 27: 65002.
- Gouvernement du Niger, 2008a. Recensement Général de l'Agriculture et du Cheptel (RGAC). Niamey : FAO.
- Graymore, M., Stagnitti, F., Allinson, G., 2001. Impacts of atrazine in aquatic ecosystems. *Environ. Int.* 26, 483-495. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00031-9).
- Gramaglia, C., 2020. Les sols, nouvelle frontière pour les savoirs et les politiques de l'environnement. *Revue d'anthropologie des connaissances*. 14-4 | 2020. DOI : <https://doi.org/10.4000/rac.11726>.
- Grätz, T., 2004. Les frontières de l'orpaillage en Afrique occidentale.

- Greenwood, R., Mills, G.A., Vrana, B., Allan, I.J., Aguilar-Martinez, R., Morrison, G., 2007. Monitoring of priority pollutants in water using Chemcatcher passive sampling devices. In: Greenwood R, Mills G, Vrana B (eds) *Comprehensive analytical chemistry 48: passive sampling techniques in environmental monitoring*. Elsevier, Amsterdam, p 199.
- Greigert, J., 1966. Descriptions des formations crétacées et tertiaires du bassin des Illummeden (Afrique occidentale), Editions du B.R.G.M./Dir. Mines Géol. Rép. Niger, Paris.
- Gross, J., 1999. Qualité de l'eau souterraine de la Communauté urbaine de Niamey. Compte – rendu des travaux réalisés à Niamey d'août 1998 à février 1999. Document. CERMES Niamey. 63 pp.
- Guengant, J.P., Banoin, M., 2003. Dynamique des populations, disponibilités des terres et adaptation des régimes fonciers : le cas du Niger. FAO et Comité International de Coopération dans les Recherches Nationales en Démographie. 144 pages.
- Guiraud, R., Travi, Y., 1990. Synthèse des connaissances l'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Socle cristallin et cristallophyllien et sédimentaire ancien. Univ. Avignon – CEFIGRE, 2é édi., 147p.
- Gummuchian, H., Pecqueur, B., 2007. La ressource territoriale. *Economica/Anthropos*. Paris, 2007, 248 p
- Gushit, J.S, Ekanem, E.O, Adamu, H.M., 2013. Utilization pattern and risk assessment of herbicides usage by farmers, marketers and agricultural extension workers (AEWs) in Plateau state Nigeria. *Journal of Agricultural Science Research*.
- Hans, W.K., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Hayes, T.B., A. Collins, M. Lee, M. Mendoza, N. Noriega, A. Stuart, and A. Vonk., 2002. Hermaphroditic, demasculinized frogs after exposure to the herbicide atrazine at low ecologically relevant doses. *Ecology* 99:5476-5480.
- Hayes, T., Haston K., Tsui M., Hoang A., Haeffele C., Vonk, A., 2003. Atrazine Induced hermaphroditism at 0.1 ppb in American Leopard Frogs (*Rana pipiens*): Laboratory and field evidence. *Environmental Health Perspectives* 111:568-575.
- Hassenforder, E., Dray, A., Daré, W., 2020. Manuel d'observation des jeux sérieux. Research Collection. ComMod/CIRAD 2020.
- Hein, K.A.A., Tshibubudze, A., 2016. Manganese deposits of the Oudalan province in the northeast of Burkina Faso, and Ansongo Inlier in eastern Mali. *Ore Geology Reviews*. Volume 78, October 2016, Pages 645-651.
- Herrero-Hernández, E., Rodríguez-Cruz, M.S., Pose-Juan, E., Sánchez, G.S., Andrades, M.S., Sánchez-Martín, M.J., 2017. Seasonal distribution of herbicide and insecticide residues in the water resources of the vineyard region of La Rioja (Spain). *Sci Total Environ* 609:161–171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07>.
- Hilson, G., Banchirigah, S.M., 2009. Les projets de moyens d'existence alternatifs réduisent-ils la pauvreté dans les communautés minières ? Expériences du Ghana. *Journal of Development Studies* 45 (2), pp. 172 - 196.
- Hilson, G., McQuilken, J., 2014. Four decades of support for artisanal and small-scale mining in sub-Saharan Africa : A critical review. *The Extractive Industries and Society*. Volume 1, Issue 1, March 2014, Pages 104-118.

Hilson, G., 2009. Small-scale mining, poverty and economic development in sub-Saharan Africa : an overview. *Resources Policy* 34 (1-2), 1-5.

Holmstrom, H., Ljungberg, J., Ohlander, B., 2000. The character of the suspended and dissolved phases in the water cover of the flooded mine tailings at Stekenjokk, northern Sweden. *Science of The Total Environment*, 247, N°, pp : 15-31.

Huang, X., He, J., Hong, Q., Chen, K., He, Q., Zhang, L., Liu, X., Chuang, Q., Li, S., Jiang, J., 2016. Microbial catabolism of chemical herbicides : microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes. *Pestic Biochem Physiol* 143 :272-297. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2016.11.010>.

Hug, S.J., Canonica, L., Wegelin, M., Gechter, D., Von, Gunten, U., 2001. Solar oxidation and removal of arsenic at circumneutral pH in iron containing waters, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 2114-2121.

Ibrahim, O.Z., Tankari, A.D., Guero, Y., Idi, M.F.M., Feidt, C., Sterckeman, T., Echevarria, G., 2019. Distribution spatiale des éléments traces métalliques dans les sols de la zone aurifère de Komabangou au Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 13(1): 557-573.

Ibrahim, I., 2013. Etude de l'applicabilité des échantillonneurs passifs POCIS et Checather pour le suivi des pesticides en milieu aquatiques. Saint-Etienne, EMSE.

Ibrahim, I., Togola, A., Gonzalez, C., 2013a. Polar organic chemical integrative sampler (POCIS) uptake rates for 17 polars pesticides and degradation products : laboratory calibration. *Environ Sci Pollut Res* 20: 3679–3687. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1284-3>.

Ibrahim, I., Togola, A., Gonzalez, C., 2013b. In-situ calibration of POCIS for the sampling of polars pesticides and metabolites in surface water. *Talanta* 116:495–500. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.07.028>.

Ilyassou, K.M., Adamou, R., Schiffers, B., 2018. First diet survey in Niger River valley and acute risk assessment for consumers exposed to pesticide residues in vegetables. *Tunisian Journal of Plant Protection* 13 (2): 243-262.

Ilyassou, K.M., Adamou, R., Schiffers, B., 2017. Risk assessment for small farmers exposed to plant protection products in the Niger River Valley. *Comm. Appl. Biol. Sci*, Ghent University, 81/n, 2017

INERIS, 2018. Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 31 décembre 2017.

INERIS, 2006. Choix des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) – Arsenic. Rapport d'étude. N°INERIS-DRC-06-66670-ETSC-BDo-06-DR082.doc du 18 décembre 2006. Programme EAT - DRC – 26.

Initiative pour la Transparence des Industries Extractives, 2016. Rapport ITIE-Niger exercice fiscal 2014, octobre 2016, https://eiti.org/sites/default/files/documents/rapport_itie_2014_vf.pdf

INS, 2012. Présentation des résultats préliminaires du quatrième recensement général de la population et de l'habitat (RGP/H). INS, Niamey, Niger, 9 pp.

INSERM, 2013. Pesticides : Effets sur la santé. Paris : Inserm, URL : [Expertise+Pesticides+Synthèse+2013+VF.pdf](#).

ISO 10706, 2000. Water quality – Determination of long-term toxicity of substances to *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea). ISO Standards.

- ISS (Institut d'études de sécurité), 2017. 'Liptako-Gourma : epicentre of the Sahel crisis ?', <https://issafrica.org/pscreport/situation-analysis/liptako-gourma-epicentre-of-the-sahel-crisis> (consulté le 24 juin 2018).
- Jablonowski, N.D., Schäffer, A., Burauel, P., 2011. Still present after all these years : persistence plus potential toxicity raise questions about the use of atrazine. *Env. Sci. Poll. Res.*, 18: 328-331.
- Jalal, H., Baghdad, O., Moumen, B., Michel, W., 1999. Contamination par les nitrates des eaux souterraines de la plaine d'Akkar au Liban du Nord. *Cahiers Santé* 1999 ;9 :219-23
- Jönsson, J.B. Fold, N., 2011. Mining 'From Below': Taking Africa's Artisanal Miners Seriously. *Geography Compass* 5/7 (2011): 479-493.
- Jorgenson, B., Fleishman, E., Macneale, K.H., Schlenk, D., Scholz, N.L., Spromberg, J.A., Werner, I., Weston, D.P., Xiao, Q., Young, T.M., Zhang, M., 2013. Predicted transport of pyrethroid insecticides from an urban landscape to surface water. *Environ Toxicol Chem* 32:2469- 2477. <https://doi.org/10.1002/etc.2352>.
- Kanda, M., Wala, K., Batawila, K., Djaneye-Boundjou, G., Ahanchédé, A., Akpagana, K., 2009. Le maraîchage périurbain à Lomé : pratiques culturelles, risques sanitaires et dynamiques spatiales. *Cah Agric*, vol. 18, n°4, juillet-août 2009.
- Kanda, M., Djaneye-Boundjou, G., Wala, K., Gnandi, K., Batawila, K., Sanni, A., Akpagana K., 2013. Application des pesticides en agriculturemaraîchère au Togo. *Vertigo* – La revue électronique en sciences de l'environnement 13(1) 4-8. Disponible sur <https://doi.org/10.4000/vertigo.13456>.
- Kamagaté, B., Seguis, L., Favreau, G., Seidel, J.L., Descloitres, M., Affaton, P., 2007. Processus et bilan des flux hydriques d'un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin (Donga, haut Ouémé). *C. R. Geoscience* 339, pp 418-429.
- Keita, S., 2001. Etude sur les mines artisanales et les exploitations minières à petite échelle au Mali. *Mining, Minerals and Sustainable development*.
- Kim, M.J., Nriagu, J., Haack, S., 2003. Arsenic behavior in newly drilled wells, *Chemosphere*, 52, 623-633.
- Knüesli, E., 1970. History of the development of Atrazine herbicides. *Single Pesticide Volume: The Triazine Herbicides* pp 1-9| Cite as.
- Korte, E., Fernando, Q., 1991. A review of arsenic (III) in groundwater, *Critical Reviews in Environmental Control*, 21:1, 1-39, DOI: 10.1080/10643389109388408
- Labonne, B., 2014. Who is afraid of artisanal and small-scale mining (ASM) ? *The Extractive Industries and Society* 1 (2014) 121-123.
- Labour, B., 1993. *We have never been modern*. Cambridge, MA : Havard University Press.
- Lange, S., 2008. *Land Tenure And Mining In Tanzania*. Bergen, Norway : Chr Michelsen Institute (2008).
- Laperche, V., Bodéan, F., Dictor, M.C., Baranger, P., 2003. Guide méthodologique de l'arsenic appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP-52066-FR, 91 p.
- Lawani, A.N., Kelome, N.C., Tchibozo, A.D.M., Hounk, J.B., Adjagodo, A., 2017. Effects of agricultural practices on the pollution of surface water in benin republic. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°30, Juin 2017, pp. 173-190. All rights reserved, Legal Deposit 1266-2002.

- Lipfert, G., Reeve, A.S., Sidle, W. C., Marvinney, R., 2006. Geochemical patterns of arsenic-enriched groundwater in fractured, crystalline bedrock, Northport, Maine, USA. *Applied Geochemistry* 21, 528-545.
- Le Barbe, L., Ale, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y., 1993. Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Paris, ORSTOM, 540 pages.
- Le Bars, M., Sidibe, F., Mandart, E., Fabre, J., Le Grusse, P., Diakite, C.H., 2020. Évaluation des risques liés à l'utilisation de pesticides en culture cotonnière au Mali. *Cash. Agric.* 2020, 29, <https://doi.org/10.1051/cagri/2020005>.
- Leduc, C., Karbo, A., 1996. Variabilité spatio-temporelle de l'impact de l'infiltration sur la nappe phréatique du Continental terminal (Hapex-Sahel, Niger). In : Hoepffner Michel (ed.), Lebel Thierry (ed.), Monteny Bruno (ed.). *Interactions surface continentale/atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel*. Paris : ORSTOM, 449-462. (Colloques et Séminaires). *Journées Hydrologiques*, 10., Montpellier (FRA), 1994/09/13-14. ISBN 2-7099-1307-0.
- Lehmann, E., Oltramare, C., Dibié, J.-J.N., Konaté, Y., Alencastro, L.F., 2018. Assessment of human exposure to pesticides by hair analysis: The case of vegetable-producing areas in Burkina Faso. *Environment International*. Volume 111, February 2018, Pages 317-331.
- Lehmann, E., Turrero, N., Kolia, M., Konaté, Y., Alencastro, L.F., 2017. Dietary risk assessment of pesticides from vegetables and drinking water in gardening areas in Burkina Faso. *Science of The Total Environment*. Volumes 601-602, 1 December 2017, Pages 1208-1216.
- Leo, J., De Haan, 1992. *Agriculteurs et éleveurs au Nord-Bénin : conséquences écologiques de l'interdépendance transformée. Rapport d'étude financé par la Commission de l'Union européenne. Faculté des sciences environnementales de l'Université d'Amsterdam aux Pays-Bas en collaboration avec la faculté d'agronomie de l'université nationale du Bénin.*
- Lombi, E., Wenzel, W.W., Adriano, D.C., 2000b. Arsenic-contaminated soils : II. Remedial action, chap 33, in *Remediation engineering of contaminated soils*, D.L. Wise, D.J. Trantolo, E.J. Cichon, H.I. Inyang and U. Stottmeister editors, Dekker, New York, p. 739-758.
- Luning, S., 2006. L'exploitation artisanale de l'or au Burkina Faso: permis, pauvreté et perceptions des pauvres à Sanmatenga, le «pays de l'or» . In: Hilson, G. (éd.) *Small - scale mining, rural subsistence and poverty in West Africa*. Rugby, Royaume - Uni : Intermediate Technology Publications Ltd, pp. 135 - 147.
- Mac, L.T.M., Peluso, L., Marino, D.J.G., 2017. Pesticide impact study in the peri-urban horticultural area of Gran La Plata, Argentina. *Sci Total Environ* 598:572–580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.116>.
- Machens, E., 1973. Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'ouest de la République du Niger. Ministère des Mines, de la Géologie et de l'Hydraulique de la République du Niger. Direction des mines et de la géologie, 4. BRGM n°82, 167 p.
- Mhadhbi, T., Pringault, O., Nouri, H., Spinelli, S., Beyrem, H., Gonzalez, C., 2019. Evaluating polar pesticide pollution with a combined approach : a survey of agricultural practices and POCIS passive samplers in a Tunisian lagoon watershed. *Environmental Science and Pollution Research* (2019) 26:342–361 <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3552-3>.
- Mahe, G., Lienou, G., Bamba, F., Paturel, J. E., Adeaga, O., Descroix, L., Mariko, A., Olivry, J. C., Sangare, S., Ogilvie, A., Clanet, J. C., 2011. Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années. *Hydro-climatology: Variability and Change (Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011)* (IAHS Publ. 344, 2011).

Mahaman, M.S.D., Cristian, C.S., Mahaman, B.S., Alin, M., Gheorghe, R., 2018. Groundwater quality analysis in warm semi-arid climate of Sahel countries : Tillabéri region, Niger. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, February 2018, Vol. 13, No. 1, p. 277 – 290.

Mamadou, A., Doumma, A., Mazih, A., Coulibaly B.M., 2008. Exposition aux organophosphorés en milieu rural nigérien : étude de l'activité enzymatique érythrocytaire des cholinestérases comme indicateur biologique. (*Vertigo*). *La revue électronique en sciences de l'environnement*, 8(3), 0-0.

Mamadou, A., Mazih, A., Inezdane, A., 2005. L'impact des pesticides utilisés en lutte contre le criquet pèlerin (*schistocerca gregaria* Forskål, 1775) (orthoptera, acrididae) sur deux espèces de pimelia (coleoptera, tenebrionidae) au Niger. *La revue électronique en sciences de l'environnement*. Volume 6, numéro 3 / 2005. <https://doi.org/10.4000/vertigo.3665>.

Mamane, A. 2015. Effets sanitaires aigus de l'exposition aux pesticides en milieu rural. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, France, 235 p.

Mamane, A., Baldi I., Tessier, J-F., Raheison, C., Bouvier, G., 2014. Occupational exposure to pesticides and respiratory health. *European Respiration Review* 24 : 306-319 ; DOI: 10.1183/16000617.00006014.

Mamane, A., Tessier, J-F., Bouvier, G., Salamon, R., Lebailly, P., Raheison, C., Baldi, I., 2016. Increase in the Risk of Respiratory Disorders in Adults and CHILDREN Related to Crop-Growing in Niger. *Journal of Environmental and Public Health*. Volume 2016, Article ID 9848520, 8 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9848520>.

Mamy, L., Patureau, D., Barriuso, E., Bedos, C., Bessac, F., Louchart, X., Martin-Laurent, F., Miège C., Benoit, P., 2015. Prediction of the fate of organic compounds in the environment from their molecular properties: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 45: 1277-1377.

Mandal, B.K., Suzuki, K.T., 2002. Arsenic round the world : a review, *Talanta*, 58, 201-235.

Marie, E.D., Geoffrey, I., Scott, Philippe E.R., 2000. Toxicity of pesticides to aquatic microorganisms : a review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 20, No. 1, pp. 84–98, 2001 Printed in the USA. 0730-7268/01 \$9.00 1 .00.

Mast, M.A., Foreman, W.T., Skaates, S.V., 2007. Current-use pesticides and organochlorine compounds in precipitation and lake sediment from two high-elevation national parks in the Western United States. *Arch Environ Contam Toxicol* 52:294–305. <https://doi.org/10.1007/s00244-006-0096-1>

Matera, V., 2001. Etude de la mobilité et de la spéciation de l'arsenic dans les sols de sites industriels pollués : Estimation du risque induit. Thèse de doctorate n Chimie et microbiologie de l'eau. Université de Pau et des pays de l'Adour.

Maxime, E., Sabine, H., Denis, K., 2005. Evaluation et gestion de l'exposition au Baryum. *Atelier Santé Environnement – IGS – ENSP – 2005*.

Milési, J.P., Feybesse, J.L., Ledru, P., Dommanget, A., Ouedrago M.F., Marcoux, E., Prost, A.E., Vinchon, C., Sylvain, J.P., Johan, V., Tegye, M., Calvez, J.Y., Lagny, P., 1989. "les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'ouest, chron." *Rech. Min.*, 497 3 -98.

Milési, J.P., Feybesse, J.L., 1992. Early Proterozoic ore deposits and Tectonics of the Birimian orogenic Belt, West Africa. *Precambrian Research* 58, 305–344.

Molénat, N., Holeman, M., Pinel, R., 2000. L'arsenic, polluant de l'environnement : origines, distribution, biotransformation, *L'Actualité Chimique*, juin 2000, 12-23.

- Moore, N., Walker, R., Hayes, H., 1990. Reaction Scheme for the Oxidation of as(III) to as(V) by Birnessite. *Clays Clay Miner.* 38, 549–555 (1990). <https://doi.org/10.1346/CCMN.1990.0380512>.
- Muller, P., 1947. " L'Histoire du D.D.T. ". Cycle de conférence du Palais de la Découverte, Paris, 22 Janvier 1947.
- Multigner, L., Kadhel, P., Huc-Terki, F., Thome, J., Janky, E., Auger, J., 2006. Exposure to chlordecone and male fertility in Guadeloupe (French West Indies). *Epidemiology* 17, S372
- Ministère de la santé publique, 2004. Arrêté N°141/MSP/LCE/DGSP/DS fixant les normes de potabilité de l'eau de boisson, au Niger. J.O N°28 du 15 avril 2005.
- Naujokas, M.F., Anderson, B., Ahsan, H., Aposhian, H.V., Graziano, J.H., Thompson, C., Suk, W.A., 2013. The broad scope of health effects from chronic arsenic exposure : update on a worldwide public health problem. *Environmental Health Perspectives (Online)* 121 (3), 295.
- Nesbitt, H.W., Muir, I.J., 1997. Oxidation states and speciation of secondary products on pyrite and arsenopyrite reacted with mine waste waters and air. *Mineralogy and Petrology* (1998) 62: 123-144.
- Ngom, S., Anastasie, M., Moussoukhoye, D., Mamadou, B.T., Jean, K., Ibrahima, C., Seybou, T., 2013. Etude de l'évolution des résidus de pesticides dans les produits horticoles de grande consommation au Sénégal ; *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* 22 : 31-34.
- Norbert, N.T., Daniel B.K.N., Eric, D.N., 2017. Évaluation des facteurs de risques environnementaux liés à la mauvaise utilisation des pesticides par les maraîchers au Cameroun : le cas de Balessing à l'Ouest Cameroun. *Afrique SCIENCE* 13(1) (2017) 91 – 100. ISSN 1813-548X.
- Nzihou, J.F., Bouda, M., Hamidou, S., Diarra J., 2013. Arsenic in Drinking Water Toxicological Risk Assessment in the North Region of Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection* 5, 46-52.
- Obiri, S., Dodoo, D.K., Essumang, D.K., Okai-Sam, F., 2006. Cancer health risk assessment from exposure to arsenic by workers of Anglogold Ashanti-Obuasi Mine. *Bull Environ Contam Toxicol* 76:195–201.
- OCDE/ALG, 2018. Evaluation des chaînes d'approvisionnement en or produit au Burkina Faso, Mali et Niger. Cofinancé par l'Union Européenne <http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf>
- OECD, 1998. OECD guideline for testing of Chemicals – *Daphnia magna*. Reproduction test. Experimental guideline.
- Ogbeide, O., Tongo, I., Ezemonye, L., 2015. Risk assessment of agricultural pesticides in water, sediment, and fish from Owan River, Edo State, Nigeria. *Environ Monit Assess* 187, 654 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4840-8>.
- Ojo J., 2016. Pesticides use and health in Nigeria. *Ife Journal of Science*. Vol 18 No. 4(2016).
- Okoumassoun, L-E., Brochu, C., DeBlois, C., Akponan, S., Marion, M., Averill-Bates, D., Denizeau F., 2002. Vitellogenin in tilapia male fishes exposed to organochlorine pesticides in Ouémé River in Republic of Benin. *Science of the Total Environment* 299: 163–172.
- OMS, 2017. Directives de qualité pour l'eau de boisson, quatrième édition, Organisation Mondiale de la Santé, Genève.
- OMS, 2007. Exposure to Mercury : A Major Public Health Concern. Disponible sur le site suivant : <http://www.who.int/ipcs/features/mercury.pdf>.

- OMS, 2011. Directives de qualité pour l'eau de boisson. Quatrième édition. Publication Organisation Mondiale de la Santé. Genève, Suisse. pp.307-447.
- OMS, 2011. « Manganese in drinking-water : background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality ». Geneva.
- OMS, 2004. Directive de l'OMS pour la qualité de l'eau de boisson. 3^e édition.
- O'Neill, J. D., Telmer, K., 2017. Estimer l'utilisation du mercure et identifier les pratiques de l'extraction minière artisanale et à petite échelle de l'or (EMAPE). Genève, Suisse: ONUEnvironnement. ISBN 978-1-7752254-2-3. Estimation.
- Opel, O., Palm, W., Steffen, D., Ruch, W.K.L., 2011. Inside-sediment partitioning of PAH, PCB and organochlorine compounds and inferences on sampling and normalization methods. *Environ. Pollut.* 159, 924-931. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.12.014>.
- Organisation mondiale de la Santé (OMS), 2017. Risques pour la santé au travail et l'environnement associés à l'extraction minière artisanale et à petite échelle de l'or.
- Organisation mondiale de la santé / Programme des Nations Unies pour l'environnement (OMS/PNUE), 1989. Public health impact of pesticides used in agriculture, Report of WHO/UNEP Working Group, Genève, 140p.
- Oscarson, D.W., Huang, P.M., Liaw, W.K., 1981a. Role of manganese in the oxidation of arsenate by fresh water lake sediments. *Clays and Clay Minerals*, 29, 219-25.
- Oscarson, D.W., Huang, P.M., Liaw, W.C., Hammer, U.T., 1983a. Kinetics of oxidation of arsenite by various manganese dioxides. *J. Soil. Sci. Soc. Am.*, 47, 644-8.
- Ousmane B., Soumaila A., Margueron T., Daddy Gaoh A., Boubakar H. A., 2001. Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : cas de Niamey. Rapport UNESCO/UNEP/PHI/ECA. 20 pp.
- Ousmane, B., 1988. Étude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi et Zinder-est). Thèse sciences, 152 p. Université A.M. de Niamey, Niger.
- Palma, P., Ledo, L., Alvarenga, P., 2016. Ecotoxicological endpoints, are they useful tools to support ecological status assessment in strongly modified water bodies ? *Sci. Total Environ.* 541, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.014>.
- Palma, G., Sánchez, A., Olave, Y., Encina, F., Palma, R., Barra, R., 2004. Pesticide levels in surface waters in an agricultural-forestry basin in Southern Chile. *Chemosphere* 57:763-770. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.047>.
- Pescod, M. B. (dir.), 1992. Wastewater Treatment and Use in Agriculture, Irrigation and Drainage Paper, no 47, Rome, FAO.
- Pinto, M.I., Vale, C., Sontag, G., Noronha, J.P., 2016. Pathways of priority pesticides in sediments do coastal lagoons : the case study of Obidos Lagoon, Portugal. *Mar. Pollut. Bull.* 106, 335-340. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.028>.
- Plagellat, C., 2004. Origines et flux de biocides et de filtres UV dans les stations d'épuration des eaux usées. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.
- Pons J., Barbey P., Dupuis D., Léger J.M., 1995. Mechanism of emplacement and structure of a 2.1 Ga juvenile continental crust: the Birimien of southwestern Niger. *Précambrien research*, n° 70, pp 281-301.

- Poulard, C., Breil, P., Hauchard, E., Dehotin, J., Lagadec, L.R., Patrice, P., 2015. Le ruissellement, comprendre pour diagnostiquer et agir. *Techni. Cités* 21-28.
- Poulier, G., Lissalde, S., Charriau, A., Buzier, R., Delmas, F., Gery, K., Moreira, A., Guibaud, G., Mazzella, N., 2014. Can POCIS be used in water framework directive (2000/60/EC) monitoring networks ? A study focusing on pesticides in a French agricultural watershed. *Sci Total Environ* 497–498:282–292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.001>.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2015. Developing a National Action Plan to reduce, and where feasible, eliminate mercury use in artisanal and small scale gold mining : working draft. Genève : Programme des Nations Unies pour l'environnement.
- Programme de productivité agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO), 2016. Plan de Gestion des Pestes (PGP), Niger. Conseil Ouest Africain et du Centre pour le Recherche et le Développement (CORAF / WECARD). Rapport.
- Proust, N., Picot, A., 2000. Toxicologie de l'Arsenic et ses composés : importance de la spéciation, *Actualité Chimique*. 2000, n°6, pages 3 à 11.
- Rabiet, M., Margoum, C., Gouy, V., Carluer, N., Coquery, M., 2008. Transfert des pesticides et mé taux dans un petit bassin versant viticole. Étude préliminaire de l'influence des conditions hydrologiques sur le transport de ces contaminants. In: *Ingenieries Special issue "Azote, phosphore et pesticides Stratégies et perspectives de réduction des flux"*, pp. 65–75.
- RAF/7/011, 2017. Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel. Système du Liptako-Gourma et de la Haute-volta.
- Rauch, J.N., Pacyna, J.M., 2009. Earth's global Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Zn cycles: Global Metal Cycles. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008GB003376>
- Ravenscroft, P., Brammer, H., Richards, K., 2009. Arsenic pollution: a global synthesis. Wiley-Blackwell, West Sussex (UK).
- RECA, 2013. Pesticides authorized in Niger between common CILSS regulations and CDEAO regulations; briefing note n° 25, 5.
- Reichelt, R., 1972. Géologie du Gourma (Afrique occidentale). Un « seuil » et un bassin du précambrien supérieur. Stratigraphie, tectonique, métamorphisme. *Mémo. BRGM*, N°53, 213p.
- Smedley PL, Knudsen J, Maiga D., 2007. Arsenic in groundwater from mineralized proterozoic basement rocks of Burkina Faso. *Applied Geochemistry* 22: 1074–1092.
- Roza, O., Berman, L.B., 1971. The pathophysiology of barium: Hypokalemic and cardiovascular effects. *J Pharmacol Exp Ther* 177:433-439.
- Rudnick R. L., Gao S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise Geochem* 3 :1-64. t: <https://www.researchgate.net/publication/234288836>
- Ryberg, K.R., Gilliom, R.J., 2015. Trends in pesticide concentrations and use for major rivers of the United States. *Sci Total Environ* 538:431–444 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.095>.
- Sako, A., Bamba, O., Gordio, A., 2016. Hydrogeochemical processes controlling groundwater quality around Bomboré goldmineralized zone, Central Burkina Faso. *J. Geochem. Explor.* 170 :58–71.

- Salvarredy, M.M.A., 2008. Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approches géochimique minéralogique et hydrochimique, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, Paul Sabatier, 489p.
- Sandrine, G., 2012. L'orpaillage face à l'arrivée des industries minières aurifères : cas du Burkina Faso. Montréal : 17e Colloque international en évaluation environnementale ; 2012. Juin. pp. 1–4.
- Sangaré, A., Driouch, Y., Salvi, S., Féménias, O., Siebenaller, L., Belkasmi, M., Béziat, D., Dahire, M., Ntarmouchant, A., Adil, S., Debat, P., 2014. Géologie des minéralisations aurifères du gisement tardi-éburnéen de Kalana (Birimine, Sud-Ouest du Mali). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre, 2014, n° 36, 85–108.
- Santé Canada, 2019. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique — Le manganèse. Bureau de la qualité de l'eau et de l'air, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa (Ontario). (No de catalogue H144-39/2017F-PDF).
- Santé Canada – Recommandations pour la qualité de l'eau potable ; Baryum, 1990. http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/watereau/doc_sup-appui/index_f.html
- Savage, K.S., Tingle, T.N., O'Day, P.A., Waychunas, G.A., Bird, D.K., 2000. Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode Gold District, Tuolumne County, California. *Appl. Geochem.* 15, 1219–1244.
- Schiffers, B., 2012. L'emploi des pesticides dans les cultures : entre tracteurs et détracteurs. *Probio – revue* 2012/2.
- Scott, J., Morgan, J., 1995. Oxidation of As (III) by synthetic bimesite. *Environ. Sci. Technol.* 1995, 29, 1898-1905.
- Seidou, G., Hassane, M., Badio, S.B., Moussa, K., 2012. Effets du fluor sur l'os en développement : à propos de 104 cas observés dans une commune rurale du Niger. *J Afr Imag Méd*; (4), (2): 66-73.
- Smedley, P.L., Knudsen, J., Maiga, D., 2007. Arsenic in groundwater from mineralized proterozoic basement rocks of Burkina Faso. *Applied Geochemistry* 22: 1074–1092.
- Smedley, L., Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, Volume 17, Issue 5, May 2002, Pages 517-568
- Smedley, P.L., 1996. Arsenic in rural groundwater in Ghana. *Journal of African earth Sciences*, 22:p. 459-470.
- Smernik, R.J., Kookana, R.S., 2015. The effects of organic matter-mineral interactions and organic matter chemistry on diuron sorption across a diverse range of soils. *Chemosphere* 119 :99–104. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.066>.
- SOGREAH/BRGM, 1981. Étude du plan de développement de l'utilisation des ressources en eau du Niger. Niamey : éditions BRGM.
- Soclo, H., 2003. Etude de l'impact de l'utilisation des engrais chimiques et pesticides par les populations riveraines sur les écosystèmes (eau de surface, substrat des réserves de faune) dans les complexes des aires protégées de la Pendjari et du W. Rapport d'étude. Cotonou : CENAGREF.

- Son D., Somda I., Legreve A., Schiffers B., 2017. Pratiques phytosanitaires des producteurs de tomate du Burkina Faso et risques pour la santé et l'environnement. *Cash. Agric.* 2017, 26, 25005. DOI: 10.1051/cagri/2017010.
- Somé T.I., Sakira A.K., Ouédraogo M., Ouédraogo T., Traoré A., Sondo B., Guissou I.P. (2012) - Arsenic levels in tubewells water, food, residents' urine and the prevalence of skin lesions in Yatenga province, Burkina Faso. *Interdisc. Toxicol.*, 5, 38-41.
- Son D., Somda I., Legreve A., Schiffers B. (2017) – Pratiques phytosanitaires des producteurs de tomate du Burkina Faso et risques pour la santé et l'environnement. *Cash. Agric.* 2017, 26, 25005. DOI: 10.1051/cagri/2017010.
- Sougnabe S.P., Yandia A., Acheleke J., Brevault T., Vaissayre M., Ngartoubam L.T. (2010) - Pratiques phytosanitaires paysannes dans les savanes d'Afrique centrale. Actes du colloque « Savanes africaines en développement : innover pour durer », 20-23 avril 2009, Garoua, Cameroun. Prasac, N'Djaména, Tchad ; Cirad, Montpellier, France, cédérom.
- Soumaila A., Konate M., 2005. Caractérisation de la déformation dans la ceinture birimienne (paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako nigérien, Afrique de l'Ouest). *Afr. Geo. Review.*, vol. 13, n° 3, pp 161-178.
- Soumaila A., Henry P. et Rossy M., 2004. Contexte de mise en place des roches basiques de la ceinture de roches vertes birimienne de Diagorou-Darbani (Liptako, Niger, Afrique de l'Ouest) : plateau océanique ou environnement d'arc/bassin arrière-arc océanique. *C. R. Géoscience*, n° 336, pp 1137–1147.
- Soumaila A., 2000. Etude structurale, pétrographique et géochimique de la ceinture de Diagorou-Darbani, Liptako, Niger Occidental (Afrique de l'Ouest). Thèse, Univ. Franche- Comté, 56-203p.
- Soumana, I., Boukary, I.A., Abdoul Habou, Z., Aissata, M., Mohamed, N., Abdoul Razak B.Y., Soukouradji, B., 2014. Rapport de synthèse du diagnostic participatif rapide d'identification des principales contraintes et des activités des sites d'intervention du projet PMERSA- MTZ, 52 p.
- Système du Liptako-Gourma et de la Haute-Volta, 2017. Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel. RAP/7/011.
- Tankari, A.D., Ibrahim, O.Z., Guéro, Y., Morel, J.L., Feidt, C., Echevarria G., 2019. Impacts of artisanal gold mining on soil, water and plant contamination by trace elements at Komabangou, Western Niger. *Journal of Geochemical Exploration* 205 (2019) 106328.
- Tankari D.A., Tidjani D.A., Idder G.T., Yajji, Dan Lamso N., Matsallabi A., Abouta J.M.K., Feidt C., Sterckeman T., Echevarria G., 2014. Diagnostic de la contamination des eaux par les éléments traces métalliques dans la zone aurifère de Komabangou – Tillabéri, Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 8(6): 2849-2857.
- Tarnagda B., Tankoano A., Tapsoba F., Sourabié P. B., Abdoullahi H. O., Djbrine A. O., Drabo K. M., Traoré Y., Savadogo A. (2017) - Évaluation des pratiques agricoles des légumes feuilles : le cas des utilisations des pesticides et des intrants chimiques sur les sites maraîchers de Ouagadougou, Burkina Faso. *Journal of Applied Biosciences* 117: 11658-11668.
- Tissier, C., Morvan, C., Bocquené, G., Grossel, H., James, A., Marchand, M., 2005. Les substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). In *Fiches des synthèses Ifremer*.
- Tlustõs, P., Goessler, W., Száková, J., Balík, J., 2002. Arsenic compound in leaves and roots of radish brown in soil treated by arsenite, arsenate and dimethylarsinic acid, *Appl. Organomet. Chem.*, 16, 216-220.

- Torres A.M.R., O'Flaherty L.M. 1976. Influence des pesticides sur *Chlorella*, *Chlorococcum*, *Stigeoclonium* (Chlorophyceae), *Tri-bonema*, *Vaucheria* (Xanthophyceae) et *Oscillatoria* (Cyano-phyceae) . *Phycologia* 15 : 25 – 36.
- Traoré, A., Haggblade. S., 2017. Mise en œuvre des politiques régionales sur les pesticides en Afrique de l'Ouest : rapport de l'étude de cas en guinée. Document de Travail 68. Août 2017.
- Traoré, A., Ahoussi, K.E., Aka N., Traoré A., Soro N., 2015. Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Pure App. Biosci.* 3 (4): 312-322 (2015). ISSN: 2320 – 7051.
- Traoré, S.K., Mamadou, K., Dembélé, A., Lafrance, P., Mazellier, P., Houénou, P., 2006. Contamination de l'eau souterraine par les pesticides en régions agricoles en Côte d'Ivoire (centre, sud et sud ouest). *Journal Africain des Sciences de l'Environnement*, 1:1-9.
- Travi, Y., Mudry, J., 1997. Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Hydrogeology*. 1997, Num 1, pp 13-21 ; Geological sketch map, Illustration, Table ; ref : 1 p.
- Truhaut, R., 1977. Ecotoxicology : Objectifs, principes and perspectives. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 1, 151-173. [https://doi.org/10.1016/0147-6513\(77\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0147-6513(77)90033-1).
- Tseng W.P., 1977. Effects and dose--response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic. . *Environmental Health Perspectives*, 19, 109-19.
- Tseng W.P., Chu H.M., How S.W., Fong J.M., Lin C.S., Yeh S., 1968. Prevalence of skin cancer in an endemic area of chronic arsenicism in Taiwan. *J Nat l Cancer Inst*, 40, (3), 453-63.
- Turner, L. 2003. Diuron analysis of risks to endangered and threatened salmon and steelhead. In U.S. USEPA. United state environment protection agency. Office of prevention, pesticides and toxic substances. Environmental Field Branch Office of Pesticide Programs.
- UNDESA, (2003) - Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies (UNDESA) : Éradication de la pauvreté et moyens de subsistance durables : se concentrer sur les communautés minières artisanales. Projet SPPD RAF / 99/023. Rapport final.
- UNESCO, 2009. La pollution naturelle à l'arsenic de l'eau potable est maintenant considérée comme une menace globale affectant près de 140 millions de personnes dans 70 pays sur tous les continents. <http://www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-41-natural-arsenic-pollution/>.
- Viers J. Dupré B. Gaillardet J. 2009. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database. *Science of The Total Environment* Volume 407, Issue 2, 1 January 2009, Pages 853-868.
- WHO, 2004. « Guidelines for Drinking-water Quality » Recommendations, Vol1, third Edition, Geneva, 494p.
- WHO, 1990. Public health impact of pesticides used in agriculture. Geneva.
- World Bank, 1996. 'Resettlement and Development : the Bankwide Review of Projects Involving Involuntary Resettlement, 1986–1993', Environment Department Paper No. 032 (World Bank, Washington, DC).

Wilkinson, R.J., Keller, V.D.J., Barton, S., Swinden, J., 2017. Occurrence, fate and transformation of emerging contaminants in water : An overarching review of the field. Environ. Pollut. 231, 954-970. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.032>.

Yang, Q., Culbertson, C.W., Nielsen, M.G., Schalk, C.W., Johnson, C.D., Marvinney, R.G., Stute, M., Zheng Y., 2015. Flow and sorption controls of groundwater arsenic in individual boreholes from bedrock aquifers in central Maine, USA. Science of the Total Environment 505, 1291-1307.

Zabeirou, H., Guero, Y., Tankari, D., Haougui, A., Basso, A., 2018. Farmer practices of using pesticides on vegetable crops in the department of Madaou ; EWASH and journal volume n 2018, 263-74. ISSN 2509-1069.

Zeidler, O., 1874. Verbindungen von chloral mit brom und chlorbenzol. Ber. Deutsch. Chem. Gesellschaft 7:1180-1181.

Zotov, A.V., Laputina, I.P., Chichagov, A.V., 1972. Pyrite arseniée des sources thermals de l'île Kunashir, Kouriles. Geol. Rudn. Mestorozhd.; S.S.S.R.; 1972, VOL. 14, NUM. 0001, P. 125 A 131.

Annexe 1 : Liste des points d'échantillonnage

| N° | Nom du village | conductivité (µS/cm) | Type d'ouvrage | Type d'aquifères | Formation Géol | Prof (m) |
|----|---------------------------|----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|----------|
| 1 | Nbanga | 783,00 | Puits | Altérites | Roches vertes | 34 |
| 2 | Guériel | 576,00 | Forage | Altérites | Granite fissuré | 48 |
| 3 | Diagourou | 638,00 | Forage | Altérites | Granite fissuré | 72 |
| 4 | Tamou | 522,00 | Forage | Ct ³ | Ct | 46 |
| 5 | N'Dounga | 604,00 | Forage | Altérites | Granite fissuré | 88 |
| 6 | Puits kollo Bossey | 196,10 | Puits | Ct ³ | Ct | 28 |
| 7 | forage kollo Bossey | 1 337,00 | Forage | Ct ² | Ct | 154 |
| 8 | Takawete | 211,10 | Forage | Ct ³ | Ct | 35 |
| 9 | Doumba | 935,00 | Forage | Altérites | Roches vertes | 60 |
| 10 | puits de Bouka Komabangou | 473,00 | Puits | Altérites | Schistes altérés | 60,0 |
| 11 | Forage de Komabangou | 742,00 | Forage | Altérites | Schistes altérés | 70,0 |
| 12 | SEFA Moussa forage | 828,00 | Puits | Altérites | Roches vertes | 40,0 |
| 13 | Koné Beré | 64,30 | Forage | FraCtures | Granite fissuré | 90,0 |
| 14 | Mangaizé | 524,00 | Forage | Ct ³ | Ct | 60,0 |
| 15 | Boulkagou | 469,00 | Forage | Altérites/FraCtures | Granite fissuré | 64,0 |
| 16 | Beylandé | 1 142,00 | Forage | Ct ³ | Ct | 30,0 |
| 17 | Boulounjouna | 1 003,00 | Puits | Altérites | Roches vertes | 50 |
| 18 | Simiri | 1 275,00 | Forage | Ct ³ | Ct | 64,0 |
| 19 | Boydgé | 69,90 | Forage | Ct ³ | Ct | 54 |
| 20 | Makalondi | 487,00 | Forage | FraCtures | Granite fissuré | 38 |
| 21 | Niafarou | 85,60 | Puits | Altérites | Roches vertes | 10 |
| 22 | Sassaga | 405,00 | Puits | Ct ³ | Ct | 60 |
| 23 | Torodi | 344,00 | Forage | FraCtures | Socle | 59 |
| 24 | Doukou Makani | 329,00 | Forage | FraCtures | Gneiss fraCturé | 57 |
| 25 | Tondikiwindi | 817,00 | Forage | Ct ³ | Ct | 49 |
| 26 | Ayorou - Beibatan | 1 095,00 | Forage | FraCtures | Amphibolite fraCturée | 50 |
| 27 | Samira Village | 68,50 | Puits | Altérites | Roches vertes | 20 |

| | | | | | | |
|----|---------------|----------|--------|-----------------|-------------------|----|
| 28 | Tchetchirey | 498,00 | Forage | Altérites | Roches vertes | 90 |
| 29 | Kiota Oumarou | 1 605,00 | Forage | Ct ³ | Ct | 30 |
| 30 | Tidirka | 71,70 | Forage | Ct ³ | Ct | 98 |
| 31 | Zinbodon | 847,00 | Forage | FraCtures | Granite fissuré | 55 |
| 32 | Kokoro | 672,00 | Forage | FraCtures | Granite fissuré | 57 |
| 33 | Boura | 448,00 | Forage | Altérites | Roches vertes | 40 |
| 34 | Namaga | 470,00 | Forage | Altérites | Limite socle - RV | 52 |
| 35 | Kogorou | 292,00 | Puits | Ct ³ | Ct | 39 |
| 36 | Bani Kossey | 197,50 | Puits | Ct ³ | Ct | 40 |
| 37 | Tana Béri | 57,63 | Forage | Ct ³ | Ct | 50 |
| 38 | Karakara | 417,20 | Forage | Ct ³ | Ct | 57 |
| 39 | Sona | 963,00 | Forage | Ct ³ | Ct | 75 |
| 40 | Biyegoro | 926,00 | Forage | Altérites | Roches vertes | 65 |
| 41 | Sinsin Koga | 116,50 | Forage | Altérites | Roches vertes | 67 |
| 42 | Arotondo | 597,00 | Forage | FraCtures | Granite fissuré | 67 |
| 43 | Wama | 648,00 | Forage | FraCtures | Granite fissuré | 48 |

Annexe 2 : Données utilisées pour le calibrage du jeu et les hypothèses de calcul

Tableau 30 : Données utilisées pour le calibrage du jeu et les hypothèses de calcul

| | | |
|--|--|---|
| 1 AKO | 10000 k FCFA | |
| Dépenses consommations alimentaires en milieu rural | 70 k FCFA/an/personne au niveau national, 40 k FCFA/an/personne dans le jeu | http://www.stat-niger.org/statistique/file/Vulnerabilite/vulnerabilite2008.pdf |
| Consommation en pesticide/insecticide (calibrage de la pollution agricole à l'hectare) | 4l/ha en moyenne—souvent en surconsommation; problème sanitaire associé dû au manque d'information et aux mauvaises pratiques + proximité avec les points d'eau Les prix de cession des engrais pour le coton sont aussi reconduits à FCFA 240 le kilo, soit FCFA 12 000 le sac de 50 kilos. Ils sont de FCFA 230 le kilo pour les engrais sur le maïs (FCFA 11 500 le sac). Quant aux prix de cession des insecticides, ils sont de FCFA 2500 le flacon pour le traitement de 0,5 hectare. —> 5 AKO/ha Pour les herbicides, ils sont fixés à FCFA 3500 le litre pour les totaux et FCFA 5 000 le litre pour les sélectifs. —> 16 AKO/ha en moyenne | https://reca-niger.org/IMG/pdf/-3.pdf https://journals.openedition.org/vertigo/16534#tocto2n5 http://www.commodafrica.com/27-07-2017-au-benin-le-prix-au-producteur-de-coton-maintenu-fcfa-260-le-kilo-en-201718 |
| 1 gr d'or (prix moyen de revente) – prix fixe dans le jeu actuel | 12 k FCFA | https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/12852/Conference_de_Bamako_sur_l'orpaillage.pdf?sequence=1&isAllowed=y |
| Revenus annuels moyens des paysans Hors consommation (4 | 200 k FCFA 40 k FCFA —> 4 AKO | http://www.stat-niger.org/statistique/file/DSEDS/Dossier%20COMSITE%20DSEDS/DEPDD/ |

| | | |
|---|---|--|
| personnes) Calibrage de la création de richesses économiques locales | | Agriculture_Conditions_de_vie_menages.pdf |
| Taille moyenne des exploitations agricoles au Niger | 4,12ha—ménage de 6,6 personnes Dans le jeu, on part sur une petite exploitation de 2ha—ménage de 4 personnes | https://reca-niger.org/spip.php?article353 |
| Revenus annuels moyens des pêcheurs Hors consommation (5 personnes) Calibrage de la création de richesses économiques locales (en rapport à la turbidité) | 250 k F CFA 50 k F CFA → 5 AKO | http://atlas.statpeche-uemoa.org/atlas_uemoa/index.php?action=fiche&code=ni&type_code=SG&atl_version=0&idlang=fr |
| Revenus des orpailleurs (personnels chargés de l'extraction) Hors consommation (5 personnes) Calibrage du revenu des ouvriers | 30 k FCFA par sac de 100kg de minerais contenant environ 40gr d'or, en ayant enlevé le coût de l'achat de mercure Tour 1: 300 k FCFA Tour 1: 100 k FCFA → 10 AKO Moitié du revenu brut de l'extraction | https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/12852/Conference_de_Bamako_sur_l'orpaillage.pdf?sequence=1&isAllowed=y Observation faite par Oumar |
| Coût d'ouverture d'un puits Coût sanction si contrôle Coût installation cyanuration | 50 kFCFA 20 KFCFA 1 000 kFCFA (incluant taxe de 500 kFCFA pour orpailleur légal) - recalibrer dans le jeu car coût trop élevé | Données de terrain |
| Pollution eaux de surface dans la Sirba Pollution eaux de surface du Niger Pollution eaux souterraines | 70% de la pollution est d'origine métallique 30% de la pollution est d'origine agricole 100% pollution d'origine agricole (source: observation locale par Oumar) 100% d'origine métallique | |
| Libération d'arsenic | 135 grammes d'arsenic diffusé en pollution par gramme d'or récupéré (données Guyane) 80% captés dans les sédiments 20% dissous dans l'eau (source : Corinne Casiot) | |

| | | |
|---|--|---|
| <p>Pollution cyanure et mercure Calibrage : 80% du mercure et du cyanure total est perdu dans l'eau</p> | <p>Concernant l'impact environnemental et sanitaire des polluants, 20 à 50 g d'or sont récupérés pour 3 gouttes du mercure, cela dépend de la qualité du minerai. La grosse boule du mercure est vendue à 10000 f cfa et la petite à 45000 fcfa. 50 000 FCFA le kg, soit 0,005 AKO le gr 50 gr de mercure pour 30 gr d'or, soit 2 gr de mercure pour 1 gr d'or environ Pour le cyanure, 1 Kg de cyanure est utilisé pour traiter 2 brochettes de minerai dans un bassin moyen pour récupérer entre 20 à 40 kg d'or. Cela dépend également de la qualité du minerai extrait. Le tonneau de cyanure fait 50 kg de cyanure coûte 250000 fcfa (photos jointes).</p> | <p>https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/12852/Conference_de_Bamako_sur_l'orpaillage.pdf?sequence=1&isAllowed=y https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11478/GuidePractiqueReduireLUtilisationdeMercure_FR.pdf?sequence=1&isAllowed=y</p> |
|---|--|---|

Annexe 3 : Propos recueillis auprès des participants, janvier 2021

L'an 2021 et le mardi 06 juillet s'est débuté l'atelier de formation des C.L.C.D aux environs de 14h 30.

Aux abords de la formation le représentant de l'ONG Karkara a souhaité la bienvenue aux orpailleurs et expliqué par la même l'objectif de la formation.

Ensuite on a passé au remplissage de la liste de présence sur laquelle tous les participants présents à l'atelier se sont enregistrés. Entretemps les vingt-huit (28) images des aspects reflétant les pratiques artisanales sur les sites aurifères ont été affichées au tableau.

Les deux stagiaires ont procédé à la distribution des différentes images numérotées aux participants pour opérer leur choix en fonction de leur histoire personnelle ou émotionnelle. Les stagiaires annotent chaque numéro de l'image choisie par les participants sur un coupon qui leur sera remis.

Les femmes sont influencées dans leur choix par les hommes qui leur indiquent l'image à choisir ou souvent à limiter leur choix. « sanbu ihinka a wassa » qui veut dire littéralement « prends deux images ça suffit ».

Après cette phase, les participants se présentaient au tableau pour expliquer les raisons qui leur ont motivé à choisir les images et énumérer les différents risques liés à chaque image. Cette séquence a été interrompue pour observer la pause déjeuner. Après la pause c'est au tour des participants restants de passer au même exercice.

La soirée était clôturée avec la distribution des couleurs (rouge, jaune et vert) pour l'évaluation des risques liés aux différentes images annexées au tableau.

Le mercredi 7 juillet 2021 à 8h 30 exactement commence le vote pour l'évaluation des risques associés à l'exploitation artisanale de l'or. La couleur rouge précise que le risque est important, jaune moins important et la couleur verte indique quant à elle qu'il n'y a aucun risque.

Lors du vote certains orpailleurs regardent le choix de leurs voisins ou même parfois concertent leurs voisins avant de brandir leurs coupons. Les hommes biaisent le choix des femmes présentes à la formation. Ce vote a permis de faire ensemble la priorisation des risques liés à l'exploitation artisanale de l'or en classant les risques du plus important au risque qui ne présente aucune importance.

Après à la priorisation des risques, le formateur fait sa présentation sur « campagne d'information et sensibilisation à l'endroit des artisans miniers pour la protection de l'Environnement, terres agricoles, la santé humaine/animale sur les sites d'orpaillage de la zone d'intervention du programme Promotion de la Paix au Sahel (IPPS). La présentation tira à sa fin et laissa place à la pause déjeuner.

Le formateur et les stagiaires ont profité de la pause pour mettre en place le dispositif du jeu sérieux. Après la formation Oumar avait reparti les orpailleurs en groupes pour les deux sessions de jeu puis commence son introduction.

Identifications des risques liés aux différentes pratiques sur les images.

Intervenant 1

J'ai pris les numéros 2 et 17

L'image 2 : ici c'est un ancien site abandonné. Il y a des puits non restaurés donc il y a des véritables risques car les animaux peuvent tomber et même les personnes qui n'ont pas connaissance de ces puits-là peuvent tomber. Il y a également un risque d'éboulement des puits

L'image 17 : la raison pour laquelle j'ai choisi cette image j'ai vu des femmes sont en train de piler et tamiser le minerai, donc il y a des risques car la poussière peut atteindre leurs poumons et leurs cœurs et même se propager dans les habitations. Cela peut leur provoquer des maladies pulmonaires.

Intervenant 2

J'ai pris les numéros 7, 15 et 20

L'image 7 : selon moi l'image 7 reflète la « sossoriya » là où on nettoie le minerai broyé pour le séparer de l'or. Et j'ai choisi cette image parce que je fais ce travail sur le site. Les gens sur l'image qui font cette activité sont pitoyables parce qu'ils ne sont pas protégés. Ces gens sont exposés au risque de radiation.

L'eau avec laquelle ils font la batée n'est pas saine car ils utilisent des produits chimiques pour faciliter la récupération de l'or et ces produits-là causent des préjudices sur leur santé.

L'image 15 : sur l'image on aperçoit une place de commerce. Il y a des femmes et des enfants avec leurs marchandises sur leurs têtes qui circulent autour des puits d'orpaillage. Il y a donc un risque de cohabitation entre l'activité d'orpaillage et la population environnante.

L'image 20 : ici aussi c'est un risque lié à la santé car l'orpailleur n'utilise pas des gants de protection. J'ai vu des cas pareils, j'ai vu quelqu'un qui est tombé malade (les mains contaminées par manque d'utilisation des équipements de protection individuels) et un autre qui est mort suite à ce type de maladie avant de se rendre dans un centre de santé (sur le site d'Oubanga). Sur notre site il y a plusieurs activités que les femmes mènent mais c'est le commerce qui nous intéresse le plus. Je suis également une enseignante dans une école sur notre site.

Intervenant 3

J'ai choisi les numéros 3, 17 et 18

L'image 3 : on a sur cette image un site abandonné. Le risque est qu'il y a des puits qui peuvent s'écrouler et les animaux et les gens en passant peuvent tomber. C'est un véritable risque d'effondrement par manque de réhabilitation. Cet espace ne servira plus à rien, on ne peut plus y pratiquer d'autres activités. Le paysage environnemental est détruit.

L'image 17 : ici les femmes travaillent les graviers et la poussière qui se dégage peut engendrer à ces femmes là des maladies pulmonaires.

L'image 18 : le risque qui est associé à cette image est l'effondrement lié au creusement des galeries et extraction dans le lit d'égouts. Ce risque peut occasionner la mort de plusieurs personnes. L'eau peut être aussi contaminée.

Intervenant 4

J'ai choisi le numéro 7

J'ai choisi cette image parce qu'il y a des enfants sur l'endroit où on fait la batée. L'eau est totalement sale et les enfants peuvent être tombés malades, il y a un risque de contamination des enfants.

Intervenant 5

J'ai choisi le numéro 4

J'ai l'impression qu'il y a des risques liés à cette activité. C'est d'abord un risque sur le plan sanitaire, l'orpailleur risque de nuire à santé et il risque de blesser les autres s'il jette des pierres pendant le

concassage. Ils sont donc exposés au risque d'accident de travail et aux techniques rudimentaires du concassage et du broyage.

Intervenant 6

J'ai choisi les numéros 5 et 22

L'image 5 : on constate qu'ici la personne fait un travail qui demande beaucoup d'énergie (concassage) et elle est exposée à l'inhalation de la poussière du fait qu'elle ne porte pas des EPI.

L'image 22 : lors du concassage et du broyage la poussière se propage dans l'air ambiant et peut provoquer des maladies respiratoires aux orpailleurs, parce qu'ils ne sont pas protégés et à la population riveraine.

Intervenant 7

J'ai pris les numéros 14 et 28

L'image 14 : ici il y a des femmes sur le d'orpaillage et cela fait vraiment pitié parce que le rôle des femmes c'est de rester à la maison pour exécuter les tâches ménagères et voilà qu'elles se trouvent sur les sites d'orpaillage. C'est vraiment pitoyable selon moi. En plus il n'y a aucune disposition prise pour qu'elles puissent protéger leurs mains, leurs pieds et se protéger également contre la poussière. Ce n'est pas normal que la femme se donne à l'activité d'orpaillage comme les hommes pour celles qui exercent des activités commerciales c'est admissible. Il y a un risque parce que certaines parmi ces femmes il y a celles qui fouillent sur les sites d'orpaillage pour chercher de l'or. J'ai vu des exemples pareils lorsque j'étais au Mali l'année passée, on nous a même rapportés qu'il y avait une femme qui est morte suite à une maladie contractée sur un site d'orpaillage dans ce pays. Elles sont également dans l'eau où se pratique la batée et cela leur provoque des malaises sur leur corps.

L'image 28 : ici ils exercent le travail de cyanure. Pourtant ce qu'on voit ils n'ont pas des gants et ni des bottes ni des bavettes alors qu'on nous a toujours dit de sensibiliser les orpailleurs et nous les avons fait comprendre. Certains appliquent ces conseils d'autres non, ceux-là qui sont sur l'image sont parmi la dernière catégorie. En plus si les animaux s'abreuvent autour des points d'eau cyanurés ils meurent et tous les débris jetés par terre seront emportés par la pluie dans la brousse et appauvrissent le couvert végétal. On nous informe que même les poissons sont contaminés par le mercure et si les gens en consomment cela leur provoque des maladies, des maladies qui commencent à se développer petit à petit avant de s'aggraver.

Intervenant 8

J'ai pris les numéros 27 et 16

L'image 27 : les gens sur cette image prennent de l'eau qu'on extrait des puits d'orpillage pour leur besoin et ce n'est pas une eau propre, elle engendre des maladies pour les consommateurs. Si ces gens-là qui boivent cette eau rentrent dans les puits pour voir là où elle est puisée ils changeront d'avis. Il y a donc un risque sanitaire lié à la consommation des eaux d'exhaure.

L'image 16 : raison pour laquelle j'ai choisi cette image parce que les orpailleurs peuvent se blesser pendant le concassage des pierres, ils sont exposés au risque d'accident. Mais chez nous cette pratique n'est plus utilisée, il y a eu des changements.

L'image 16 : L'eau contaminée par les produits chimiques peut tuer les animaux qui en boivent. Moi j'ai vu un cas pareil à 8 km de Oubanga, les animaux des éleveurs étaient morts après avoir consommé l'eau contaminée et cela a créé des conflits entre éleveurs et orpailleurs. Après les orpailleurs ont été amandés d'une somme dépassant un million.

Intervenant 9

J'ai choisi le numéro 20

Moi j'ai vu des cas parce qu'en 2017 j'étais malade et le docteur qui me suivait avait des gens qui étaient à sa charge et qui souffraient de cette maladie. Il y a tellement des gens de plusieurs sites qui souffraient de cette maladie.

Intervenant 10

L'image 21 : le risque lié à cette image est l'utilisation de l'engin qui peut blesser les gens, c'est le risque de la cohabitation entre engin et population.

Note d'information : Ce n'est pas toute la partie de l'identification des risques qui a été enregistrée. C'est pourquoi vous allez remarquer qu'il n'y a que 10 intervenants.

Introduction Omar :

Donc l'objectif ce que c'est un jeu qu'on a voulu développer parce quand les autres font des choses au début il y avait depuis les années 1990 on a mis de l'argent et les gens font des ateliers et des séminaires dans les hôtels souvent ils ne viennent même sur les sites. Donc on a dit non, il faut penser à quelque chose qui va permettre aux gens de parler entre eux sur chaque site et de pouvoir se comprendre entre eux, comprendre les enjeux que nous venons de voir hier là et travailler ça entre eux pour réduire les impacts. Il y a de l'argent qu'on donne souvent pour dire qu'il faut aider à encadrer les orpailleurs mais ça ne vient directement vers les orpailleurs. Donc ce jeu-là c'est un test on l'a fait deux fois, trois fois à Niamey et maintenant on va le faire avec vous. A la fin il faut que vous disiez est-ce ça peut aider à ce que les gens

comprennent les enjeux d'un territoire, des enjeux de l'exploitation artisanale et comment est-ce qu'ils peuvent eux-mêmes travailler ensemble et arranger. Et après qu'on va finir décidivement il y aura un truc qui va être développé, pour chaque site il y aura des gens qui se seront formés et qui vont travailler souvent entre eux avec les autres orpailleurs pour discuter de tout cela. Parce que la meilleure façon ce que vous travaillez avec les orpailleurs parce que c'est vous qui les connaissez et c'est vous qui connaissez comment transmettre le message et comment travailler avec eux.

Si vous des questions vous pouvez me les posez. Je vais vous expliquer. Ce qu'ici, la table là que vous vous voyez, nous avons imaginez un territoire. Sur ce territoire (ça peut être Koma Bangou) là il y a 2.000 habitants et il y a 1.200 enfants et il y a 600 personnes qui ne vivent que l'orpaillage. Donc là-bas c'est un contoïr, là où quand les gens ont de l'or ils vont aller vendre de l'or, prendre de l'argent et peuvent s'acheter ce qu'ils veulent. Vous allez voir après la personne si elle trouve beaucoup de l'or elle va acheter une maison, quelqu'un va acheter une moto, ou il va acheter un téléphone et c'est le chef du village par exemple ou une personne respectée qui s'occupe de ce poste-là. Donc lui quand la personne trouve de l'or ici (site de l'orpaillage) il va au contoïr pour acheter ce qu'elle a besoin et quand elle trouve de l'or, elle a des minerais. Les minerais là elle va les amener là-bas pour qu'on lui donne de l'or et l'or il va en même temps vendre voilà l'argent, donc on lui donne de l'argent. Vous avez compris. Si on lui donne de l'argent elle fait ce qu'elle veut avec son argent soit elle achète une autre méthode parce que il y a différentes par la personne peut travailler dans l'eau, elle peut aller dans l'eau pour faire de la batée ou la personne va acheter un puits ou un terrain. Les terrains c'est ça qui sont ici, là c'est la rivière Sirba qui est à côté de vous, là c'est il y a déjà encore deux personnes qui ont un peu d'argent. Il y a cinq personnes qui vont travailler, on va mettre des groupes de deux personnes. Mais parmi les cinq il y a une personne qui a un peu d'argent.

Là c'est le gisement quelqu'un peut prendre ici il va trouver l'or et un autre peut prendre à côté il ne va pas trouver de l'or ou ne va pas trouver grand-chose, il va trouver peut-être une petite quantité. Donc si la personne prend on regarde ce qu'elle a eu, il va prendre du minerai après il peut s'acheter des choses et exploiter ou bien il va garder son minerai. Donc il y a des gens qui vont jouer et qui ne vont rien gagner, ils vont devenir pauvres. Après cinq il y aura des choses qui vont changer, la rivière va devenir comme ce qu'on a vu sur la photo là, elle va commencer à devenir rouge si on fait beaucoup de la batée. Ça ce sont l'eau du forage, les écoles, les maisons ; parce il y a des maisons et des écoles à côté des lieux de travail.

On va commencer à jouer et vous allez poser des questions. Au début il y a quelqu'un qui a 40.000 donc c'est un gars du village il a déjà commencé la batée sur la rivière, le deuxième il a fait de l'agriculture, il a un peu d'argent mais il n'est pas très riche et veut laisser l'agriculture pour chercher de l'or. Le troisième c'est un jeune du village qui a sa famille et qui veut tenter sa chance et ce sont ses parents qui ont peu collecté de l'argent pour lui. Il y a un autre lui il connaît l'orpaillage, il a été au Soudan, il a été au Mali il veut revenir au village pour essayer de s'implanter pour faire l'orpaillage.

Il y a cinq places autour de la table qui seront occupées par des groupes de deux personnes. La première équipe va jouer et la deuxième équipe va observer pour jouer après.

Le joueur jaune a un peu d'argent, c'est un homme du village et il a déjà placé la batée.

Le joueur noir aussi a un peu d'argent parce que lui il a investi beaucoup d'argents et il a même deux batées au niveau de la rivière.

Les autres joueurs n'ont pas beaucoup d'argents.

Le premier consiste aux joueurs à choisir là où ils veulent aller exercer leurs travaux.

Bilan du jeu

Lorsque nous avons commencé à travailler la rivière était claire trois ans après nous avons compris que l'eau change de couleur. L'eau de la rivière et des forages est contaminée. Avant notre arrivée l'environnement était propre et neuf ans après notre installation ça a commencé à changer. Au niveau de l'école les enfants ont commencé à tomber malades, donc c'est important que nous réfléchissions à dépenser tout ce que nous gagnons pour assurer le traitement de nos familles ou bien prendre des dispositions qui peuvent nous épargner de cette contamination par exemple chercher de l'eau potable ailleurs pour nos besoins mais c'est très cher.

Equipe jaune :

Premier intervenant (I.1): quand nous avons commencé l'exploitation de l'or nous avons une seule « sossoriya » et de l'argent. Nous avons trouvé de l'or que nous avons vendu pour acheter une autre sossoriya. Quand nous avons à nouveau trouvé de l'or nous avons acheté un jardin et nous avons encore de l'argent en notre possession (20 aco). Nous avons également payé la taxe. Nous pouvons dire à la fin que nos efforts ont apporté leurs fruits car nous avons fini avec deux sossoriya, un jardin et de l'argent.

Deuxième intervenant (I.2): l'orpaillage n'a pas été comme nous le souhaitions car nous ne sommes pas venus avec l'idée d'avoir juste jardin. Nous n'avons même pas pu acheter un véhicule, on doit changer des stratégies pour avoir plus la prochaine fois.

I.1 : Nous avons décidé d'acheter un jardin car c'est une activité très importante qui quand on l'exerce bien elle est très rentable. Nous n'allons pas arrêter l'orpaillage pour nous dépendre de l'agriculture.

I.2 : Nous avons acheté un jardin parce que l'orpaillage ne donne pas comme on l'espérait les cultures irriguées sont comme une alternative pour nous. Aujourd'hui on ne peut même pas compter le nombre de ministres, députés, juges, commerçants... qui ont des jardins. C'est pourquoi nous avons pensé à nous en procurer d'un jardin parce que même actuellement c'est du moringa nous mangeons pendant cet atelier.

I.1 : c'est qui nous a fait peur dans notre activité d'orpaillage c'est le fait que nous n'en sortions pas comme nous le voulons.

I.2 : celui qui est venu chercher un véhicule et qui se retrouve avec un jardin, ça fait vraiment peur (rire dans la salle). En plus l'eau que nous consommons à changer de couleur, nous vivons avec les maladies liées à cette activité, on n'est juste pas mort mais la peur est là. Ce qui est étonnant c'est la rapidité avec laquelle l'eau devient turbide donc si nous continuons notre activité la situation deviendra encore pire.

Ce que nous n'avons pas compris dans le jeu, on coutume de dire « zari fo djawandi yan assi nan alberi kan lakalo go nango fo ma faham » autrement dit « l'enseignement d'une seule journée ne peut pas permettre à un chef de famille qui a l'esprit ailleurs (la charge familiale) de tout assimiler ». Nous avons un peu compris mais nous proposons que la formation soit continue pour que nous puissions nous en approprier de ces connaissances.

I.1 : ce que je n'avais pas compris dans le jeu pourquoi on prélève les taxes dans ce que nous gagnons dans l'orpaillage ? (réponse : la taxe dans le jeu c'est une somme pour payer les ouvriers qui travaillent pour vous, même si on ne gagne rien on sera obligé de les payer. Mais cela dépend de la nature du contrat : si les ouvriers ont signé un contrat ils seront payés à la durée prescrite dans les règles du contrat et ne gagnent rien des recettes d'orpaillage. Or, s'ils ont accepté de travailler pour les responsables des puits jusqu'à ce qu'on trouve l'or ces responsables partagent avec eux).

Le jeu sérieux reflète exactement la réalité des sites d'orpaillage mais à quelques différences près car les sites nous connaissons toujours le prix de l'or alors que dans le jeu il faut à chaque vente choisir pour voir la fluctuation du prix de l'or. Si le prix de l'or monte les négociants ne le dévoilent pas mais prêts à parler quand le prix chute et cela dépend des négociants aussi.

Equipe verte :

I.1 : Le jeu est une sorte de guide car cela nous a permis d'avoir des connaissances sur l'activité d'orpaillage artisanal car il y a des champs, des habitations, des écoles, l'eau à côté des sites d'orpaillage qui ont commencé à changer de couleur. Cela a attiré notre attention.

Comme nous sommes à côté de l'eau et qu'il est facile de trouver de l'or nous avons choisi d'acheter la batée. Le jeu nous avons beaucoup étonné car ça nous a donné beaucoup d'idées sur le travail.

I.2 : le jeu nous a fait comprendre qu'il y a des avantages et des inconvénients sur la pratique d'orpaillage. Au début on pensait qu'est en train de gagner mais finalement on a vu ce qu'on est en train de faire à l'environnement, l'eau est devenue rouge, les classes et ainsi de suite.

Ce que je n'ai pas compris dans le jeu ce qu'on nous des minerais et après on les échange contre l'or. Alors que dans la vraie vie on broie le minerai, faire la silice et quand on arrive à gagner l'or on le vend au acheteur. Je pense qu'on doit passer par ces étapes. Sinon le jeu décrit ce qui se passe sur le terrain, c'est proche de la réalité en dehors de ces remarques.

A la fin du jeu nous avons comme ressources une batée, un champ et 65 aco

Equipe noire :

I.1 : nous avons 20 aco qui nous restent à la fin du jeu et comme immobilisation nous avons un puits, une machine et deux batées. On a constaté un peut que le jeu ça reflète un peu la réalité du terrain. Ça a été très difficile pour nous de faire des choix parce que nous sommes dans l'optique de comment gagner plus d'argent et dépenser moins. Cela nous a amené à développer des stratégies d'investissement, pour avoir de l'argent il faut investir raison pour laquelle nous avons investi dans le puits et même si le puits ne marche pas nous avons une machine donc on peut avoir des entrées de fonds. Maintenant même si nous quittons le terrain d'orpillage nous pouvons aussi céder nos immobilisations ; ça peut nous apporter des fonds. Notre fond ne nous permet pas d'acheter un jardin sinon nous allions investir, nous allions faire des diversifications même si une partie ne marche pas nous pouvons passer de l'autre côté. Avec les investissements nous pensons que nous pouvons avoir de l'argent et partir sur d'autres terrains pour les exploiter et avoir de la richesse. Nous croyons à ce que nous faisons et quand on croit à ce qu'on fait on a déjà réussi.

Nous avons passé notre temps à penser à l'argent sans tenir compte de la nouvelle génération par exemple la pollution de l'eau et la poussière aussi qui se dégagent donc ça dégradent la santé de la population.

Dans le jeu ce que nous n'avons pas compris c'est le processus de transformation de minerai, il semble qu'on a brûlé des étapes c'est différent par rapport à la réalité. Ce processus doit nous apporter des fonds si ne transforme pas le minerai qu'allons-nous faire avec notre machine ? Sinon ce jeu reflète la réalité

Equipe rouge :

Nous avons 5 aco, un jardin et une batée. Pour nous ça n'a pas marché. Nous avons commencé avec la batée, nous avons vu que ça n'a pas marché donc on a acheté un jardin. On voulait acheter une maison mais on n'a pas d'argent. Nous avons constaté que ça ne marche pas avec la batée on a acheté donc un jardin comme on une rivière à côté pour voir si ça va marcher. Au fur et à mesure qu'on exploite l'or, on a un problème d'eau, on a la poussière, on a des enfants également qui tombent malades et on n'a rien pour les soigner.

Equipe orange :

I.1 : Nous avons à l'issue du jeu 25 aco, un champ et une machine. Comme nous sommes venus chercher de l'or au début nous avons acheté une machine de broyage. Lorsque nous avons remarqué que nous n'avons pas eu grand-chose, nous avons acheté un champ pour que même si l'orpaillage ne marche nous pouvons faire notre jardinage. Mais à notre grande surprise l'eau de la rivière est contaminée donc à la fin notre séjour sur le site n'a pas abouti à grand-chose. De l'autre côté nous avons acheté des matériels pour chercher de l'or et cela n'a pas marché comme nous n'avons pas un puits avec la machine de broyage nous arrivons à avoir de quoi payer les condiments parce que les gens nous payent pour broyer leurs minerais. C'est avec cette machine que nous avons pu les ouvriers et acheter le champ et suite à la contamination de l'eau la culture irriguée ne sera pas productive.

I.2 : notre stratégie était d'acheter une machine de broyage car quand la personne dispose de cette machine elle peut se débrouiller. L'orpaillage est devenu tellement difficile de nos jours à tel point que si la personne n'a pas des moyens et son propre puits pour débiter il ne peut rien avoir comme gain. Quand la personne a ses moyens, elle peut travailler et les autres aussi peuvent venir travailler chez elle donc dans cette démarche on peut espérer du progrès.

C'est la réalité du terrain que nous venons de revivre à travers ce jeu.

Le chef village :

Je ne sais pas avec quelle quantité de l'or, de l'argent, des matériels j'ai commencé le jeu. Donc c'est difficile pour moi de savoir si le jeu m'était rentable ou pas. Le jeu est proche de la réalité pour moi.

Je suis très content de la formation car grâce à cela j'ai compris que quand on trouve de l'argent sur le site on doit acheter des matériels et la nourriture pour la famille. Ce n'est pas comme auparavant où on achetait automatiquement une voiture avec l'argent qu'on a gagné dans l'orpaillage sans investir et aider la famille et après même les frais de carburant il faut qu'on quémande. Le jeu nous a donc beaucoup éduqués et ça va nous permettre d'éviter certains impacts dégradants pour l'environnement et pour notre santé.

Avec les connaissances que j'ai acquises à travers ce jeu je peux former et sensibiliser les gens de mon site sur les enjeux sanitaires et environnementaux liés à l'activité d'orpaillage.

J'ai compris à travers ce jeu qu'il n'est pas du tout utile d'acheter des objets de luxe quand l'argent qu'on gagne dans l'orpaillage mais plutôt chercher des matériels de travail en plus le champ peut aussi aider dans la résilience des ménages. Après si ça commence à marcher bien on peut penser aux voitures, motos et autres.

Deuxième partie du jeu

Première partie de l'enregistrement non transcrite : introduction de Oumar similaire à celle de la première manche du jeu.

Bilan du jeu

L'équipe jaune

Nous avons comme ressources un jardin et deux batées. Nous avons également acheté de la nourriture pour la famille à deux reprises et nous avons payé les ouvriers.

Le jeu nous a beaucoup plu, c'était difficile pour nous au début parce que nous avons commencé avec peu d'argent.

Notre stratégie était d'acheter une batée avec notre maigre fond. Nous l'avons utilisée (la batée) pour avoir de l'or et les autres viennent aussi et ça nous procure de l'argent. Nous avons acheté un jardin parce que l'orpaillage ne marche pas bien donc si ça continue dans cette lancée nous allons retourner au travail de jardinage. Mais nous n'allons pas complètement laisser l'orpaillage. Ce qui nous a étonnés dans le jeu est le fait de commencer avec presque rien mais à la fin nous nous sommes retrouvés avec des ressources. C'est le miracle de l'or, on peut commencer l'activité avec rien et devenir riche. Nous avons tout compris dans le jeu, il reflète la réalité du terrain d'orpaillage. L'essentiel c'est la formation continue à être exposée pour que nous arrivions à saisir à bien le contenu du jeu, que ça ne s'arrête pas aujourd'hui.

L'équipe verte

I1 : Nous avons 45 aco et deux machines de broyage. Nous avons payé les ouvriers et de la nourriture pour la famille. Nous n'avons pas eu de difficulté dans le jeu car nous avons commencé avec beaucoup d'argent. La raison pour laquelle nous avons acheté des machines c'est pour avoir beaucoup d'argent.

I2 : nous avons décidé d'acheter des machines de broyage parce qu'elles nous rapportent de l'argent, même si nous n'avons pas l'argent des condiments ou quelque chose dans nos ménages avec l'argent que nous gagnons avec ces machines là nous pourrions satisfaire nos besoins quotidiens. Nous avons l'intention d'exercer d'autres activités comme le jardinage mais nous avons vu que nous avons beaucoup de travail donc c'est difficile de diversifier les activités. Il faut qu'on gagne beaucoup d'argent dans l'orpaillage d'abord pour faire d'autres activités. Ce qui est étonnant dans le jeu pour nous c'est que pendant que les autres joueurs ne gagnent pas grand-chose, nous notre activité ne fait que s'agrandir. Nous n'avons pas connu de faillite. Nous avons compris le jeu et nous voulons qu'il soit continu, ça reflète aussi la réalité du terrain.

L'équipe noire

Nous avons 40 aco, un jardin, machine, un puits et deux téléphones portables. Nous nous acquittés de nos devoirs comme acheter la nourriture pour la famille et payer les ouvriers qui travaillent pour nous. Le travail n'a pas été dur pour nous car nous avons investi pour acheter des matériels de travail et après nous avons eu de l'or. On a acheté une machine, un puits et un jardin qui vont nous rapporter de la fortune. Donc

notre investissement était rentable. L'utilité du jardin est que si l'orpaillage ne marche pas nous pouvons faire notre jardinage qui nous rapportera aussi d'argent. Rien ne nous a étonné, on a compris le jeu c'est proche de la réalité du terrain.

L'équipe rouge :

I1 : nous avons 35 aco, une machine, un jardin et deux téléphones. Nos ouvriers ont été payés et nous avons aussi acheté de la nourriture pour nos familles. Nous sommes parties de rien, nous avons travaillé et maintenant nous avons des ressources et de l'argent.

I2 : nous avons remarqué que l'orpaillage apporte des fruits donc nous avons acheté une machine de broyage et des téléphones portables pour que notre activité d'orpaillage aille de l'avant. L'orpaillage n'est pas toujours une activité certaine c'est pourquoi nous avons payé un jardin comme alternative à l'orpaillage. Ce qui nous a étonné c'est que nous avons commencé l'exploitation de l'or étant pauvres maintenant nous sommes devenus riches et disposons également des ressources. Nous avons remarqué à notre grand regret que l'eau a aussi changé de couleur car nous travaillons dedans matin, midi et soir. Nous avons compris comment le jeu se déroule, il reflète également la réalité du terrain.

L'équipe orange :

I1 : nous avons 50 aco. Comme matériels, nous avons un puits et un détecteur. Nous avons acheté de la nourriture et nous avons payé les ouvriers. Au début nous avons rencontré une difficulté. La difficulté à laquelle nous sommes confrontés c'est que notre puits ne répondait pas favorablement. Notre stratégie pour ressortir de cette situation était d'utiliser notre appareil détecteur pour avoir de l'argent d'un côté et de l'autre côté nous avons continué à exploiter l'or et nous arrivons à en avoir petit à petit. Finalement les ouvriers nous ont abandonnés parce que le puits ne donne pas comme ils le désirent. On était deux à rester et on est vieux pour faire un travail qui demande beaucoup d'énergie donc nous avons décidé de louer un détecteur qui nous rapportera de l'argent. On n'avait pas les moyens pour faire le jardinage mais à présent nous comptons acheter avoir un champ pour diversifier les activités. Rien ne nous a étonnés, nous avons compris le jeu car nous avons adopté des stratégies pour avoir des matériels et un peu d'argent.

Le chef du village :

Il y a eu beaucoup d'achats par rapport à la première manche du jeu. Maintenant ça a marché très bien.

Propositions faites par les orpailleurs participants à l'atelier sur la protection de la santé de la population minière et de l'environnement.

I1 : Selon moi pour pouvoir protéger l'environnement on doit sensibiliser les orpailleurs sur l'utilisation des produits chimiques comme le cyanure et le mercure. Ils doivent savoir comment s'y faire face pour éviter les contaminations des eaux et de l'environnement. Il faut qu'ils sachent qu'on doit éviter d'utiliser ces produits chimiques autour des points d'eau et ne pas laisser les débris de ces substances s'évaporer dans l'atmosphère.

I2 : pour moi les puits de 1,5 m qu'on pense improductifs doivent être remblayés et se servir de ces trous pour planter des arbres. Ça contribue à la récupération du couvert végétal.

I3 : selon moi ce sont les représentants des orpailleurs des différents sites qu'on doit sensibiliser sur les enjeux environnementaux et sanitaires et à leur tour ils vont informer et discuter avec des orpailleurs de leurs sites respectifs, comme ce qu'on vient de faire. Les anciens puits-là qui ne sont pas trop profonds on les utilise pour planter des arbres. Solliciter un financement pour avoir de l'eau propre pour entretenir ces arbres. Les responsables des sites doivent discuter avec les orpailleurs pour mettre cela en œuvre.

I4 : zarma kine ra day hassay gono : ine hala bora ga wani ga hassaraw koul ma wani ga hansey (en langue zarma il y a un proverbe qui dit : qui sait détruire doit savoir réparer). Selon moi on doit faire des sensibilisations auprès des orpailleurs pour qu'ils se rendent compte des enjeux sanitaires et environnementaux liés à l'activité d'orpaillage artisanal.

I5 : selon moi les gens sont en train de développer des confusions concernant la restauration des puits. C'est quand par exemple on assiste à une ruée vers l'or et qu'après les gens se rendent compte qu'il n'y a pas d'or c'est en ce moment-là qu'on peut restaurer les trous de 1m ou 2m si les gens s'unissent et qu'ils trouvent un appui. Mais les puits profonds on ne peut pas les restaurer. Si on trouve des appuis on peut faire des délégations un peu partout si c'est dans les champs ou dans la brousse au niveau des différents sites pour restaurer les puits abandonnés. Si on les restaure on pourra se servir de ces espaces pour les activités agricoles.

I6 : ce n'est pas seulement la restauration des sites qu'on doit faire il y a également la récupération des terres. Si cela est fait il y aura une augmentation des zones de production agricole ainsi que pour le pâturage ça évitera des conflits entre éleveurs et orpailleurs. Pour la santé aussi il faut qu'on s'unisse en un seul bloc pour lutter contre l'utilisation de cyanure au niveau des habitations. Parce qu'il y a un texte qui exige qu'on mette une distance d'au moins 7 km des habitations pour utiliser le cyanure et le grillage doit être fait avec une seule porte. On doit revenir à la base car il y a un danger qui nous guette.

I7 : les partenaires et nous les orpailleurs devons partir sur les différents sites pour répéter la même formation qu'on vient de faire pour les éveiller sur l'utilisation des substances chimiques. En collaboration

aussi avec les responsables des sites on peut leur faire comprendre davantage sur les risques liés à l'utilisation des produits chimiques dans l'activité d'orpaillage pour qu'ils puissent prendre des dispositions pour protéger leur santé et l'environnement. Mais les représentants des orpailleurs ne sont pas toujours écoutés et n'ont pas le pouvoir de rassembler à tout moment les orpailleurs pour leur transmettre ces connaissances.

I8 : selon moi les arbres même si nous plantons des arbres on ne pourra pas les entretenir parce qu'on a un problème d'eau. Nous avons une fois acheté et planté des arbres et aucun n'a grandi par manque d'eau propre pour les entretenir. On a un problème d'eau et on ne peut pas acheter des bidons d'eau de 25L à 250 FCFA pour entretenir les arbres.

I9 : on a dit de ne pas faire le grillage pour le travail de cyanure près des champs et les grillages ne doivent pas s'approcher des habitations. On doit s'éloigner des habitations pour ne pas propager les rejets de cyanure au sein de la population.

I10 : les orpailleurs donnent quelque chose aux chefs des villages qui les autorisent à exploiter et utiliser le cyanure sans tenir compte des conséquences négatives que cela peut engendrer sur l'environnement et sur la santé de la population. Normalement ceux qui octroient l'espace pour l'exploitation artisanale de l'or doivent savoir quel endroit octroyer et qui ne provoquera pas d'inconvénients sur l'environnement et sur la santé de la population. Mais dans la pratique les orpailleurs donnent de l'argent aux chefs des villages et ils bénéficient d'espace pour l'exploitation parfois même au sein des villages et ils utilisent le cyanure près des champs et des habitations. Les chefs des villages et les agents des Eaux et Forêts sont les seuls à avoir le pouvoir d'interdire l'utilisation du cyanure au sein des habitations et à proximité des champs et des cours d'eaux. Si les partenaires partent avec nous sur les sites pour sensibiliser les orpailleurs ils diront que nous, les représentants, vous avons appelés pour venir leur interdire l'utilisation du cyanure. Déjà ils véhiculent les rumeurs selon lesquelles nous œuvrons avec les partenaires pour empêcher leurs travaux de cyanuration. Donc nous les représentants devons trouver un consensus avec les orpailleurs parce que si nous leur faisons des propositions et qu'ils rejettent nous devons les négocier avant qu'ils comprennent ce que nous voulons leur transmettre.

I11 : si nous retournons sur les sites nous pouvons rassembler des personnes pour voir les puits abandonnés que nous pouvons restaurer. On peut faire de notre mieux pour remblayer même si c'est 12, 15 ou 20 trous dans la brousse ou bien au sein des villages. Si nous faisons cela on peut savoir si ce trou on peut le remblayer avec les mains, cet autre trou on peut le restaurer avec les engins ou bien un groupe de personnes et on fait un rapport pour soumettre aux partenaires. Si nous faisons cela on n'a pas besoin de concerter les agriculteurs et les chefs des villages pour réhabiliter les anciens puits.

Onze (11) orpailleurs uniquement se sont prononcés pour faire des propositions sur la protection de l'environnement physique et humain.

Le président des cadres locaux de concertation : (chef du village dans le jeu).

Je vais vous exposer une méthode que nous avons appliquée à Koma Bangou. C'était un vendredi nous avons rassemblé tous les habitants du village, nous avons fait une liste de présence et tout celui qui vient s'inscrit sur la liste. Au total 119 personnes ont répondu présents. Nous avons parlé des choses que nous devons entreprendre sur notre site avant de nous asseoir. Nous avons ensuite réfléchi à fermer les anciens puits partout où ils se trouvent. Nous avons passé le micro l'ensemble des participants à la réunion et ils se sont exprimés sur ce que nous devons faire pour le bon fonctionnement de notre site. Au cours de cette réunion nous avons décidé d'interdire aux personnes qui vendent leurs marchandises au niveau des trous et même les passages seront respectés sur le site. A l'issue de la rencontre nous avons fait un rapport et des vidéos que j'ai transmis au juge du tribunal par WhatsApp comme j'ai son numéro de téléphone. Quand il a vu le rapport il m'a dit qu'il va transmettre une copie au commissariat, une copie chez nous et une autre copie à notre représentant et que nous pouvons commencer à mettre en action nos différentes propositions. Donc à travers cela les orpailleurs peuvent faire leurs travaux de réhabilitation des sites abandonnés. C'est une méthode que nous avons expérimentée chez et nous exhortons les autres à l'appliquer chez eux.