

UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU

École Doctorale
Sciences et Technologies

Laboratoire : Centre de Recherche
en Sciences Biologiques
Alimentaires et Nutritionnelles
(CRSBAN)



N° d'ordre...336....

Thèse Présentée

Par Aminata KABORE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Ouagadougou

Option : Sciences Appliquées

Spécialité : Microbiologie-Biochimie-Biotechnologie

**Optimisation des qualités épuratoires des graines de
Moringa oleifera dans le traitement domestique des eaux
de consommation en Afrique sub-saharienne : cas des
eaux du Burkina Faso**

Soutenue le 30/07/2015 devant le Jury composé de :

Président : Alfred S. TRAORE : Professeur Titulaire, Université de Ouagadougou

Membres : Aboubakar S. OUATTARA : Professeur Titulaire, Université de Ouagadougou

Dayéri DIANOU : Directeur de Recherche, CNRST/IRSS, Ouagadougou

Francis ROSILLON : Maître de Conférences, Université de Liège, Belgique

DEDICACES

A ma famille,

A mes amis,

A tous ceux qui ont contribué à ma formation.

REMERCIEMENTS

Le présent travail réalisé au Burkina Faso, au Centre de Recherche en Sciences Biologiques Alimentaires et Nutritionnelles (CRSBAN) de l'Université de Ouagadougou en collaboration avec le Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (CNRST/IRSS) et l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) a été rendue possible grâce à l'appui financier du CIOSPB à travers la Bourse Nationale Burkinabé de 3^{ème} cycle, du Programme ISP/IPICS (International Sciences Program/International Program in the Chemical Sciences, Suède), de l'UEMOA (Union Économique et Monétaire de l'Afrique de l'Ouest) et de la FIS (Fondation Internationale pour la Science, Suède). Que ces donateurs soient assurés de mes sincères remerciements.

Je témoigne ma grande reconnaissance aux rapporteurs et membres du jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger ce travail ; principalement aux Pr Alfred S. TRAORE, Dr Dayéri DIANOU, Pr Francis ROSILLON, Dr Aly SAVADOGO, Dr Hagrétou SAWADOGO/LINGANI et Pr Aboubakar S. OUATTARA.

Mes profonds remerciements vont :

Au Professeur Alfred S. TRAORE, Directeur du Centre de Recherche en Sciences Biologiques Alimentaires et Nutritionnelles (CRSBAN) et Directeur de cette thèse, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mes travaux de recherche dans les meilleures conditions et pour m'avoir initiée dans le monde de la recherche. Puisse-t-il trouver dans ce document, la concrétisation de ses multiples conseils et encouragements pour lesquels je lui exprime toute ma reconnaissance.

Au Docteur Dayéri DIANOU, Directeur de Recherches au Centre National de Recherches Scientifiques et Technologiques de Ouagadougou, Co-directeur de mon mémoire de thèse et membre du jury, qui a fait preuve d'une grande disponibilité durant ma formation et n'a ménagé aucun effort pour mon encadrement, pour ses conseils, son attention très particulière, la direction et le suivi quotidien et rigoureux de ce travail; qu'il trouve ici le témoignage de mon respectueux attachement.

Au Professeur Francis ROSILLON, Maître de Conférences, responsable du laboratoire de Microbiologie de l'Unité Eau et Environnement du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège Campus d'Arlon pour sa contribution à la réalisation de ce travail et pour avoir accepté de l'examiner et de participer au jury.

Au Professeur Aboubakar S. OUATTARA, Professeur Titulaire de l'Université de Ouagadougou et membre du jury pour nous avoir inculqué l'esprit et la rigueur scientifique tout au long de notre formation, pour ses multiples conseils techniques et soutien, et pour l'honneur qu'il nous fait en participant à l'évaluation de ce travail.

Aux enseignants et aux personnels techniques du CRSBAN qui ont chacun à un moment donné ou à un autre contribué efficacement à ma formation. Je pense en particulier aux Docteurs Cheik A. T. OUATTARA, Philippe NIKIEMA, Marcel D. BENGALY.

A l'Institut de Recherche en Sciences de la Santé/CNRST et le Département Biomédical et Santé Publique, pour m'avoir offert le cadre et les moyens pour les analyses microbiologiques ; principalement à Mr Boubacar SAVADOGO, Ingénieur de recherche pour ses conseils, sa disponibilité et son aide tout au long de mes travaux. Je remercie également tout le personnel de ce département pour leur soutien.

A L'ONEA, principalement au Directeur du Laboratoire Central de Paspanga, Mr Francis KERE pour m'avoir acceptée dans son laboratoire et tout mis à ma disposition afin que je puisse réaliser mes travaux de recherche dans de bonnes conditions ; au chef de la station et également à tout le personnel de la station de traitement et du laboratoire pour leur disponibilité.

Je remercie mes aînés Docteurs pour leur encouragement : Cheikna ZONGO, Marius K. SOMDA, Léon NITIEMA, Joseph SAWADOGO, Jacques SAWADOGO, ainsi qu'à tous les doctorants du CRSBAN pour leur soutien.

A tous mes amis et tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre m'ont permis de réaliser cette étude.

RESUME

L'accès à l'eau potable demeure une très grande préoccupation en Afrique subsaharienne, particulièrement en milieu rural où les populations sont confrontées à la gestion optimale des points d'eau, à l'insuffisance d'hygiène et d'assainissement et au manque de méthodes appropriées de désinfection à l'échelle familiale. De ce fait, l'intégration de procédés biologiques de traitement des eaux de consommation pourrait être une alternative durable dans l'amélioration de la qualité des eaux de boisson, du fait de la disponibilité et de la non-toxicité des substances utilisées. Dans ce contexte et pour ce faire, la présente contribution a pour objectif d'évaluer et d'optimiser l'effet purificateur des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux brutes de consommation, notamment de définir les conditions optimales de traitement et de conservation à l'échelle familiale.

Un total de 240 échantillons d'eau de surface (Gana, Loumbila, Ouaga 3 et Ziga) et de puits (Boaré) alimentant les populations en milieu rural et périurbain au Burkina Faso a été traité avec des coagulants de graines et tourteaux de *Moringa oleifera*. Le suivi de paramètres physicochimiques (turbidité, pH, nitrates, nitrites, calcium, magnésium, dureté totale, matières organiques et sulfates) et microbiologiques (*Escherichia coli*, coliformes fécaux, entérocoques, protozoaires) d'intérêt sanitaire, en fonction des concentrations de coagulants et à différents temps de décantation a permis de déterminer les conditions optimales et d'évaluer l'efficacité des traitements. Afin de définir les conditions optimales de conservation, les eaux traitées aux graines et aux tourteaux de *Moringa oleifera* ont été conservées à température ambiante (25-30°C) et à 4°C. Les bactéries indicatrices de contamination fécale ont été dénombrées à des intervalles de temps de 24 heures durant 72 heures. Les données obtenues ont été analysées avec le logiciel statistique XLSAT 7.5.2. et les moyennes ont été comparées en utilisant le test de Newman Keuls au seuil de probabilité $p = 5\%$. Les caractéristiques physicochimiques, bactériologiques et parasitologiques des échantillons d'eau traités ont été déterminées et appréciées au regard de leurs caractéristiques initiales, du temps de décantation, des concentrations de coagulants et suivant les normes OMS (2011) pour la qualité des eaux de boisson.

Des résultats, il ressort que les conditions et l'efficacité des traitements avec les graines de *Moringa oleifera* varient en fonction des caractéristiques initiales des eaux brutes. La turbidité des eaux traitées a varié significativement en fonction du site ($p < 0,0001$), de la concentration de coagulant ($p < 0,0001$) et du temps de décantation ($p < 0,0001$). Pour chaque type de coagulant, les concentrations et les temps de décantation optimums ont varié en fonction des eaux brutes. Les temps de décantation optimums fournissant les plus faibles

turbidités de l'eau étaient compris entre 15-30 min pour les traitements aux coagulants de tourteaux de *Moringa oleifera*, contre 30 min-2 h pour les traitements aux graines. Les abattements de la turbidité obtenus étaient compris entre 24 et 99% pour les traitements aux graines contre 91,8 à 99% pour les tourteaux de *Moringa oleifera*. D'une manière générale, les deux traitements ont réduit significativement les nitrates, nitrites, calcium et magnésium ($p < 0,0001$) dans les eaux traitées sauf les sulfates pour lesquels les concentrations ont augmenté sans être au dessus de la valeur recommandée par l'OMS.

Aux conditions optimales de traitement pour tous les échantillons d'eau confondus, les abattements microbiens obtenus avec les graines de *Moringa oleifera* ont été compris entre 92-100% contre 84-100% pour les tourteaux. Spécifiquement, des abattements de 84-100 % ont été obtenus pour les coliformes fécaux, 92-100 % pour *Escherichia coli*, 94-100 % pour les entérocoques et 100 % pour les kystes de *Giardia intestinalis*. Toutefois, on observe une recontamination des eaux traitées durant la conservation qui est significativement liée au type de traitement ($p < 0,0001$), à la durée ($p < 0,0001$) et à la température de conservation ($p < 0,0001$). Globalement, pour les échantillons d'eau traités aux graines de *Moringa oleifera* et conservés à température ambiante, les coliformes fécaux ont augmenté de 57-80 UFC/100 ml, 42-50 UFC/100 ml pour les *E. coli* et 22-47 UFC/100 ml pour les entérocoques, durant 72 heures de conservation. Dans les mêmes conditions, pour les eaux traitées avec les tourteaux de *M. oleifera*, les coliformes fécaux ont augmenté de 63-104 UFC/100 ml, 57-82 UFC/100 ml pour *E. coli* et 28-52 UFC/100 ml pour les entérocoques. Il est ressorti également que la prolifération microbienne est plus significative à température ambiante (25-30°C) qu'à 4°C ($p < 0,0001$), température à laquelle l'accroissement bactérien n'est significatif qu'après 48 heures de conservation. Ainsi, la conservation de l'eau traitée doit tenir compte du type de traitement au *M. oleifera*, de la température et de la durée de conservation. De ce fait, pour préserver la qualité microbiologique, les eaux traitées aux graines de *Moringa oleifera* doivent être conservées à basse température et consommées avant 24 heures.

Cette recherche constitue un premier travail exploratoire qui ouvre la voie vers des essais de formulation d'un nouveau processus de traitement des eaux par la coagulation-floculation avec les graines de *Moringa oleifera* en milieu rural. Il conviendra toutefois de développer une technique permettant de réduire les matières organiques résiduelles pour améliorer la qualité organoleptique et une meilleure conservation de l'eau traitée.

Mots clés : Graines, tourteaux, *Moringa oleifera*, floculation-sédimentation, eau potable, microbiologie, physicochimie.

ABSTRACT

Access to safe drinking water remains a major concern in sub-Saharan Africa, particularly in rural areas where populations are confronted to the optimal management of water distribution points, the inadequate hygiene and sanitation and the lack of appropriate disinfection methods at household. Thus, the integration of biological processes in drinking water treatment could be a viable alternative to improving the drinking water quality, because of the availability and no-toxicity of substances. In this context, this study aims to evaluate and optimize the purifier effect of *Moringa oleifera* seeds in the treatment of water consumed in rural and periurban areas in Burkina Faso and to define the optimum processing and storage conditions in household.

A total of 240 water samples from surface water reservoirs (Gana, Loumbila, Ouaga 3 and Ziga) and wells (Boaré) consumed by populations in rural and périurban areas were treated with *Moringa oleifera* seeds or cakes coagulants. Water physicochemical (turbidity, pH, nitrates, nitrites, calcium, magnesium, total hardness, organic matter and sulfates) and microbiological (*Escherichia coli*, fecal coliforms, enterococcus and parasites) parameters were monitored in relation to *M. oleifera* coagulant concentration and settling time in order to determine the optimum processing conditions and to assess treatment efficiency. To define optimal conditions of storage, water samples treated at optimum processing conditions were stored at room temperature (25-30°C) and 4°C. Bacterial and parasites indicators of fecal pollution were monitored every 24 hours during three (3) days, based on laboratory standard methods. Data were analyzed using the Student's t test and XLSTAT 7.5.2 statistical software and mean parameters concentrations were compared according to the Newman Keuls' test ($p=0.05$). The physicochemical, bacteriological and parasitological characteristics of treated water samples were determined and assessed according to initial characteristics of unsafe water, settling time and coagulants concentrations. Water quality was assessed using the WHO standards.

It appeared that the processing conditions and treatment efficiency were related to the unsafe water initial characteristics. The Student's t-test revealed that water turbidity was significantly related to the sampling site ($p<0.0001$), *M. oleifera* treatment ($p<0.0001$), settling time ($p<0.0001$) and coagulant concentration ($p<0.0001$). For the same concentration of coagulant, settling time providing the lowest turbidity was significantly shorter ($p<0.0001$) with *Moringa oleifera* cakes than seeds. Optimum settling time with *Moringa oleifera* cakes was between 15-60 min versus 60-120 min with *Moringa oleifera*

seeds. The reduction of turbidity obtained was between 24-99% for *Moringa oleifera* seeds treatment versus 91.8-99% with *Moringa oleifera* cakes. Both treatments reduced significantly minerals concentrations in treated water excepted sulfates for which the concentrations reversely increased ($p < 0.0001$).

Globally, the abatement of microbial pollution indicators was 92-100% with *M. oleifera* seeds treatment versus 84-100% with *M. oleifera* cakes one. For the same settling time, the microbial reduction was related to the characteristics of unsafe water samples and was in the range of 84-100% for fecal coliforms, 92-100% for *Escherichia coli* and 94-100% for enterococcus. By these treatments we also obtained the total elimination of *Giardia intestinalis* cysts. However, we observed a recontamination of treated water during the storage which was related to the treatment ($p < 0.0001$), storage temperature ($p < 0.0001$) and shelf life ($p < 0.0001$). From the results obtained, bacterial indicators increased significantly with the storage temperature ($p < 0.0001$) and shelf life ($p < 0.0001$). Nevertheless, for all water samples, bacterial growth was more important in samples treated with *Moringa oleifera* cakes than seeds ($p < 0.0001$). Concerning water samples treated with *Moringa oleifera* seeds and stored at room temperature, bacterial increase after 72 hours was 57-80, 42-50 and 22-47 CFU/100 ml for fecal coliforms, *E. coli* and enterococcus, respectively. With *Moringa oleifera* cakes treatment, the increase was 63-104, 57-82 and 28-52 CFU/100 ml for the same indicators, respectively. Bacterial growth was also more important at room temperature than at 4°C. Thus, microbiological quality of water treated with *Moringa oleifera* seeds was better than with cakes one, whatever storage temperature and shelf life. Overall, water treated with *Moringa oleifera* seeds should be stored at low temperature and consumed within 24 hours.

This research constitutes the first exploratory work which opens the way towards the new process formulation of water treatment by flocculation-sedimentation with *Moringa oleifera* seeds in rural areas. Besides the promising results obtained, it will be appropriate to develop a method to reduce the residual of organic matter in treated water to preserve water quality during the storage.

Keywords: Seeds, cakes, *Moringa oleifera*, drinking water, flocculation-sedimentation, microbiology, physical chemistry.

LISTES DES ARTICLES ET COMMUNICATIONS

a) Articles publiés dans des revues à comité de lecture

Articles sur les travaux de thèse

1. **KABORE Aminata**, SAVADOGO Boubacar, OTOIDOBIGA Harmonie, SAWADOGO Adama, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2015). Microbiological quality of water treated with *Moringa oleifera* seeds or cakes during the storage: Case study of water reservoir of Loumbila, Ziga and Ouaga 3 dams in Burkina Faso, *Journal of Water Resource and Protection*, 2015, 7, 312-321p. doi: 10.4236/jwarp.2015.74025, Published Online March 2015. <http://www.scirp.org/journal/jwarp>.
2. **KABORE Aminata**, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2013). Effectiveness of *Moringa oleifera* Defatted Cake versus Seed in the Treatment of Unsafe Drinking Water: Case Study of Surface and Well Waters in Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, 5, 1076-1086p. doi:10.4236/jwarp.2013.511113, Published Online November 2013. <http://www.scirp.org/journal/jwarp>.
3. **KABORE Aminata**, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2013). Optimisation de l'efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de Consommation en Afrique sub-saharienne : cas des eaux du Burkina Faso. *Revue des Sciences de l'Eau* 26(3) (2013) 209-220p.
4. **KABORE Aminata**, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2013). Efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de consommation en Afrique sub-saharienne: cas des eaux du BURKINA FASO. *Annales Université de Ouagadougou Série C*, N° 009, ISBN 979-10-90524-17-0, 107-130p.

Autres publications

1. SAWADOGO Adama, OTOIDOBIGA C. Harmonie, **KABORE Aminata**, SAWADOGO B. Joseph, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2015). Optimization of hydrocarbons biodegradation by bacterial strains isolated from wastewaters in Ouagadougou, Burkina Faso: Case study of diesel and used lubricating oils. *Current Research in Microbiology and Biotechnology*, Vol. 3, N°3 (2015): 652-65. ISSN: 2320 – 2446p.
2. ROSILLON Francis, SAWADOGO B. Joseph, **KABORE Aminata**, DIANOU Dayéri (2014). Pourquoi des teneurs aussi élevées en nitrates dans les puits et forages de la vallée du Sourou au Burkina Faso? Enquêtes de 2006 à 2014. Cahiers de l'ASEES 18 (2013) 33-43p, ASEES. Disponible en ligne sur: www.water-quality-journal.org, DOI: 10.1051/asees/2014004
3. SAWADOGO Adama, **KABORE Aminata**, OTOIDOBIGA C. Harmonie, SAWADOGO B. Joseph, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2014). Isolation and characterization of hydrocarbon-degrading bacteria from wastewaters in Ouagadougou, Burkina Faso. *Journal of Environmental Protection*, 2014, 5, 1183-1196p. Published Online September 2014 in *Sci. Res.* <http://www.scirp.org/journal/jep> <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2014.512115>.
4. SAVADOGO Boubacar, **KABORE Aminata**, ZONGO Dramane, PODA Jean Noel, BADO Hortense, ROSILLON Francis, DIANOU Dayéri (2013). Problematic of drinking water access in rural area: case study of the Sourou valley in Burkina Faso. *Journal of Environmental Protection*, 2013, 4, 31-50p. doi:10.4236/jep.2013.41004, Published Online January 2013 in *Sci. Res.* <http://www.scirp.org/journal/jep>.
5. NITIEMA Léon, SAVADOGO Boubacar, ZONGO Dramane, **KABORE Aminata**, PODA Jean Noel, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2013). Microbial Quality of Wastewater Used in Urban Truck Farming and Health Risks Issues in Developing Countries: Case Study of Ouagadougou in Burkina Faso. *Journal of Environmental Protection*, 2013, 4, 575-584p. doi:10.4236/jep.2013.46067, published Online June 2013 in *Sci. Res.* <http://www.scirp.org/journal/jep>.
6. ROSILLON Francis, SAVADOGO Boubacar, **KABORE Aminata**, BADO-SAMA Hortense, DIANOU Dayéri (2012a). Attempts to Answer on the Origin of the High Nitrates Concentrations in Groundwaters of the Sourou Valley in Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 663-673p. doi:10.4236/jwarp.2012.48077 published online August 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/jwarp>)

7. ROSILLON Francis, SAVADOGO Boubacar, **KABORE Aminata**, BADO-SAMA Hortense, DIANOU Dayéri (2012b). Estimation des teneurs en nitrates dans les eaux potables par l'utilisation de bandelettes réactives: un exercice d'éducation à l'environnement dans la vallée du Sourou au Burkina Faso. *VertigO : la Revue Electronique en Sciences de l'Environnement*, 12(2). Publié en ligne en September 2012 (<http://vertigo.revues.org/12274>).

b) Communications

➤ Communications orales

1. **KABORE Aminata**, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2014). Phytoremediation of microbial pathogens and poor physicochemical parameters in unsafe drinking waters: Case study of the purifying property of *Moringa oleifera* in the treatment of surface and well waters in Burkina Faso. *International seminar on Microbes and Environment, Nagoya University, 4-14 November 2014, Nagoya*.

2. **KABORE Aminata**, SAVADOGO Boubacar, ZOUGOURI Tidiane, BADO Hortense, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2014). Qualité physicochimique et microbiologique des eaux de surface et des eaux souterraines dans le bassin versant du Sourou, Burkina Faso. Communication orale, Restitution du projet "Contrat de Rivière Sourou" (2003 – 2013), 13 Février 2014, SP/PAGIRE Ouagadougou, Burkina Faso.

3. **KABORE Aminata**, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2013). Efficacité des tourteaux de graines de *Moringa oleifera* comparativement au sulfate d'aluminium dans le traitement des eaux de consommation par coagulation-floculation. Communication orale, Journées Portes Ouvertes sur les activités de recherche de l'Université de Ouagadougou, 25-30 Novembre 2013 Ouagadougou, Burkina Faso.

4. **KABORE Aminata**, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2012). Etude comparative de l'efficacité de tourteaux des graines de *Moringa oleifera* et du sulfate d'aluminium dans le traitement des eaux de consommation en Afrique sub-saharienne : cas des eaux du Burkina Faso. Communication orale, Colloque Régional sur les Biotechnologies du Réseau Ouest Africain de Biotechnologies (RABIOTECH), Ouagadougou 6-9 Novembre 2012, Burkina Faso.

➤ **Posters**

5. KABORE Aminata, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2014). Qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de consommation traitées avec les graines et tourteaux de *Moringa oleifera* en Afrique sub-saharienne: cas des eaux du Burkina Faso. Poster, Colloque Scientifique international de l'Université de KARA, 12 – 16 Mai 2014, Kara, TOGO.

6. KABORE Aminata, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2013). Etude comparative de l'efficacité des graines et tourteaux de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de consommation en Afrique sub-saharienne: cas des eaux du Burkina Faso, Poster, Journées Portes Ouvertes sur les activités de recherche de l'Université de Ouagadougou, 25-30 Novembre 2013 Ouagadougou, Burkina Faso (**1^{er} prix Poster**).

7. KABORE Aminata, SAVADOGO Boubacar, ROSILLON Francis, TRAORE S. Alfred, DIANOU Dayéri (2012). Etude comparative de l'efficacité des graines et tourteaux de *Moringa oleifera* sur les paramètres physico-chimiques des eaux de consommation en Afrique sub-saharienne: cas des eaux du Burkina Faso. Poster, Colloque Régional sur les Biotechnologies, 6-9 Novembre 2012, Ouagadougou, Burkina Faso.

LISTES DES ABREVIATIONS

CNRST : Centre National de Recherche Scientifique et Technologique

CRSBAN : Centre de Recherche en Sciences Biologiques Alimentaires et Nutritionnelles

DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène en 5 jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

IRSS : Institut de Recherche en Sciences de la Santé

ISP/IPICS : International Science Program/International Program in the Chemical Sciences

MES : Matières En Suspension

MO : Matières Organiques

OMD : Objectifs du Millénaire pour le Développement

OMS/WHO : Organisation Mondiale de la Santé/World Health Organization

ONEA : Office National de l'Eau et de l'Assainissement

PED : Pays En Développement

PEM : Point d'Eau Moderne

UFC : Unité Formant Colonie

UFR/SVT : Unité de Formation et de Recherche/Sciences de la Vie et de la Terre

UNICEF : United Nations International Children's Emergency Fund

UV-A : Ultraviolet A

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de l'organisation scientifique du travail.....	8
Figure 2 : Structuration de la thèse	9
Figure 3 : <i>Moringa oleifera</i> (photo Kaboré, 2015).....	27
Figure 4 : Fruits (a) et Graines (b) de <i>Moringa oleifera</i> (photo Kaboré, 2015)	29
Figure 5 : Situation des Bassins versants nationaux du Burkina Faso (MOOC-DD, 2014)	32
Figure 6 : Localisation du site d'étude dans la ville de Ouagadougou (Source fond de carte : Sawadogo et <i>al.</i> 2014). Site d'étude*.	33
Figure 7: Localisations des sites de Loumbila ▲ et de Ziga★ dans le bassin versant du Nakambé.....	34
Figure 8 : Localisation des zones et sites d'échantillonnage d'eau de surface sur la rivière Gana et du puits à Boaré/Bouaré dans la Vallée du Sourou (bassin du fleuve Mouhoun).....	35
Figure 9 : Quelques usages de l'eau sur les sites d'échantillonnage : (a) abreuvement d'animaux et approvisionnement en eau de boisson (b) au niveau du site d'échantillonnage du Gana ¹ ; approvisionnement en eau de boisson à Ziga (c) ; Boaré ² (d) ; Loumbila (e).....	36
Figure 10 : Echantillonnage de l'eau à Ziga (a), Gana (b) et Boaré (c et d) (Photo Dianou et <i>al.</i> , 2011 ; Kaboré et <i>al.</i> , 2013).	37
Figure 11 : Floculateur FC6S Velp Scientifica Jar-Test : Essai de clarification en jar test des échantillons d'eau (Photo Kaboré, 2013).	40
Figure 12 : Graines (a) et tourteaux (b) de <i>Moringa oleifera</i> (Photo Kaboré, 2013)	45
Figure 13 : Echantillon d'eau brute de Gana (a), traité au sulfate d'alumine (b), aux tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> (c) et aux graines de <i>M. oleifera</i> (d) après une (1) heure de décantation.....	61
Figure 14 : Evolution des coliformes fécaux (a), <i>E. coli</i> (b), entérocoques (c) dans les échantillons d'eau de Loumbila non traités et traités aux graines ou aux tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> en fonction de la durée et de la température de conservation (Kaboré et <i>al.</i> 2015).	70
Figure 15 : Evolution des coliformes fécaux (a), <i>E. coli</i> (b), entérocoques (c) dans les échantillons d'eau de Ouaga 3 non traités et traités aux graines ou aux tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> en fonction de la durée et de la température de conservation (Kaboré et <i>al.</i> 2015).	71
Figure 16 : Evolution des coliformes fécaux (a), <i>E. coli</i> (b), entérocoques (c) dans les échantillons d'eau de Ziga non traités et traités aux graines ou aux tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> en fonction de la durée et de la température de conservation (Kaboré et <i>al.</i> 2015).	72
Figure 17 : Répartition géographique de <i>Moringa oleifera</i> au Burkina Faso.....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Principaux groupes et genres d'organismes pathogènes responsables de maladies hydriques (Straub et Chandler, 2003).....	17
Tableau II : Quelques coagulants naturels utilisés dans la purification des eaux (Diallo, 2008). 26	
Tableau III : Composition des graines de <i>Moringa oleifera</i> /100g (Ndabigengesere <i>et al.</i> ,1995)29	
Tableau IV: Turbidités moyennes des eaux en fonction des concentrations de coagulant de graines de <i>Moringa oleifera</i> et du temps de décantation (Kaboré <i>et al.</i> 2013c).....	50
Tableau V: Paramètres physicochimiques moyens des eaux avant (Av) et après (Ap) 2h de traitement avec les concentrations optimales de coagulant de <i>Moringa oleifera</i> (Kaboré <i>et al.</i> , 2013b).....	52
Tableau VI : Paramètres microbiologiques des échantillons d'eau avant (Av) et après (Ap) 2h de traitement avec les concentrations optimales de coagulant (Kaboré <i>et al.</i> , 2013c).....	54
Tableau VII : Pourcentages d'abattement de la turbidité et des indicateurs microbiens après 2 h de traitement au <i>Moringa oleifera</i>	55
Tableau VIII : Moyennes des turbidités des échantillons d'eaux de Loumbila, Ouaga 3 et Gana, non traités et traités avec les coagulants de tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> (1), de graines (2) et de sulfate d'alumine (3) (Kaboré <i>et al.</i> , 2013a).	58
Tableau IX : Moyennes des turbidités des échantillons d'eau de Ziga et Boaré, traitées aux tourteaux (1), aux graines de <i>Moringa oleifera</i> (2) et au sulfate d'alumine (3) (Kaboré <i>et al.</i> , 2013a).	59
Tableau X : Caractéristiques physicochimiques des coagulants de graines et de tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> (Kaboré <i>et al.</i> , 2013a).....	61
Tableau XI : Moyennes des caractéristiques physicochimiques des eaux de Loumbila, Ouaga 3, Ziga, Boaré et Gana après 2h de traitement aux tourteaux (1) et aux graines de <i>Moringa oleifera</i> (2), comparativement aux échantillons Non Traités (NT).	62
Tableau XII : Moyennes des concentrations de <i>E. coli</i> , coliformes fécaux, entérocoques et kystes de parasites des eaux de Ouaga 3, Loumbila, Ziga, Boaré et Gana, après 2 h de traitement aux tourteaux (1), aux graines (2) et au sulfate d'alumine (15 min) comparativement au échantillons Non Traités (NT) (Kaboré <i>et al.</i> , 2013a).....	64
Tableau XIII : Moyennes des concentrations des coliformes fécaux, <i>E. coli</i> et entérocoques dans les eaux de Loumbila, Ouaga 3 et Ziga, traitées avec les tourteaux (1) et les graines de <i>Moringa oleifera</i> (2) (Kaboré <i>et al.</i> , 2015).	68
Tableau XIV : Quantités moyennes de graines et de tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> nécessaires pour traiter 1L d'eau brute.....	77
Tableau XV: Coût estimatif des traitements de 1m ³ d'eau aux graines de <i>Moringa oleifera</i> et au sulfate d'alumine.....	77

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iv
ABSTRACT	vi
LISTES DES ARTICLES ET COMMUNICATIONS	viii
LISTES DES ABREVIATIONS	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xiv
TABLE DES MATIERES	xv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Introduction	1
2. Présentation du sujet d'étude.....	4
3. Objectifs de recherche	7
4. Structure de la thèse	9
CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	10
I. La problématique de l'accès à l'eau potable	11
II. Les maladies liées à l'eau	11
III. Qualité de l'eau de boisson	12
1. Les paramètres physicochimiques et organoleptiques de l'eau	12
1.1. La turbidité	12
1.2. Les Matières En Suspension (MES).....	13
1.3. La conductivité	13
1.4. Le pH.....	13
1.5. Calcium, magnésium et dureté totale	14
1.6. Les Matières Organiques.....	14
1.7. Les nitrates et les nitrites	14
1.8. Les sulfates.....	16
1.9. Les métaux lourds	16
2. Qualité microbiologique de l'eau de boisson.....	16

2.1.	Microorganismes indicateurs de contamination fécale	17
2.1.1.	Les coliformes fécaux	18
2.1.2.	<i>Escherichia coli</i>	19
2.1.3.	Les entérocoques.....	20
2.2.	Les protozoaires	20
IV.	Les méthodes de traitement domestique des eaux	21
1.	La décantation	21
2.	La filtration	21
3.	La désinfection de l'eau	22
3.1.	Désinfection par ébullition	22
3.2.	Désinfection par chloration	22
3.3.	Désinfection solaire.....	23
4.	La coagulation-floculation.....	23
4.1.	La coagulation-floculation chimique	25
4.2.	La coagulation-floculation naturelle	25
V.	Traitement des eaux par coagulation-floculation avec les graines de <i>M. oleifera</i>	26
1.	Description de <i>Moringa oleifera</i>	27
2.	Utilisations de <i>Moringa oleifera</i>	27
2.1.	Utilisation dans l'alimentation	28
2.2.	Utilisation dans la pharmacopée	28
2.3.	Utilisation dans la cosmétique.....	28
3.	Composition des graines de <i>Moringa oleifera</i>	28
4.	Application de <i>Moringa oleifera</i> dans le traitement de l'eau	30
CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES		31
I.	Présentation du cadre et sites d'étude	32
II.	Echantillonnage des points d'eau	37
III.	Optimisation des propriétés épuratoires des graines de <i>Moringa oleifera</i>	38
1.	Préparation des coagulants de graines.....	38

2. Détermination des paramètres physicochimiques des coagulants de graines de <i>Moringa oleifera</i>	38
3. Essais d'optimisation du pouvoir clarifiant des graines de <i>Moringa oleifera</i>	39
IV. Effets des traitements aux graines de <i>Moringa oleifera</i> sur les paramètres physicochimiques et microbiologiques des eaux.....	40
1. Détermination des paramètres physicochimiques et organoleptiques des eaux traitées aux graines de <i>Moringa oleifera</i>	40
1.1. Mesure de la turbidité et du pH.....	40
1.2. Détermination des nitrates, nitrites et sulfates	41
1.3. Détermination des concentrations de calcium, magnésium et la dureté totale.....	41
1.4. Détermination des concentrations de matières organiques dans les eaux traitées .	42
2. Détermination des paramètres bactériologiques et parasitologiques des eaux traitées aux graines de <i>Moringa oleifera</i>	42
2. 1. Analyse bactériologique	42
2.1.1. Préparation des échantillons et ensemencement.....	42
2.1.2. Dénombrement des bactéries	43
2. 2. Dénombrement des parasites.....	44
V. Evaluation de l'efficacité épuratoire des tourteaux de <i>Moringa oleifera</i>	44
1. Préparation des coagulants de tourteaux de <i>Moringa oleifera</i>	44
2. Détermination des paramètres physicochimiques des coagulants de tourteaux	45
3. Etude du pouvoir épuratoire des tourteaux de <i>Moringa oleifera</i>	45
VI. Détermination des qualités physicochimiques et microbiologiques des eaux traitées aux tourteaux de <i>Moringa oleifera</i>	45
VII. Evaluation de la qualité microbiologique des eaux traitées aux graines et tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> durant la conservation	46
VIII. Estimation du coût des traitements aux graines de <i>Moringa oleifera</i> et au sulfate d'alumine	46
IX. Analyse statistique des résultats	46
CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSION	47

Partie 1: Optimisation des propriétés épuratoires des graines de <i>Moringa oleifera</i> dans le traitement des eaux brutes de consommation.	48
Introduction	49
1. Optimisation du pouvoir clarifiant des graines de <i>Moringa oleifera</i>	49
2. Effet du traitement sur les paramètres physicochimiques des eaux	52
3. Effet du traitement sur les paramètres microbiologiques des eaux	53
Partie 2: Evaluation des qualités épuratoires des tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> dans le traitement des eaux de consommation.	56
Introduction	57
1. Pouvoir clarifiant des tourteaux de <i>Moringa oleifera</i>	57
2. Paramètres physicochimiques des eaux traitées aux tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> ...	61
3. Paramètres microbiologiques des eaux traitées aux graines de <i>Moringa oleifera</i> , aux tourteaux et au sulfate d'alumine.....	64
Partie 3: Qualité microbiologique des eaux traitées aux graines et tourteaux de <i>Moringa oleifera</i> durant la conservation	67
Introduction	68
1. Caractéristiques microbiologiques des eaux traitées aux graines et aux tourteaux de <i>Moringa oleifera</i>	68
2. Effet de la température et de la durée de conservation sur la qualité microbiologique des eaux traitées aux graines et tourteaux de <i>Moringa oleifera</i>	69
Partie 4: Coût et accessibilité des traitements au <i>Moringa</i> et au sulfate d'alumine	74
1. Accessibilité et intérêt de l'utilisation des graines de <i>Moringa oleifera</i> dans la purification des eaux comparativement au sulfate d'alumine.	75
2. Estimation du coût de traitements.....	76
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	79
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	83
ANNEXE 1	99
ANNEXE 2	102
ANNEXE 3 : PUBLICATIONS DANS DES REVUES A COMITE DE LECTURE	
Erreur ! Signet non défini.	

INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction

« L'eau est la clé du développement durable. Nous en avons besoin pour la santé, la sécurité alimentaire et le progrès économique », a déclaré Ban Ki-moon, Secrétaire général de l'ONU (Sommet de l'eau, 2013). Ainsi, en quantité suffisante et en qualité pour satisfaire les besoins humains fondamentaux, elle constitue une condition préalable pour un meilleur niveau de santé et un développement durable. Cependant, l'accès à cette ressource pose de sérieux problèmes dans plusieurs régions du monde de par sa rareté et du fait des activités de développement qui ne cessent de s'étendre, entraînant souvent une surexploitation et une pollution des ressources en eau de la planète. Selon l'OMS, 884 millions de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'eau potable (OMS-UNICEF, 2010).

La problématique de l'accès à l'eau potable est devenue une préoccupation au niveau mondial. En juillet 2010, l'Assemblée Générale des Nations Unies a adopté une résolution dans laquelle elle stipule que le droit à l'eau potable (salubre et propre) est un droit fondamental, essentiel au plein exercice du droit à la vie et de tous les droits de l'Homme (ONU, 2010). L'objectif 7, cible 10 des Objectifs du Millénaire pour le Développement prévoit de réduire de moitié le nombre de personnes n'ayant pas accès à l'eau en 2015 (UNICEF-OMS, 2008). Les efforts consentis par les gouvernements, les acteurs et les usagers de l'eau pour l'atteinte de cet OMD ont permis à 89 % de la population mondiale d'avoir actuellement accès à des sources améliorées d'eau potable (OMS-UNICEF, 2012). Bien que ce taux soit élevé au plan mondial, 783 millions de personnes n'ont toujours pas accès à une eau potable et seulement 61% de la population de l'Afrique subsaharienne ont accès à des sources améliorées d'eau de boisson (ONU, 2012). En outre, les progrès réalisés pour atteindre la cible des OMD relative à l'eau potable sont évalués en fonction de l'accès à des sources améliorées d'eau de boisson et de la quantité d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins essentiels de l'homme (usages personnels et domestiques). Par contre, ces évaluations insistent peu sur la qualité de l'eau. Toutefois, il est bien connu que les maladies liées à l'eau menacent la santé humaine et sont des contraintes pour le développement socioéconomique.

Dans les Pays En Développement, quatre-vingt pour cent (80%) des maladies sont causés par la consommation d'eau insalubre et par les problèmes d'assainissement (Rapport sur la gestion de l'eau, 2000). Les maladies hydriques constituent donc une charge considérable pour l'humanité. On estime que 1,6 million de personnes meurent chaque année dans le monde suite à des maladies diarrhéiques du fait de la consommation d'eau insalubre,

au nombre desquelles quatre-vingt-dix pour cent (90%) sont des enfants de moins de cinq ans, vivant pour la plupart dans les Pays En Développement (PED), soit près de 1,5 million (OMS-UNICEF, 2012). Ainsi, si l'accès à l'eau potable ne constitue pas un problème dans les pays développés, les PED sont par contre confrontés à une crise aigüe d'approvisionnement en eau potable où des millions de personnes continuent de consommer de l'eau de qualité médiocre.

Au Burkina Faso, la mise en œuvre d'une politique volontariste des pouvoirs publics en matière d'eau, traduite par la mise en place de structures telles que le Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE) en 2003, le Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et Assainissement (PN-AEPA) en 2006, la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) et la Direction d'Etude et Information sur l'Eau (DEIE) en 2008, a permis de réaliser des progrès considérables dans l'accès à l'eau potable notamment en milieu urbain (Livre Bleu, 2012). A cet effet, au plan national, le taux d'accès à l'eau potable est passé de 18,3% en 1993 à 66,3% en 2007 (PNUD, 2010) et selon les Nations Unies, le Burkina Faso aurait atteint les OMD dans ce secteur (PNUD, 2010). Toutefois, bien que des progrès considérables aient été réalisés particulièrement en milieu urbain, la situation reste problématique en milieu rural où certaines populations continuent de s'alimenter à partir des eaux de surface, de puits traditionnels et de forage souillées, du fait principalement du manque d'hygiène et de méthodes appropriées de purification de l'eau de boisson au niveau familial (Dianou *et al.*, 2011; Savadogo *et al.*, 2013). D'autres études (Aouba, 2012), ont également montré qu'en milieu périurbain, les populations sont confrontées à la gestion optimale des points d'eau malgré les efforts faits par les autorités. Selon le Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques (MAHRH, 2006), les insuffisances liées à l'approvisionnement en eau potable en milieu rural se situeraient au niveau de grandes disparités entre les régions et entre les villages (certains suréquipés en Points d'Eau Modernes (PEM) tandis que d'autres sont sous-équipés) et aux grandes distances à parcourir dans les zones à faible densité de PEM, ce qui entraîne des consommations spécifiques inférieures à la norme OMS qui est de 20l/jour/personne. Aussi, dans la plupart des cas, les points d'approvisionnement (sources et puits) ne sont pas protégés et deviennent des sources potentielles de contamination. Selon Dianou *et al.*, (2003, 2004, 2011), MAHRH (2006, 2011), Rosillon *et al.* (2012a et 2012b), Savadogo *et al.*, (2013), la qualité de l'eau consommée par les populations dans certaines zones rurales du Burkina Faso, au-delà de l'aspect quantitatif est très préoccupante du fait de la concurrence de points d'eau traditionnels, du manque d'entretien des ouvrages hydrauliques, de l'insuffisance d'hygiène et d'assainissement et du manque de méthodes appropriées de désinfection à l'échelle familiale.

En outre, certaines eaux de rivière et de marigot continueraient d'être utilisées en milieu rural pour la consommation humaine, notamment dans la vallée du Sourou (Dianou *et al.*, 2011). Ainsi, il ressort clairement la nécessité de traiter les eaux de consommation dans certaines zones rurales pour un accès effectif à l'eau potable au Burkina Faso.

Au regard de cette situation, les initiatives tendant à promouvoir l'application des techniques de traitement de l'eau au niveau individuel ou familial devraient être encouragées (PNUE, 2011). L'approche du traitement de l'eau au niveau individuel ou familial consiste à la filtration, à l'ébullition, à l'utilisation des produits chlorés, à une exposition au soleil ou à l'usage de photo-sensibilisateurs (Rosillon, 2005 ; Sunda, 2012). Toutefois, ces différentes technologies présentent des limites au plan socioéconomique, de l'accessibilité et sur la maîtrise des procédures de traitement (Sunda, 2012).

La coagulation-floculation est une méthode permettant d'éliminer la turbidité constituée d'une part, de matières en suspension (minérales et organiques) ainsi que de matières organiques dissoutes et d'autre part, de microorganismes (bactéries, protozoaires et virus) (Desjardins, 1997 ; Degremont, 2005). Ce procédé très important, constitue la première étape du traitement conventionnel des eaux et utilise généralement des substances chimiques notamment le sulfate d'aluminium comme coagulant. Toutefois, l'accessibilité et l'utilisation de telles substances posent problème en milieu rural. Outre ces substances chimiques, des études ont montré l'efficacité de certaines substances organiques notamment les graines de *Moringa oleifera* en tant que coagulant (Muyibi et Okuofu, 1995 ; Okuda *et al.*, 1999; Fahey *et al.*, 2001, 2002 ; Okuda *et al.*, 2001a et 2001b; Muyibi *et al.*, 2003).

La méthode de traitement des eaux par coagulation-floculation avec des substances naturelles notamment les graines de *Moringa oleifera* est connue au niveau familial pour réduire la turbidité et les microorganismes pathogènes des eaux (Olsen, 1987 ; Faby et Eleli, 1993 ; Kaboré, 2011). L'intérêt de cette méthode outre son efficacité, réside dans la disponibilité et l'accessibilité des graines, la non-toxicité des substances et dans les activités génératrices de revenus qu'elle peut engendrer. Cependant, les conditions permettant des performances optimales dans le traitement des eaux de boisson avec cette plante restent à définir et c'est la raison d'être de la présente étude. Ainsi, l'application de cette technique optimisée au niveau individuel et familial devrait être une alternative pour la potabilisation de l'eau dans les Pays En Développement (PED) en général et au Burkina Faso en particulier.

D'après Folkard et Sutherland (2002), les technologies associées au traitement de l'eau doivent être aussi simples que possible, robustes et abordables à installer et à entretenir dans

les PED. Au Burkina Faso, au regard de l'état de pauvreté de la population dont 46,7% vit en dessous du seuil de pauvreté (Banque Mondiale, 2009), les méthodes viables de traitement des eaux, outre leur performance, doivent être simples, accessibles et de moindre coût.

2. Présentation du sujet d'étude

L'utilisation de substances naturelles d'origine végétale dans le traitement des eaux est de plus en plus connue dans les Pays En Développement. Les graines de *Moringa oleifera* sont traditionnellement utilisées au niveau domestique dans certaines zones rurales du Soudan pour la purification de l'eau de boisson (NRC, 2006). De nombreuses études ont montré son efficacité dans la clarification des eaux et l'élimination des microorganismes pathogènes (Eilert, 1978 ; Jahn, 1988a et 1988b ; Folkard *et al.*, 1989 ; Kaser *et al.*, 1990 ; Muyibi et Okuofu, 1995 ; Okuda *et al.*, 1999 ; Fahey *et al.*, 2001, 2002 ; Okuda *et al.*, 2001a et 2001b; Muyibi *et al.*, 2003; Kaboré, 2011; kaboré *et al.*, 2013a et 2013b).

Ainsi, Madsen *et al.*, (1987) ont observé un abattement de la turbidité de 80 à 99,5% et une réduction bactérienne de 90 à 99,99% avec les graines *M. oleifera* pour une durée de traitement comprise entre 1-2 heures. D'autres études ont également démontré que les graines de *M. oleifera* et *M. stenopetala* ont des performances équivalentes à celle de l'alun (sulfate d'alumine) dans la clarification des eaux très troubles et permettent une réduction du virus de l'herpès simplex et du virus Orf de 90% (Folkard *et al.*, 1989). Cependant, elles sont moins efficaces dans le traitement des eaux de faible turbidité, cette limite variant selon les sources (Jahn, 1988a, 1988b ; Kaser *et al.*, 1990 ; Folkard *et al.*, 1992 ; Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013b). Muyibi et Okuofu (1995) ont montré que le coagulant de graines de *M. oleifera* contient un polyélectrolyte (Weber, 1972), qui peut ne pas être efficace en tant que principal coagulant dans le traitement des eaux de faible turbidité car elles contiennent une faible concentration de particules colloïdales, avec un taux de contact bas entre les particules. Il ressort donc que l'efficacité du traitement aux graines de *M. oleifera* augmente avec celle de la turbidité initiale de l'eau brute. Une étude réalisée au Burkina Faso, sur l'utilisation des graines de *Moringa oleifera* dans la station de Poura qui fournit 600 m³ d'eau par jour a conclu que la poudre des graines de *Moringa* seule ne semble pas pouvoir remplacer le sulfate d'alumine, du fait des doses très élevées à utiliser et de la lenteur de décantation des floccs (Faby et Eleli, 1993). L'optimisation de l'efficacité du traitement en fonction des caractéristiques des eaux brutes pourrait permettre une meilleure application de cette technologie.

En outre, l'utilisation des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux a suscité d'autres études sur les constituants actifs des graines dans la purification des eaux. Six

polypeptides ont été identifiés avec leurs acides aminés constitués principalement de l'acide glutamique, la proline, la méthionine et l'arginine. D'autres études ont montré que les substances actives sont des protéines cationiques dimères de poids moléculaires d'environ 13 000 daltons (Ndabigengesere *et al.*, 1995; 1998). Des études ont également mis en évidence les propriétés antibactériennes des graines de *M. oleifera* notamment sur *E. coli* et *Enterobacter aerogenes*. Eilert *et al.*, (1981) ont identifié la présence d'un agent antimicrobien actif (4 α -4-rhamnouslyloxy-benzyl-isothiocynate) dans les graines de *M. oleifera* facilement soluble dans l'eau à 1,3 μ mol/l et non volatile. L'effet antimicrobien de ce composé évalué sur *Bacillus subtilis*, *Serratia marcescens* et *Mycobacterium phlei* a montré une inhibition complète de *B. subtilis* et *M. phlei* respectivement par 56 μ mol/l et 40 μ mol /l (Bichi *et al.* 2012).

L'étude du mécanisme de coagulation des graines de *M. oleifera* dans la réduction de la turbidité des eaux a montré que le mécanisme est basé sur l'adsorption et la neutralisation des charges colloïdales par les protéines cationiques (Ndabigengesere *et al.*, 1995; Broin *et al.*, 2002). Ainsi, des protéines purifiées seraient plus efficaces que des graines brutes (Ali, 2010 ; Bichi *et al.*, 2012) dans la purification des eaux. Pour ce faire, une méthode de purification des protéines adaptée au traitement domestique des eaux de consommation en milieu rural et péri-urbain reste à définir et son efficacité à évaluer.

D'autres études ont montré que le traitement des eaux avec les coagulants de *M. oleifera* augmente le taux de matières organiques (DBO, DCO et COT) et affecte les paramètres organoleptiques de l'eau notamment le goût, l'odeur et la couleur de l'eau traitée (Fatombi *et al.*, 2009 ; Kaboré, 2011 ; Kaboré *et al.*, 2013a, 2013b et 2013c). En outre, la présence de matières organiques induit également un risque de recontamination bactérienne durant le stockage de l'eau traitée (Jahn, 1988a, 1989a, 1989b). Il reste donc important d'une part d'évaluer la qualité microbiologique de l'eau traitée durant le stockage afin de définir les conditions optimales de conservation et d'autre part d'investiguer sur des voies permettant de réduire les matières organiques résiduelles dans les eaux traitées aux graines de *M. oleifera*.

La plupart de ces travaux réalisés sur l'utilisation du *M. oleifera* dans la purification des eaux se sont focalisées essentiellement sur la capacité des graines à clarifier les eaux turbides, à éliminer des microorganismes (essentiellement les bactéries) ainsi que leur effet sur certains paramètres physicochimiques et organoleptiques notamment le pH et la teneur en matières organiques résiduelles de l'eau. A cela, il est opportun de préciser que très peu d'études ont porté sur l'optimisation de l'efficacité épuratoire des graines dans la purification des eaux au regard de leurs caractéristiques initiales, la détermination des conditions optimales de

traitements, de l'effet des traitements sur des paramètres physicochimiques d'intérêt sanitaire notamment les nitrates, les nitrites, les métaux lourds ainsi que sur la qualité microbiologique des eaux traitées durant la conservation. En outre, peu d'études ont également porté sur le développement de méthodologies de traitements adaptées aux populations vivant en milieu rural dans des PED, qui sont les plus affectées par le manque d'eau potable. Notre étude intègre dans son approche et dans sa réalisation les différentes lacunes ainsi relevées.

L'originalité de ce travail de recherche réside dans le fait qu'il apporte de nouvelles connaissances sur l'utilisation et les propriétés des graines de *M. oleifera* dans la purification des eaux et élabore une méthode de traitement efficace, simple, accessible et à moindre coût pour les populations, notamment celles vivant en milieu rural.

Pour ce faire, le présent travail de recherche devra répondre aux questions centrales suivantes :

- ✓ Comment optimiser l'efficacité de la coagulation-floculation avec les graines de *M. oleifera* dans la purification des eaux brutes de consommation en fonction des caractéristiques (turbidité) des eaux brutes ?
- ✓ Comment améliorer la qualité organoleptique des eaux traitées ?
- ✓ Existerait-il une corrélation entre la présence de lipides et l'efficacité des protéines actives de *M. oleifera* dans la purification des eaux ?
- ✓ Quelle méthode de purification des graines de *M. oleifera* serait efficace et appropriée pour la population ?
- ✓ Comment évolue la qualité microbiologique de l'eau traitée aux graines de *M. oleifera* durant la conservation ?
- ✓ Quels facteurs influencent la qualité microbiologique des eaux traitées aux graines de *M. oleifera* durant la conservation et quelles sont les conditions optimales de stockage?
- ✓ Outre son efficacité, la purification des eaux aux graines de *Moringa oleifera* est-elle accessible aux populations ?

Les réponses à ces questionnements devraient apporter de nouvelles connaissances sur l'utilisation des graines de *M. oleifera* dans la purification des eaux et faciliter l'adoption et l'application de cette méthodologie dans le traitement des eaux de consommation au niveau domestique au Burkina Faso.

3. Objectifs de recherche

La présente étude vise à évaluer et à optimiser les performances épuratoires des graines de *Moringa oleifera* dans la purification des eaux brutes de consommation en milieu rural au Burkina Faso.

Objectifs spécifiques

De l'objectif général découlent les objectifs spécifiques suivants :

- ✓ documenter l'influence des concentrations des coagulants de graines de *M. oleifera* et du temps de décantation pour un traitement optimum en fonction de différentes caractéristiques physicochimiques et microbiologiques des eaux et définir les conditions optimales de traitement ;
- ✓ évaluer et comparer l'efficacité des tourteaux (graines de *M. oleifera* délipidées) obtenus selon la méthode artisanale à froid à celle des graines (non délipidées) dans la purification des eaux brutes ;
- ✓ évaluer les effets des traitements aux graines et tourteaux de *Moringa oleifera* sur des paramètres physicochimiques d'intérêt sanitaire, notamment les nitrates et nitrites ainsi que sur la qualité organoleptique des eaux ;
- ✓ évaluer et apprécier la qualité bactériologique et parasitologique des eaux traitées en fonction des concentrations de coagulants et au regard de la norme OMS ;
- ✓ évaluer la qualité microbiologique des eaux traitées durant la conservation et définir les conditions optimales de stockage ;
- ✓ évaluer le coût et l'accessibilité des traitements aux graines de *M. oleifera* comparativement à la méthode de la floculation-sédimentation utilisant le sulfate d'alumine et mise en œuvre par l'ONEA.

La construction de ce travail de recherche et sa mise en œuvre obéit à un canevas bien précis (Figure 1).

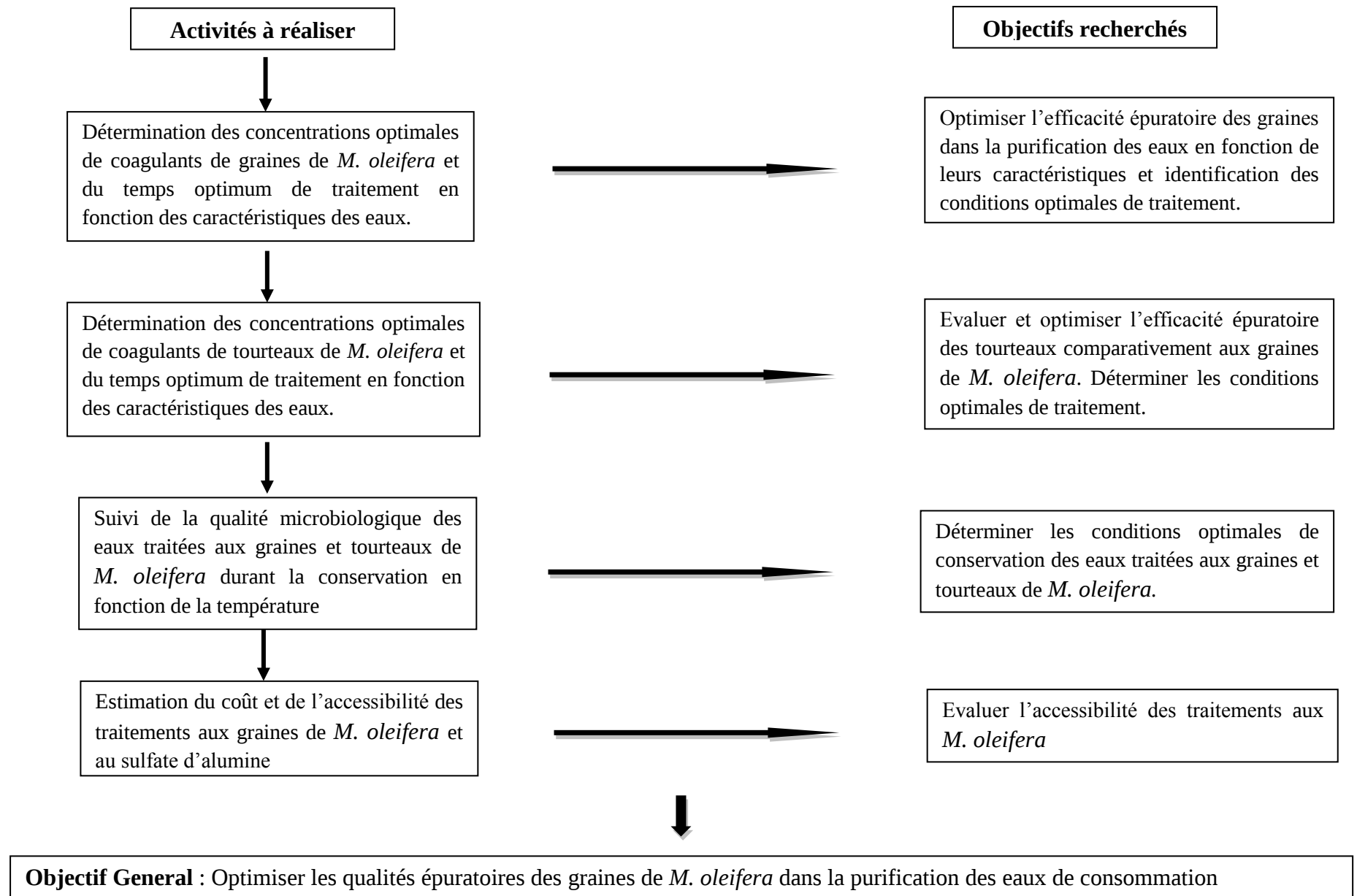


Figure 1 : Schéma de l'organisation scientifique du travail

4. Structure de la thèse

Cette thèse est structurée en 3 grands chapitres encadrés par une introduction et une conclusion générale et des perspectives (figure 2).

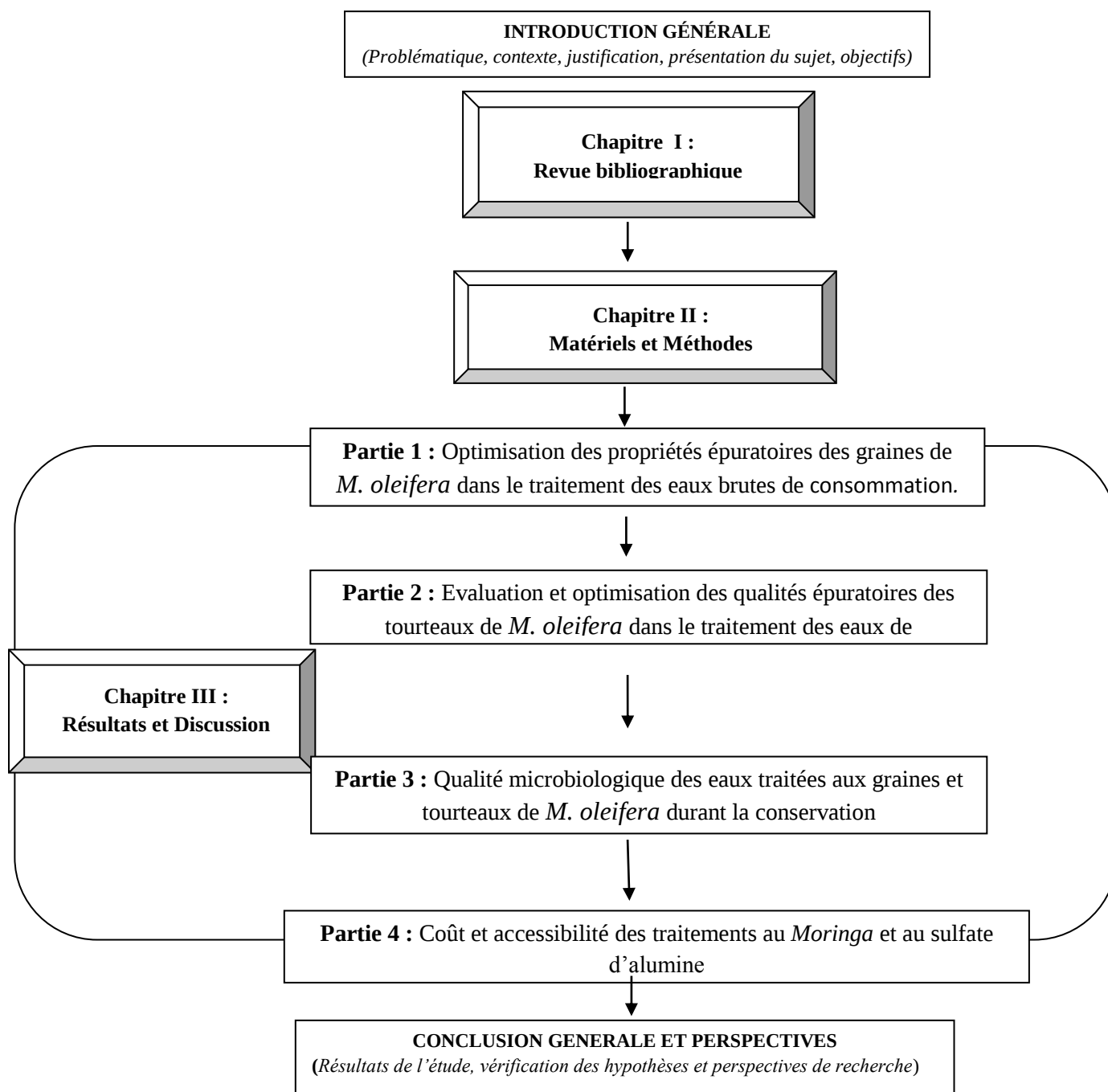


Figure 2 : Structuration de la thèse

En conformité avec la structure de la thèse, le chapitre suivant se consacre à la revue bibliographique. Il sera question dans ce chapitre de faire une synthèse bibliographique en rapport avec le sujet d'étude.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. La problématique de l'accès à l'eau potable

L'eau est une ressource aussi précieuse que vitale et tous les hommes doivent en disposer en quantité et en qualité. On définit une eau potable comme celle qui ne présente aucun risque notable pour la santé d'une personne qui la consommerait durant toute sa vie (OMS, 2004). L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande une consommation de vingt (20) litres d'eau par jour et par individu. Pour F. Mayor, ancien Directeur Général de l'UNESCO, cette ressource rare et essentielle à la vie, doit être considérée comme un trésor naturel faisant partie de l'héritage commun de l'humanité (OMS, 2005). Cependant, environ 15% de la population mondiale soit plus d'un milliard, la plupart dans les Pays En Développement (PED) est privé d'eau potable (Gleick, 2004 ; Villen *et al.*, 2006). En Afrique, ce problème se pose surtout dans la partie subsaharienne où 42 % de la population n'avait pas accès à des systèmes améliorés d'eau de consommation (OMS-UNICEF, 2004). Dans ces PED, l'éloignement des points d'eau des habitations, la qualité insalubre de l'eau, les ruptures de service, les pompes hors d'usage par manque d'entretien, sont autant de difficultés qu'un grand nombre de la population affronte quotidiennement. Pour cela, l'amélioration de l'accès à l'eau potable est très souvent une priorité pour les populations et les autorités locales. Selon les références internationales, l'évaluation de l'accès à l'eau potable s'appuie sur la réalisation des «Points d'Eau Modernes (PEM)», qui par leur aménagement sont protégés de contamination externe en particulier fécale. Cependant, la qualité de l'eau provenant des systèmes améliorés d'approvisionnement est souvent affectée par des manipulations peu fiables et surtout un entretien insuffisant (Sunda, 2012).

II. Les maladies liées à l'eau

La pollution de l'eau constitue un danger pour la santé humaine. Les maladies infectieuses liées à la consommation d'eau insalubre constituent la deuxième cause de mortalité chez les enfants de moins de cinq ans et cause environ 1,5 million de morts chaque année (PNUD, 2006 ; ONU, 2010). Selon l'OMS (2006), ces maladies d'origine hydrique représentent le principal problème de santé publique dans les Pays En Développement (PED) où les populations sont confrontées au manque ou à la détérioration des ressources en eau, à la précarité de l'assainissement ainsi qu'à l'absence de méthodes appropriées de traitement des eaux au niveau familial.

Les pathologies infectieuses liées à l'eau peuvent être d'origine bactérienne, virale, parasitaire. En l'absence d'installations sanitaires adaptées, les microorganismes entériques se

répandent rapidement dans l'environnement par ruissellement, par infiltration ou par contact, affectant ainsi la qualité de l'eau. Ainsi, l'expansion des maladies liées à l'eau est non seulement due à la dégradation de la qualité de l'environnement et au manque d'hygiène, mais aussi à la marginalisation des connaissances et pratiques traditionnelles de traitement et de conservation des eaux. De ce fait l'amélioration des conditions d'hygiène et le traitement approprié de l'eau constitue une mesure efficace de prévention.

III. Qualité de l'eau de boisson

Le contrôle et la lutte contre les maladies hydriques passent par l'accès pour tous à une eau de consommation potable. Une eau potable se définit comme étant celle qui est exempte de germes pathogènes et/ou de substances toxiques (Lanoix et Roy, 1976). En outre, elle doit être limpide, incolore, inodore, de saveur agréable et avoir une valeur de pH autour de sept (7). Ainsi, la potabilité de l'eau s'apprécie selon trois caractéristiques :

- ✓ les caractéristiques organoleptiques : turbidité, odeur, saveur, couleur qui concourent à l'acceptabilité ou au rejet de l'eau de boisson ;
- ✓ la teneur limite d'un certain nombre de substances toxiques ou indésirables ;
- ✓ l'absence de germes pathogènes et d'organismes parasites responsables de maladies.

1. Les paramètres physicochimiques et organoleptiques de l'eau

Les caractères organoleptiques sont un ensemble d'éléments permettant d'apprécier la qualité de l'eau tels que l'odeur, la transparence, la saveur et la couleur. En plus de ces paramètres, une eau de consommation contient beaucoup de substances chimiques dissoutes dont un grand nombre est utile voire indispensable à la santé humaine. Cependant, certaines substances chimiques en nombre restreint posent des problèmes de santé plus ou moins graves.

1.1. La turbidité

La turbidité est l'apparence plus ou moins trouble de l'eau, traduisant la présence de matières en suspension et qui éveille la méfiance et la répugnance du consommateur. La turbidité est d'autant plus élevée que la densité des particules contenues dans l'eau est élevée. Elle est exprimée en Unité Néphélométrique de Turbidité (NTU) (Noisette, 1959 ; Mizier, 2005) et doit être inférieure ou égale à 5 NTU pour les eaux de boisson (OMS, 2011). Le suivi de ce paramètre lors du traitement de l'eau notamment durant la coagulation-floculation, rend compte de l'efficacité de la clarification. En outre, elle donne des indications sur la qualité

microbienne de l'eau du fait de la corrélation qui existe entre la turbidité et les microorganismes, ces derniers étant fixés aux particules en suspension. En effet, la croissance microbienne est particulièrement marquée à la surface des particules et à l'intérieur des floccs présents dans l'eau ou formés lors de la coagulation (Rodier, 2009). Ce phénomène résulte de l'adsorption d'éléments nutritifs aux surfaces permettant ainsi une croissance bactérienne dans l'eau. De plus, la turbidité diminue l'efficacité de la désinfection du fait qu'elle défavorise le contact entre les germes pathogènes et l'agent désinfectant.

1.2. Les Matières En Suspension (MES)

On appelle matières en suspension, les fines particules en suspension qui donnent un aspect trouble à l'eau. Elles peuvent être constituées de matières minérales ou organiques et souvent un mélange des deux (sables, argiles, produits organiques, particules de produits polluants, microorganismes,...). Les matières en suspension représentent la masse de dépôts secs obtenus après une filtration sur une membrane de porosité 0,45µm et s'exprime en mg/l.

1.3. La conductivité

La conductivité mesure l'aptitude de l'eau à conduire le courant électrique. Elle permet d'apprécier la minéralisation globale d'une eau (quantité d'ions en solution) (Van Cu *et al.*, 1961). La mesure de la conductivité donne une bonne appréciation des matières en solution dans l'eau. Sa variation permet de suivre l'évolution d'une pollution chimique. Ainsi, plus l'eau est riche en sels minéraux, plus la conductivité est élevée. La norme fixée par l'OMS pour ce paramètre est de 2000 µs/cm.

1.4. Le pH

Le pH détermine la concentration des ions hydronium $[H_3O^+]$ présents dans l'eau. Sa valeur est donnée par la relation : $pH = - \log [H_3O^+]$. C'est un indicateur de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau et constitue l'un des paramètres opérationnels de la qualité de l'eau. Le suivi du pH permet d'apprécier essentiellement l'effet du traitement sur la qualité organoleptique de l'eau traitée. Les valeurs normales sont comprises entre 6,5 et 8,5. Ainsi, en dessous de pH 6 l'eau est corrosive et au-dessus de 8,5 il y a un risque d'entartrage, de mauvaise efficacité du chlore ainsi que d'irritations oculaires et cutanées. Le pH des eaux varie légèrement en fonction de la température et peut aussi être influencé par des perturbations anthropiques notamment les rejets d'eaux industrielles acides ou basiques (CPEPESC, 2010).

1.5. Calcium, Magnésium et Dureté totale

Les concentrations de sels de calcium et de magnésium sous forme de carbonates et de bicarbonates déterminées dans cette étude ont permis d'évaluer la dureté totale ou Titre Hydrotimétrique (TH) de l'eau. C'est un indicateur de la minéralisation de l'eau. La norme fixée par l'OMS (500 mg/l) est basée sur des considérations gustatives et en relation avec les usages domestiques. Une eau douce contient peu de calcium et de magnésium tandis qu'une eau dure (eau qui contient certains composés minéraux) entraîne une consommation excessive de savon.

1.6. Les Matières Organiques

Les matières organiques contenues dans l'eau représentent la partie non encore décomposée de la pollution organique (matières vivantes, mortes ou déjections d'organismes). Elles sont donc naturellement présentes dans l'eau, mais à faibles concentrations sauf en cas de pollution provenant de rejets d'eaux usées domestiques mal épurées ou d'effluents agricoles. Les matières organiques peuvent se retrouver dans l'eau soit sous forme dissoute, soit sous forme particulaire visible.

Dans cette étude, la détermination des concentrations de matières organiques présentes dans l'eau permettra d'évaluer l'effet du traitement sur ce paramètre (le coagulant étant constitué de matières organiques) et d'interpréter la qualité microbiologique de l'eau durant la conservation. Selon Lautenschlager *et al.*, (2010), l'abondance des bactéries dépend de la quantité de substances nutritives présentes dans l'eau sous forme de carbone organique (sucres, acides aminés, acides organiques, etc.). Le dosage des substances nutritives disponibles est une bonne méthode pour estimer le nombre de bactéries pouvant se développer dans l'eau potable. Ainsi, 0,001 milligramme suffit à nourrir 10^6 cellules bactériennes (Lautenschlager *et al.*, 2010).

1.7. Les nitrates et les nitrites

Les nitrates constituent de nos jours la cause majeure de pollution des grands réservoirs d'eau souterraine du globe (CNRS, 2014). Les ions nitrates (NO_3^-) et nitrites (NO_2^-) présents de façon naturelle dans l'environnement sont le résultat d'une nitrification de l'ion ammonium (NH_4^+) qui est oxydé en nitrites par les bactéries du genre *Nitrosomonas*, puis en nitrates par les bactéries du genre *Nitrobacter* (Santé Canada, 1992 ; CPEPESC, 2010).

Les nitrates, très solubles dans l'eau migrent aisément dans la nappe phréatique lorsque les taux excèdent les besoins de la végétation (Santé Canada, 1992). Sa présence dans

l'eau de consommation est donc principalement attribuable aux activités humaines à travers l'utilisation de fertilisants synthétiques ou de fumiers associés aux cultures et à l'élevage intensif (Santé Canada, 1992 ; Maywald *et al.*, 1988). En outre, les installations septiques déficientes, de même que la décomposition de la matière végétale et animale, peuvent être une source de nitrates dans l'eau (Rosillon *et al.*, 2012a, 2012b). La toxicité des nitrates résulte de leur réduction en nitrites ($NO_3^- + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow NO_2^- + H_2O$) et de la formation de méthémoglobine d'une part, ainsi que de leur contribution possible à la synthèse endogène de composés N-nitrosés d'autre part. Ces derniers sont classés par l'OMS comme cancérigènes. La norme de l'OMS pour les nitrates est de 50 mg/l pour les eaux destinées à la consommation humaine (OMS, 2011).

Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque (la nitrification n'étant pas conduite à son terme), soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante selon la réaction suivante :



L'ion nitrite (NO_2^-) s'oxyde facilement en ion nitrate (NO_3^-) et se retrouve pour cela à faibles concentrations dans les eaux naturelles (de l'ordre de 0,01mg/l). Une eau renfermant des nitrites est à considérer comme suspecte car leur présence est souvent associée à une détérioration de la qualité microbiologique (Rodier, 1996).



La présence des nitrates et des nitrites dans l'eau présente un risque sanitaire et environnemental:

- Ingérés en trop grande quantité, les nitrates ont des effets toxiques sur la santé humaine car des taux élevés en nitrates et nitrites génèrent des risques de méthémoglobinémie chez les nourrissons.

- Par ailleurs, ils contribuent avec les phosphates à modifier l'équilibre biologique des milieux aquatiques en provoquant des phénomènes d'eutrophisation (développement algal très important dans les eaux de surface qui réduit la biodiversité des écosystèmes) (Tapsoba, 2014).

1.8. Les sulfates

L'intérêt de la détermination des concentrations de sulfates est lié au goût amer qu'une concentration élevée de cette substance donne à l'eau rendant ainsi sa consommation désagréable. Les sulfates peuvent aussi se combiner avec le calcium et le magnésium pour avoir un effet laxatif sur le consommateur. La présence des ions sulfates peut être liée à la nature des sols traversés, mais également provenir de rejets industriels divers (HCEFLCD, 2006). La norme OMS pour ce paramètre est de 400 mg/l.

1.9. Les métaux lourds

Certains éléments métalliques et leurs dérivés organiques sont très dangereux car potentiellement toxiques, non-biodégradables et bioaccumulables dans les chaînes alimentaires. Ils sont principalement d'origine industrielle (rejets atmosphériques des incinérateurs de déchets, traitements de surface, métallurgie, chimie...). En outre, si à doses infimes, certains métaux constituent des oligo-éléments indispensables à la santé humaine (fer, zinc...), à doses plus importantes ils deviennent toxiques. On retrouve les métaux dans les eaux sous formes ioniques libres ou incorporés dans des structures moléculaires ainsi que dans des complexes organiques ou inorganiques. Pour un même métal, certaines formes peuvent être plus toxiques que d'autres. Ces substances et leur norme sont : l'aluminium (0,2 mg/l) ; l'arsenic (10 µg/l) ; le chrome (50 µg/l) ; le cuivre (2 mg/l) ; le mercure (1µg/l) ; le plomb (10µg/l) (CPEPESC, 2010).

2. Qualité microbiologique de l'eau de boisson

Les contaminations microbiologiques des eaux sont essentiellement dues aux eaux résiduaires, aux déchets et aux excréments d'animaux et humains insuffisamment traités et/ou rejetés dans de mauvaises conditions dans le milieu naturel. L'analyse bactériologique permettant d'évaluer la pollution fécale de l'eau est un bon moyen pour contrôler l'efficacité des mesures de protection ou de traitement (OMS, 2000).

La présence de microorganismes dans l'eau peut présenter des risques pour la santé humaine (Craun *et al.*, 1997). Il existe trois grandes classes d'organismes pathogènes responsables de maladies hydriques:

- > les bactéries (*Escherichia*, *Salmonella*, *Shigella*, *Vibrio*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Proteus* etc.);
- > les virus (virus de l'hépatite A, norovirus, rotavirus, etc.);
- > les parasites (*Giardia intestinalis*, *Cryptosporidium parvum*, etc.).

Les différents types de microorganismes pathogènes ainsi que les maladies induites sont récapitulés dans le tableau I (Straub et Chandler, 2003).

Tableau I : Principaux groupes et genres d'organismes pathogènes responsables de maladies hydriques (Straub et Chandler, 2003).

Groupe de microorganismes	Agent pathogène	Pathologie
Virus	Entérovirus	Méningite, Diarrhée, problème respiratoire, fièvre
	Virus de l'Hépatite A et E	Infections hépatiques
	Norovirus	Diarrhée/Gastroentérite
	Sapovirus	Diarrhée/Gastroentérite
	Rotavirus	Diarrhée
	Astrovirus	Diarrhée, infection oculaire, problème respiratoire
	Adénovirus	Diarrhée, infection oculaire, problème respiratoire
	Réovirus	problèmes respiratoire et entérique
Bactéries	<i>Salmonella</i>	Fièvre typhoïde, Diarrhée
	<i>Shigella</i>	Diarrhée
	<i>Vibrio cholerae</i>	Diarrhée
	<i>Campylobacter</i>	Diarrhée
	<i>Yersinia enterocolitica</i>	Diarrhée
	<i>E. coli</i> O157 :H7	Diarrhée
Protozoaires	<i>Entamoeba histolytica</i>	Dysenterie amibienne
	<i>Giardia intestinalis</i>	Diarrhée chronique
	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Diarrhée sévère, mortelle chez les individus immunodéprimés
	<i>Cyclospora</i>	Diarrhée
Vers parasites Helminthes	Plathelminthes (<i>Taenia</i> spp, <i>Shistosoma haematobium</i> ,)	Diarrhée, troubles digestifs, douleurs musculaires
	Némathelminthes (<i>Ascaris</i> spp, <i>Trichuris trichuris</i> , <i>Necator americanus</i>)	Diarrhée, troubles digestifs et respiratoires

2.1. Microorganismes indicateurs de contamination fécale

Il est théoriquement et techniquement difficile de contrôler dans l'eau de boisson tous les microorganismes pathogènes susceptibles d'engendrer des infections d'origine hydrique (Sunda, 2012). En effet: i) la recherche de tous les germes pathogènes n'est pas concevable

car d'une part, certains d'entre eux ne sont pas identifiables dans la pratique courante de laboratoire et d'autre part, tous ne sont pas encore connus; ii) les germes pathogènes sont en général présents irrégulièrement dans les eaux de consommation, or il est impossible de les rechercher de façon continue; iii) les délais d'obtention des résultats d'analyses seraient dans un tel cas beaucoup trop longs pour permettre un contrôle efficace de la qualité de l'eau et donc une protection satisfaisante des consommateurs. Ainsi, des indicateurs qui révèlent la présence possible de germes pathogènes ou mieux encore qui confirment leur absence ont été identifiés.

Les microorganismes indicateurs de contamination fécale sont toujours présents en grand nombre dans les matières fécales des hommes et des animaux à sang chaud ; ils se maintiennent plus facilement dans le milieu extérieur et sont clairement identifiés. Leur mise en évidence dans l'eau n'est pas la preuve de la présence de pathogènes, mais elle permet de la suspecter fortement. Ainsi leur présence témoigne de l'existence d'une contamination fécale au moment du prélèvement et permettra de conclure à une pollution d'origine fécale. La suspicion d'une possible contamination par des germes pathogènes donne lieu à une recherche plus approfondie. Divers travaux épidémiologiques ont confirmé que ces germes constituent un indice d'une pollution microbienne de l'eau induisant une augmentation des pathologies gastro-intestinales (Zimrou *et al.*, 1987 ; Potelon et Zysman, 1993 ; Edberg *et al.*, 2000). L'indicateur le plus utile pour estimer la pollution fécale est la bactérie *Escherichia coli* (OMS, 2000). Dans cette étude la qualité microbiologique des eaux a été évaluée sur la présence ou l'absence de cet indicateur comme recommandé par l'OMS.

2.1.1. Les coliformes fécaux

Les coliformes fécaux ou coliformes thermotolérants, sont un sous-groupe des coliformes totaux capables de fermenter le lactose à une température de $44\pm 5^{\circ}\text{C}$. Ces coliformes présentent un grand intérêt car un très grand nombre d'entre eux vivent en abondance dans les intestins des animaux à sang chaud et de ce fait, constituent des indicateurs fécaux de la première importance. *Escherichia coli* est l'espèce la plus fréquemment retrouvée dans ce groupe à côté des *Enterobacter*, des *Klebsiella* et des *Citrobacter*. L'intérêt de la détection de ces coliformes à titre d'organismes indicateurs, réside dans le fait que leur survie dans l'environnement est généralement équivalente à celle des bactéries pathogènes et que leur densité est généralement proportionnelle au degré de pollution produite par les matières fécales (CEAEQ, 2000). Par ailleurs, leur résistance aux

agents antiseptiques, notamment le chlore et ses dérivés, est voisine de la résistance des bactéries pathogènes vis-à-vis desquelles ce type de traitement est instauré. Ils sont aussi de bons indicateurs de l'efficacité du traitement de l'eau, (Santé Canada, 1991 ; Robertson, 1995; Elmund *et al.*, 1999). La présence de coliformes fécaux est une indication de la présence de microorganismes entéropathogènes (Zmirou *et al.*, 1987), comme les salmonelles (Santé Canada, 1991) et le virus de Norwalk (Goodman *et al.*, 1982 ; Craun, 1986). Pour l'Organisation Mondiale de la Santé, une eau potable ne doit pas contenir de coliformes fécaux dans un volume de 100 ml (OMS, 2004 ; 2011).

2.1.2. *Escherichia coli*

Escherichia coli identifié en 1885 par Theodor Escherich, est un membre de la famille des *Enterobacteriaceae* et fait partie du groupe des coliformes fécaux. La bactérie *E. coli* est l'indicateur d'agents entéropathogènes le plus fiable et donc le meilleur moyen de détecter une contamination fécale récente dans les eaux (Leclerc *et al.*, 2001 ; Payment *et al.*, 2003 ; Wade *et al.*, 2003 ; Tallon *et al.*, 2005) sauf dans les climats tropicaux, où elle peut se trouver et se reproduire dans l'eau sans qu'il y ait forcément de pollution fécale (Rivera *et al.*, 1988). La détection d'*E. coli* dans une eau est une indication claire d'une contamination d'origine fécale (Elmund *et al.*, 1999) qui doit faire sérieusement soupçonner la présence d'autres microorganismes pathogènes. La plupart des *E. coli* est inoffensif et assure une fonction utile dans le corps en inhibant la croissance d'espèces de bactéries nuisibles et en produisant des vitamines nécessaires à l'organisme. Toutefois, on a mis en évidence quatre principaux groupes de souches pathogènes de *E. coli*: entéropathogène (EPEC), entérotoxigénique (ETEC), entéroinvasif (EIEC) et entérohémorragique (EHEC) (Bopp *et al.*, 1999 ; Rice, 1999). Le groupe EPEC, habituellement responsable de diarrhées néonatales est associé à une fréquence élevée de mortalité chez les jeunes enfants. Le groupe ETEC comprend des souches qui affectent particulièrement les personnes qui voyagent et boivent de l'eau non traitée. Les souches du groupe EIEC induisent une infection similaire à la dysenterie bactérienne : *Shigella dysenteriae*. Le groupe EHEC comprend notamment le sérotype O157: H7, responsable de diarrhée sanguinolente pouvant entraîner le syndrome hémolytique et urémique (SHU: défaillance rénale aiguë qui se développe chez environ 5 % des patients infectés), principale cause d'insuffisance rénale chez l'enfant et responsable d'un taux de mortalité variant de 0,6 à 5 % chez les personnes atteintes de ce syndrome (Slutsker *et*

al., 1998 ; Dundas et Tood, 2000). *E. coli* O157: H7 peut provoquer une intoxication (Hunter *et al.*, 2003 ; Tallon *et al.*, 2005 ; Hrudehy *et al.*, 2011).

2.1.3. Les entérocoques

Les entérocoques sont en grande partie d'origine humaine. Ils sont considérés comme indicateurs d'une pollution fécale, et leur principal intérêt réside dans le fait qu'ils sont résistants à la dessiccation (OMS, 2000). Ils apportent donc une information supplémentaire sur une pollution. Ce sont des streptocoques possédant la substance antigénique caractéristique du groupe D de Lancefield (*Enterococcus faecalis*, *E. faecium*, *E. durans*, *E. hirae*, *Streptococcus bovis*, *Streptococcus suis* et *Streptococcus equinus*). Ils sont généralement pris globalement en compte comme des témoins de pollution fécale, car tous ont un habitat fécal. La persistance des entérocoques dans la plupart des eaux et leur résistance aux agents désinfectants peuvent être supérieures à celles des autres microorganismes indicateurs. Ceci fait d'eux de bons indicateurs de contamination fécale (GSE, 2002). Simmons *et al.*, (2001) ont ainsi fait état d'une certaine corrélation entre la présence des entérocoques et celle des coliformes fécaux dans une eau de consommation non traitée. De manière plus probante, Charrière *et al.*, (1994) ont démontré que la détection des entérocoques était fortement associée à la présence d'*E. coli* dans les sources. Quant à Zmirou *et al.*, (1987), ils ont mis en évidence un risque accru de développer une gastroentérite avec un nombre relativement restreint des entérocoques (3 à 10 bactéries/100 ml). Une eau potable ne doit pas contenir des entérocoques dans un volume de 100 ml (US EPA, 2000 ; G.S.E, 2002 ; OMS, 2011).

2.2. Les protozoaires

À l'heure actuelle, il n'existe pas d'indicateurs de contamination parasitaire (Payment *et al.*, 1993 ; Gouvernement du Québec, 2001). Cependant, les protozoaires tels que *Cryptosporidium* et *Giardia* sont fréquemment présents dans les eaux de surface sous une forme enkystée résistante, même à la congélation et à la désinfection au chlore (Leclerc *et al.*, 2002). Les *Giardia* et les *Cryptosporidium* peuvent affecter l'homme par l'intermédiaire des eaux de boisson, provoquant des gastroentérites et des dysenteries. *Giardia intestinalis* est un protozoaire qui vit dans l'intestin. La contamination se fait par ingestion de kystes par les mains sales, des aliments ou de l'eau souillés. *Giardia* et *Cryptosporidium* sont les protozoaires les plus incriminés dans les diarrhées infectieuses. Ils sont responsables d'affections opportunistes chez les sujets immunodéprimés dont le nombre croissant fait que

le risque de ces affections émergentes augmente. Ils sont aussi responsables de diarrhées et d'infestations chez les immunocompétents.

IV. Les méthodes de traitement domestique des eaux

L'objectif fondamental du traitement de l'eau est de protéger les consommateurs de microorganismes pathogènes et des impuretés désagréables ou dangereuses pour la santé. L'OMS estime que 94% des épisodes diarrhéiques sont évitables moyennant des modifications de l'environnement, notamment par des interventions destinées à accroître l'offre d'eau salubre et à améliorer l'hygiène et l'assainissement (Gouvernement du Québec, 2001). Pour garantir la qualité de l'eau de boisson, plusieurs méthodes de traitement sont utilisées à domicile.

1. La décantation

La décantation consiste à débarrasser l'eau des matières en suspension en la laissant reposer quelques heures. Cela permet aux matières en suspension et à certains pathogènes de se déposer au fond du récipient sous l'effet de leur propre poids. L'eau retirée dans la partie supérieure du récipient de stockage est ainsi moins contaminée que celle de la partie inférieure. Un stockage inerte de l'eau dans de bonnes conditions d'hygiène pendant une journée permet d'éliminer plus de 50% de la plupart des bactéries. Si le stockage est prolongé, des réductions supplémentaires peuvent être obtenues. Par contre, si les matières en suspension sont très petites (comme des particules d'argile), les performances de la décantation en seront d'autant amoindries. Dans le traitement conventionnel de l'eau, ce procédé suit celui de la coagulation-floculation en permettant de récupérer les floccs préalablement formés.

2. La filtration

Elle permet en faisant passer l'eau à travers un milieu poreux de retenir les éléments solides ainsi que les microorganismes dont la taille est supérieure aux mailles du filtre (une taille en général de l'ordre du nano ou du micromètre). La filtration permet d'améliorer la qualité physicochimique et microbiologique d'une eau. Des filtres simples (filtres bougie céramique, filtres cailloux et sable) sont utilisés au niveau domestique pour éliminer les microorganismes (Rosillon, 2005 ; WSP, 2007 ; CAWST, 2010 ; PSE, 2012,). Cependant, ces filtres n'éliminent pas tous les microorganismes et nécessitent une maintenance attentive. En effet, ceux-ci doivent être régulièrement nettoyés même s'ils ne sont pas colmatés pour

assurer une meilleure qualité de l'eau traitée. Pour éviter autant que possible que l'eau ne passe à travers des fissures, ils doivent être régulièrement inspectés et remplacés (filtres en céramique) (Howard, 2004). En outre, les filtres disponibles sur le marché sont relativement coûteux et les filtres réalisés avec les matériaux disponibles localement sont généralement d'une efficacité limitée dans l'amélioration de la qualité microbiologique de l'eau (WSP, 2007). Pour toutes ces raisons, certains utilisateurs préfèrent combiner la filtration à l'ébullition (Sunda, 2012).

3. La désinfection de l'eau

La désinfection permet d'améliorer uniquement la qualité microbiologique d'une eau en détruisant les germes pathogènes. Parmi les méthodes de désinfection on a principalement la chloration, l'ébullition et l'exposition aux rayons solaires.

3.1. Désinfection par ébullition

La désinfection de l'eau par ébullition consiste à porter l'eau à ébullition pendant quelques minutes. Cette opération inhibe les bactéries, les virus et les protozoaires pathogènes présents dans l'eau (Dewolf, 1986). Le plus grand désavantage de cette méthode réside dans son coût énergétique important qui la rend insoutenable du point de vue économique et environnemental. Dans les milieux ruraux, les paysans trouvent le bois de chauffage dans la brousse. Cette pratique est laborieuse et peut conduire à la déforestation.

3.2. Désinfection par chloration

Le chlore libre est le désinfectant le plus courant, le moins cher et le plus facile à utiliser pour purifier l'eau de boisson. Il est très efficace sur la plupart des germes (sauf *Cryptosporidium spp* et des espèces de *Mycobactéries*). A raison de quelques milligrammes par litre d'eau pendant environ 30 minutes, le chlore libre inactive en général près de 100% des entérobactéries et des virus. Cependant, au contact de la matière organique, il génère des sous-produits, notamment les trihalométhane qui sont cancérigènes (Vogt et Regli, 1981; Morris *et al.*, 1992 ; Wei *et al.*, 1994 ; Gamage et Zhang, 2010). Une étude épidémiologique attribue des malformations cardiaques chez le fœtus à la consommation habituelle d'eau contenant des hydrocarbures organochlorés (Goldberg *et al.*, 1990). Une autre étude réalisée aux Etats-Unis a prouvé que 9% des cancers de la vessie et 15 % des cancers de colon sont dus à la consommation journalière de l'eau de surface chlorée (Morris *et al.*, 1992). Une autre limite à cette méthode est l'approvisionnement difficile en chlore dans les milieux ruraux et la

maîtrise du dosage. En outre, la présence de chlore résiduel dans l'eau traitée donne un goût que n'apprécient pas beaucoup d'utilisateurs.

3.3. Désinfection solaire

La désinfection de l'eau par le soleil (méthode Sodis) est une méthode de traitement simple qui utilise le rayonnement solaire (lumière Ultraviolet A (UV-A) : 320-400 nm et la température) pour détruire les microorganismes présents dans l'eau. Ce traitement n'a pas d'effet sur la qualité physicochimique de l'eau. Son efficacité à éliminer les microorganismes dépend de la température atteinte lors de l'exposition au soleil ainsi que des conditions climatiques et météorologiques (Rosillon, 2005 ; Sunda, 2012 ; EAWAG, 2005). La méthode consiste à placer de l'eau microbiologiquement contaminée dans des récipients transparents et à les exposer en plein soleil durant 6 heures si le ciel est complètement dégagé (Meierhofer et Wegelin, 2002). Si le ciel est nuageux, le temps d'exposition passe de six heures à deux jours. Malheureusement, l'intensité de l'UV-A est sujette à des variations dues aux conditions climatiques et journalières (Meierhofer et Wegelin, 2002, Maiga *et al.*, 2009, Maiga, 2009). Ces variations remettent en cause l'efficacité de cette méthode. En Afrique de l'ouest particulièrement au Burkina Faso, cette méthode pourrait être efficace du fait de la quasi permanence du soleil (Maiga *et al.*, 2009 ; Maiga, 2009).

4. La coagulation-floculation

La coagulation-floculation est de loin le processus le plus largement utilisé pour éliminer la turbidité de l'eau. Ces substances se composent largement de minéraux argileux, d'organismes microscopiques et de débris végétaux. Les matières colloïdales et les impuretés présentes dans l'eau possèdent une certaine stabilité due à la présence de coquilles d'hydrate ou d'un champ électrique autour des particules. Cette stabilité peut être perturbée par le chauffage, la congélation, l'addition d'électrolytes dans l'eau ou par l'application d'un champ magnétique, mais aussi par coagulation des impuretés hydrophiles et hydrophobes (Nikoladze *et al.*, 1989). Le procédé de coagulation-floculation est un traitement primaire qui permet de débarrasser les eaux des impuretés qu'elles contiennent grâce à une réaction d'émulsion. Elle a donc pour but principal de déstabiliser les fines particules en suspension pour ainsi faciliter leur agglomération (Desjardins, 1997). Généralement caractérisé par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques, ce procédé permet d'augmenter substantiellement l'efficacité des traitements secondaires (Desjardins, 1997) notamment la chloration. Cette méthode implique le plus souvent la dispersion instantanée d'un sel métallique trivalent (Al^{III}

ou Fe^{III}) qui neutralise et déstabilise les particules colloïdales pour favoriser la formation de floccs. En neutralisant totalement ou partiellement les charges négatives sur ces particules, les interactions de Van der Waals se retrouvent prédominantes, ce qui permet une agrégation des matières fines en suspension puis leur floculation. De manière générale, on ajoute en premier lieu un agent coagulant et l'on soumet l'eau à certaines conditions de brassage puis un flocculant qui viendra agréger les agrégats déjà formés par le coagulant. L'intensité du brassage est habituellement faible lors du processus de floculation afin que les particules entrent en contact plus facilement. En augmentant la taille des particules, le procédé de floculation accroît le taux de captage des floccs lors de la filtration (Semerjian et Ayoub, 2003). Un coagulant est donc une substance qui provoque l'agglomération des particules fines permettant de former un précipité gélatineux dans l'eau pouvant ensuite être retiré.

Le procédé de coagulation-floculation peut-être employé pour éliminer plusieurs types de substances organiques et inorganiques : les graisses, les huiles, le phosphore, les matières en suspension (MES), les métaux lourds, etc. Il permet donc la réduction de la demande biochimique et chimique en oxygène (DBO et DCO) et également celle des populations bactériennes. Ainsi, il a été constaté que la coagulation-floculation et la sédimentation peuvent éliminer entre 27 et 84% des virus et 32 à 87% des bactéries (USEPA, 1999). Habituellement, les microorganismes pathogènes sont éliminés de l'eau par ce processus du fait qu'ils sont fixés aux matières en suspension.

Une approche spécifique au type d'eau à traiter doit cependant être développée afin d'optimiser le procédé. Les quantités de coagulant requises pour traiter une eau dépendent essentiellement soit du pH, de l'alcalinité, de la concentration en phosphate, soit du point d'injection du coagulant. Ainsi, l'efficacité du procédé de coagulation-floculation repose sur les caractéristiques de l'eau à traiter et les conditions de brassage (EPA, 2000a).

Le choix du bon coagulant dépend essentiellement de deux facteurs: l'efficacité et le coût par rapport aux autres alternatives (Casey, 1997). Comme l'ont relevé certaines études, les coagulants à base de substances chimiques présentent un désavantage important du fait essentiellement de leur toxicité probante pour l'environnement (Ndabigengesere et Narasiah, 1998 ; EPA, 2000a ; Semerjian et Ayoub, 2003). Cela a donc poussé des chercheurs à investiguer la possibilité d'utiliser des composés d'origine naturelle pour réaliser le procédé de coagulation-floculation (Ndabigengesere et Narasiah, 1998).

4.1. La coagulation-floculation chimique

Les principaux coagulants chimiques utilisés sont à base d'aluminium ou de fer. Les principales formes chimiques utilisables et disponibles de ces métaux sont le sulfate d'aluminium (Al_2SO_4) appelé également alun, le sulfate de fer (FeSO_4) et le chlorure de fer (FeCl_3). Ces différents produits sont le plus souvent commercialisés sous forme de cristaux. Il convient de suivre les instructions du fabricant pour appliquer les dosages adéquats en fonction des volumes d'eau à traiter. Une agitation de l'eau pendant plusieurs minutes accélère l'agrégation des particules solides qui peuvent alors décanter.

4.2. La coagulation-floculation naturelle

Historiquement, les coagulants d'origine végétale et animale sont apparus bien avant les coagulants synthétiques comme les sels chimiques (Ndabigengesere et Narasiah, 1998). Cependant, un manque de connaissances scientifiques sur leurs mécanismes de fonctionnement et leur efficacité a ralenti les recherches réalisées sur ces coagulants (Ndabigengesere et Narasiah, 1998). Dans les Pays En Développement, le développement des coagulants naturels s'est poursuivi si bien qu'aujourd'hui les pays développés commencent à s'intéresser à cette alternative (Jahn, 1988a ; Sunda, 2012). La coagulation-floculation naturelle consiste à ajouter une substance d'origine végétale (un réactif coagulant, souvent liquide) à l'eau pour favoriser l'agrégation des particules en suspension soit entre elles, soit avec la substance introduite. Le tableau II présente quelques coagulants naturels (Diallo, 2008).

Tableau II : Quelques coagulants naturels utilisés dans la purification des eaux (Diallo, 2008).

Nature du coagulant	Type de coagulant
Végétale	Graines <i>Moringa oleifera</i> Lam
	Graines <i>Moringa stenopetala</i>
	Résine de l'écorce de <i>Boscia senegalensis</i>
	La sève d' <i>Opuntia</i>
	<i>Ficus indica</i>
	Graines de <i>Strychnos potatornm</i>
	Noyau de <i>Prunus armeniaca</i>
	Sève des feuilles d' <i>Aloe vera</i>
	Racines de <i>Cyrtomium falcatum</i>
	Graines et fruits d' <i>Anamirta paniculata</i>
	Gomme de <i>Cassia angustifolia</i>
	Plantes de la famille des <i>Acanthaceae</i> , <i>Capparidaceae</i> et <i>Papilionaceae</i> ,
	Graines de <i>Cactus latifaria</i>
	Graines de <i>Prosopis juliflora</i>
	Graines d' <i>Okra</i>
	Graines de <i>Nirmalia</i>
Minérale	Argiles

V. Traitement des eaux par coagulation-floculation avec les graines de *M. oleifera*

La fourniture d'eau potable est une entreprise énorme, surtout dans les Pays En Développement. Selon une analyse des coûts relative à des échantillons de projets d'approvisionnement en eau achevés ou en cours financés par la Banque Mondiale dans la région Afrique, le coût unitaire de l'eau potable peut pratiquement doubler et dans certains cas tripler dans le cadre d'un nouveau projet d'adduction d'eau (Sharma *et al.*, 1997). Cette situation laisse présager un avenir difficile pour ces pays qui ne disposent pas de moyens financiers pour approvisionner leurs populations. Il demeure donc indispensable de trouver des systèmes de traitement d'eau adaptés aux conditions de vie des populations. Selon Jahn (1981 et 1988a), la plupart des polyélectrolytes utilisés traditionnellement et très récemment dans le traitement moderne de l'eau dans les Pays En Développement proviennent des plantes. Ainsi, les principales familles de plantes utilisées traditionnellement pour la coagulation-

floculation en Amérique Latine, en Afrique et en Asie ont été répertoriées (Jahn et Dirar, 1979). Parmi ces plantes, la famille des *Moringaceae* a suscité beaucoup d'intérêt du fait de ses propriétés coagulantes et désinfectantes (Grabow *et al.*, 1985 ; Bhole, 1987; Madsen *et al.*, 1987; Sutherland *et al.*, 1989 ; Folkard, 1997).

1. Description de *Moringa oleifera*

Moringa oleifera est un arbre pérenne à croissance rapide, qui peut atteindre 7 à 12 mètres de hauteur et dont le tronc mesure 20 à 40 cm de diamètre (Figure 3). Cet arbre au tronc mince a un feuillage aérien constitué des petites feuilles tripennées. De janvier à juin, il présente des fleurs blanches et jaunes en grappes aux sépales linéaires. L'arbre de *Moringa oleifera* porte continuellement des capsules vertes ou marron selon leur degré de maturité, d'environ 20 à 35 cm de longueur et triangulaire à l'intérieur desquels sont rangées des graines tri-ailées réparties sur 3 rangées. Ces graines sont marron-foncé au centre et blanches au niveau des ailes. Les fleurs et fruits (gousses) sont produits deux fois par an, mais dans de nombreuses régions, la floraison et la fructification se produisent toute l'année. L'arbre a une racine pivotante tubéreuse, dont la présence contribue à expliquer la tolérance des espèces aux conditions de sécheresse (CNRC, 2006).



Règne : Végétal
(non classé): Angiospermes
(non classé) : Eudicots
(non classé): Rosides
Classement: Brassicales
Famille: *Moringaceae*
Genre: *Moringa*
Espèce: *Moringa oleifera*

Figure 3: *Moringa oleifera* (photo Kaboré, 2015)

2. Utilisations de *Moringa oleifera*

Moringa oleifera est la seule espèce de la famille d'arbustes et d'arbres qui soit cultivée dans l'ensemble de la ceinture tropicale (Jahn, 1986). Il appartient à la famille *Moringaceae* et est l'une des 14 espèces connues et utilisées. L'arbre a été décrit comme un arbre à usages multiples pour la vie. Originaire des régions sous-himalayennes du nord-ouest de l'Inde, *Moringa oleifera* est maintenant cultivée dans de nombreux pays d'Afrique,

d'Arabie, d'Asie du Sud-Est, du Pacifique, des îles des Caraïbes et d'Amérique du Sud. Communément connu sous le nom de l'arbre "raifort" (découlant de la saveur d'un condiment préparé à partir des racines) ou arbre «pilon» (résultant de la forme des gousses), *Moringa oleifera* a divers autres noms vernaculaires spécifiques à chaque pays, ce qui constitue une indication de l'importance de l'arbre dans le monde entier. Au Burkina Faso, il est appelé Arjanayiri (en Dioula), Arzantiiga (en mooré), legi-lakii (en fulfulde).

2.1. Utilisation dans l'alimentation

Moringa oleifera a ces derniers temps été préconisé comme une source indigène de protéines hautement digestibles et appropriés pour une utilisation dans la plupart des pays en développement où la malnutrition est une préoccupation majeure. Les feuilles de *Moringa* contiennent également une quantité diététiquement utile de vitamines (A, C et B1) et de minéraux (Fer, Calcium et Potassium). Les autorités sanitaires de plusieurs pays d'Afrique et d'Asie du Sud encouragent l'utilisation du *Moringa* comme complément alimentaire (Anwar *et al.*, 2007). Les graines sont consommées vertes, torréfiées, en poudre ou utilisées dans les « currys ».

2.2. Utilisation dans la pharmacopée

Moringa oleifera a également trouvé des applications en médecine. La gomme blanche exsudée du tronc mélangée à de l'eau est utilisée contre la dysenterie et comme diurétique. Les fleurs peuvent être employées contre l'asthme. Les racines contiennent des antibiotiques. L'écorce est indiquée comme médicament pour lutter contre l'épilepsie, l'hystérie, la paralysie, les douleurs aiguës et la migraine (Belem *et al.*, 2003).

2.3. Utilisation dans la cosmétique

Les graines de *Moringa oleifera* contiennent une huile jaune claire (15 à 35% du poids sec, 70% d'acide oléique), inodore et de saveur douce qui a la particularité de ne pas trop rancir et d'être très fluide une fois raffinée. Cette huile de *Moringa* est utilisable dans l'alimentation et en cosmétique. Elle peut être estérifiée avec un alcool pour produire un biocarburant (Rashid *et al.*, 2008).

3. Composition des graines de *Moringa oleifera*

Des études se sont portées sur la caractérisation biochimique des graines de *Moringa oleifera* (Ndabigengesere *et al.*, 1995). Les différents constituants biochimiques sont présentés dans le tableau III.

Tableau III : Composition des graines de *Moringa oleifera* /100g (Ndabigengesere *et al.*,1995)

Substance chimique	Quantité (g)
Eau	4,08
Protéine	36,7
Matière grasse	34,6
Fibre	3,5
Cendre	3,2
Glucide	5

Outre ces éléments, il a été identifié dans les graines de *Moringa oleifera* un polypeptide dénommé « flo » possédant des propriétés coagulantes et antibactériennes. Elle est constituée de 60 acides aminés qui sont principalement : l'acide glutamique, la proline, la méthionine et l'arginine (Fisch, 2004). Cette protéine de 6 KDa contient 13,1% d'acides aminés chargés positivement (arginine, histidine) et 1,6% de résidus chargés négativement (acide aspartique). Par conséquent, la protéine « flo » en solution est fortement chargée positivement (Broin *et al.*, 2002). Il a également proposé que le mécanisme de coagulation repose essentiellement sur le mécanisme de charge de patch qui est une description des principaux effets de polyélectrolytes cationiques fortement chargés et que la protéine active est également très riche en glutamine. La densité élevée de résidus de glutamine pourrait favoriser la formation de floes par l'intermédiaire des liaisons hydrogène entre les particules de protéines de revêtement (Broin *et al.*, 2002). Eilert *et al.*, (1981) ont identifié un agent antimicrobien actif (4 α -4-rhamnouslyloxy-benzyl-isothiocynate) dans les graines.



Figure 4 : Fruits (a) et Graines (b) de *Moringa oleifera* (photo Kaboré, 2015)

4. Application de *Moringa oleifera* dans le traitement de l'eau

Moringa oleifera, originaire du nord de l'Inde a été importé en Afrique par les émigrants et est désormais largement présent sous les latitudes tropicales grâce à sa très bonne résistance à la sécheresse. Les graines issues de l'arbre constituent un coagulant efficace. Traditionnellement, certaines populations de la corne de l'Afrique (Soudan par exemple) utilisent la poudre de la graine de *Moringa* pour purifier à domicile l'eau des rivières. Ainsi, les graines de *Moringa oleifera* utilisées seules ou avec l'alun représente une solution viable et peu coûteuse dans la purification des eaux dans les Pays En Développement. Plusieurs études ont montré que les graines de *Moringa oleifera* sont capables de réduire la turbidité des eaux troubles de 80 à 99% (Jahn et Dirar, 1979 ; Ndabigengesere *et al.*, 1995 ; Muyibi et Evison, 1996 ; Okuda *et al.*, 1999) et ce traitement s'accompagne d'une élimination de 98 à 99% des bactéries indicatrices de pollution (Jahn, 1984). L'agent coagulant contenu dans les graines de *Moringa oleifera* est un polypeptide basique capable de neutraliser les colloïdes des eaux troubles grâce à la formation de ponts (Jahn, 1988a; Foidl *et al.*, 2002). Folkard (1997) a obtenu des résultats concluants au Malawi avec des installations complètes de traitement de l'eau à base de produits naturels où l'utilisation des graines de *Moringa oleifera* a permis de réduire la turbidité de l'eau de près de 80%. De plus, le flocculant n'affecte pas le pH et diminue le taux de fer et de manganèse (Folkard, 1997). Toutefois, l'extrait aqueux des graines augmente la quantité de matières organiques dans l'eau traitée et affecte certains paramètres organoleptiques (goût, odeur, couleur). Actuellement, l'utilisation du *Moringa* dans la réduction des concentrations de nitrates dans l'eau de boisson et le traitement des eaux de puits est peu documentée (Mustapha, 2013).

Ces points constituent une des préoccupations de la présente étude qui se propose d'étudier l'effet du traitement sur certaines substances minérales d'impact sanitaire tel que les nitrates et les nitrites afin de proposer une alternative pour résoudre les problèmes sanitaires y relatifs.

Le chapitre suivant définit le cadre et la méthodologie sur lesquels sera adossé ce travail de recherche.

CHAPITRE II

MATERIEL ET METHODES

La présente étude a consisté à définir les conditions optimales (concentrations de coagulant et temps de décantation) de traitement des eaux brutes de consommation avec des graines de *Moringa oleifera* en fonction de leurs caractéristiques initiales, à évaluer l'efficacité des tourteaux de *Moringa oleifera* comparativement aux graines non délipidées dans la purification de ces eaux et à déterminer les conditions optimales de conservation des eaux traitées. Les expérimentations ont été conduites au laboratoire d'analyse des eaux de l'ONEA et au laboratoire d'analyses biomédicales de l'IRSS/CNRST à Ouagadougou.

Ce chapitre présente la justification du choix des méthodes et la description détaillée de leur mise en œuvre.

I. Présentation du cadre et sites d'étude

Le Burkina Faso est partagé essentiellement entre quatre (4) grands bassins-versants: le bassin du fleuve Niger, le bassin du fleuve Nakambé (ancienne Volta Blanche), le bassin du fleuve Mouhoun (ancienne Volta Noire) et le bassin de la Comoé (Figure 5). Les eaux de bassin des fleuves Nakambé et Mouhoun alimentant des populations ont été utilisées pour la présente étude (Figure 5).



Figure 5: Situation des Bassins versants nationaux du Burkina Faso (MOOC-DD, 2014)

★ Bassin versant de la Comoé, du Mouhoun et du Nakambé.

Le Nakambé est un des cours d'eau les plus importants du pays. Il revêt le bassin le plus peuplé. Plus de quatre (4) millions d'habitants du pays vivent au dépend du bassin du Nakambé. Le Nakambé prend naissance au Nord de Titao sur un plateau de faible altitude et traverse le pays pour ensuite pénétrer au Ghana où il alimente le réservoir du grand barrage d'Akosombo. Le bassin du Nakambé a fait l'objet d'un aménagement ayant comme finalité l'irrigation de 74000 ha et la production d'électricité (Nacro, 2010). La ville de Ouagadougou est presque entièrement tributaire des eaux de surface de ce bassin. Trois barrages appartenant à ce bassin ont été concernés par l'étude. Il s'agit des barrages N°3 de Ouagadougou (Ouaga 3), de Ziga et de Loumbila (Figures 6 et 7).

Réalisés dans les années 1960, les barrages 1, 2 et 3 ont été construits pour approvisionner la ville de Ouagadougou en eau (Figure 6). Le barrage n°3 de Ouagadougou constitue l'un des poumons écologiques de la capitale burkinabè. C'est un ouvrage de 353 km² de superficie, ayant une capacité de rétention d'eau de 6,13.10⁶ m³. Il est situé entre le Mercure Hôtel, ex Hôtel Silmandé et le CHU/Yalgado Ouédraogo (Latitude Nord: 12°23' ; 26°6". et Longitude Ouest: 01°30'; 34°6") (Figure 6). Il est précédé en amont par une succession des barrages Ouaga n°1 et Ouaga n°2. Ce barrage approvisionne la population de la ville de Ouagadougou en eau potable, et il sert aussi à différentes activités récréatives des populations riveraines. Plusieurs activités sont menées à proximité des trois barrages : pisciculture, cultures maraîchères, lavage de mobylettes à l'aide de motopompe, etc. (Nitiéma *et al.*, 2013).



Figure 6 : Localisation du site d'étude dans la ville de Ouagadougou (Source fond de carte : Sawadogo *et al.*, 2014). Site d'étude*.

Le barrage de Loumbila se situe à une quinzaine de km au Nord-Est de Ouagadougou. De façon précise il se situe à la longitude 01° 24'W et la latitude 12° 33'N (Figure 7). Ce barrage est construit dans le lit du Massili qui est un affluent du Nakambé. Sa superficie en pleine eau est de 16,8 km², pour une profondeur moyenne de 2,15 m. La capacité du réservoir de ce barrage est de 42,2 millions de m³. La vocation principale du réservoir demeure également l'approvisionnement en eau de la ville de Ouagadougou. Toutefois de nombreux maraîchers exploitent ses rives et la pêche y représente une activité bien établie. Ce barrage sert aussi de source d'approvisionnement en eau de boisson pour les populations riveraines.

Le barrage de Ziga est situé dans le département de Nagréongo dans la province d'Oubritenga à environ une cinquantaine de kilomètres au Nord-Est de Ouagadougou. Ces coordonnées sont en latitude : 12°29'21.44''N et en longitude : 1°7'25.84''O. La hauteur maximale du barrage est de 18,8 m et la longueur de la digue de 3154 m (MOZ, 2005). La capacité du réservoir est de 207 millions de m³. Le barrage de Ziga est prévu pour approvisionner en eau potable la ville de Ouagadougou au moins jusqu'en 2025. Celle-ci en effet, est presque entièrement tributaire des eaux de surface de ce barrage (MAHRH, 2001). Il en est de même pour une grande proportion des populations riveraines, qui s'y rendent pour s'approvisionner en eau destinée à la consommation et aux activités domestiques (Ouattara *et al.*, 2012).

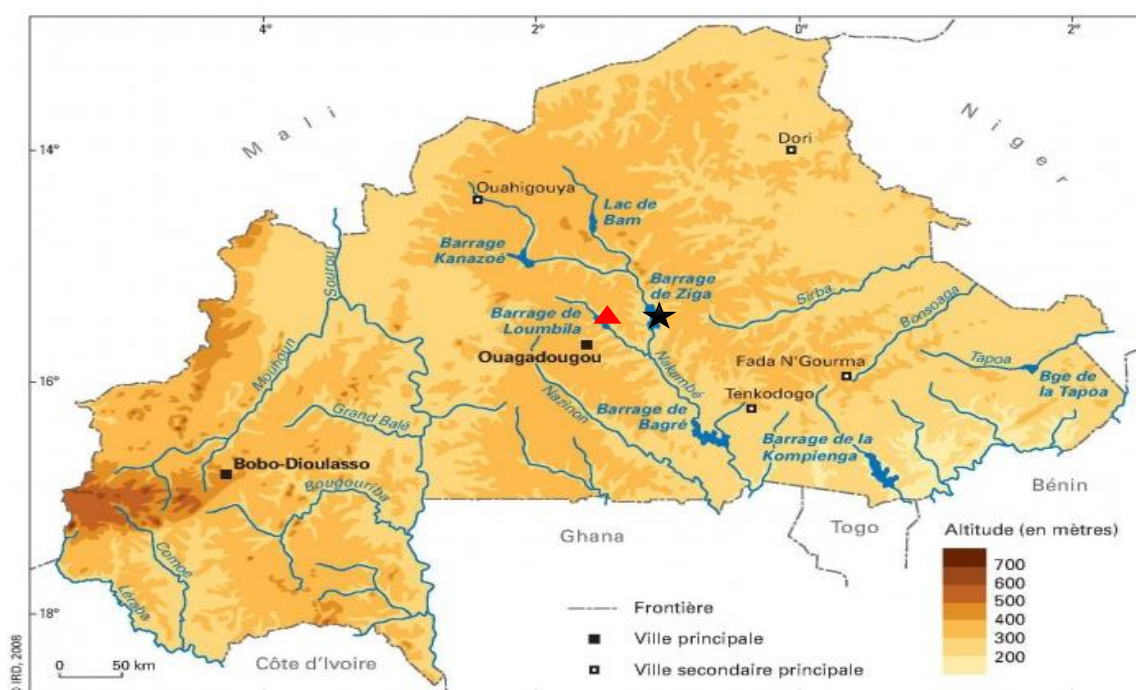


Figure 7 : Localisations des sites de Loumbila ▲ et de Ziga ★ dans le bassin versant du Nakambé

Le Mouhoun est également un des plus grands fleuves du Burkina Faso. Il dessert pratiquement toute la région Nord-Ouest du pays. La rivière Sourou est un affluent du Mouhoun encore appelé Volta Noire. Dans ce bassin, ce sont la rivière Gana et le puits busé à grand diamètre de Boaré situés dans la vallée du Sourou (Figure 8) qui ont été concernés par l'étude.

La rivière Gana (affluent Dédé) est un cours d'eau servant principalement à l'abreuvement d'animaux, eau de boisson humaine, aux activités domestiques et récréatives (Dianou *et al.*, 2011). Quant au puits busé à grand diamètre de Boaré (Bouaré), il est situé dans ledit village et alimente les écoliers (le forage étant souvent en panne) et la population en eau de boisson (Figure 8).

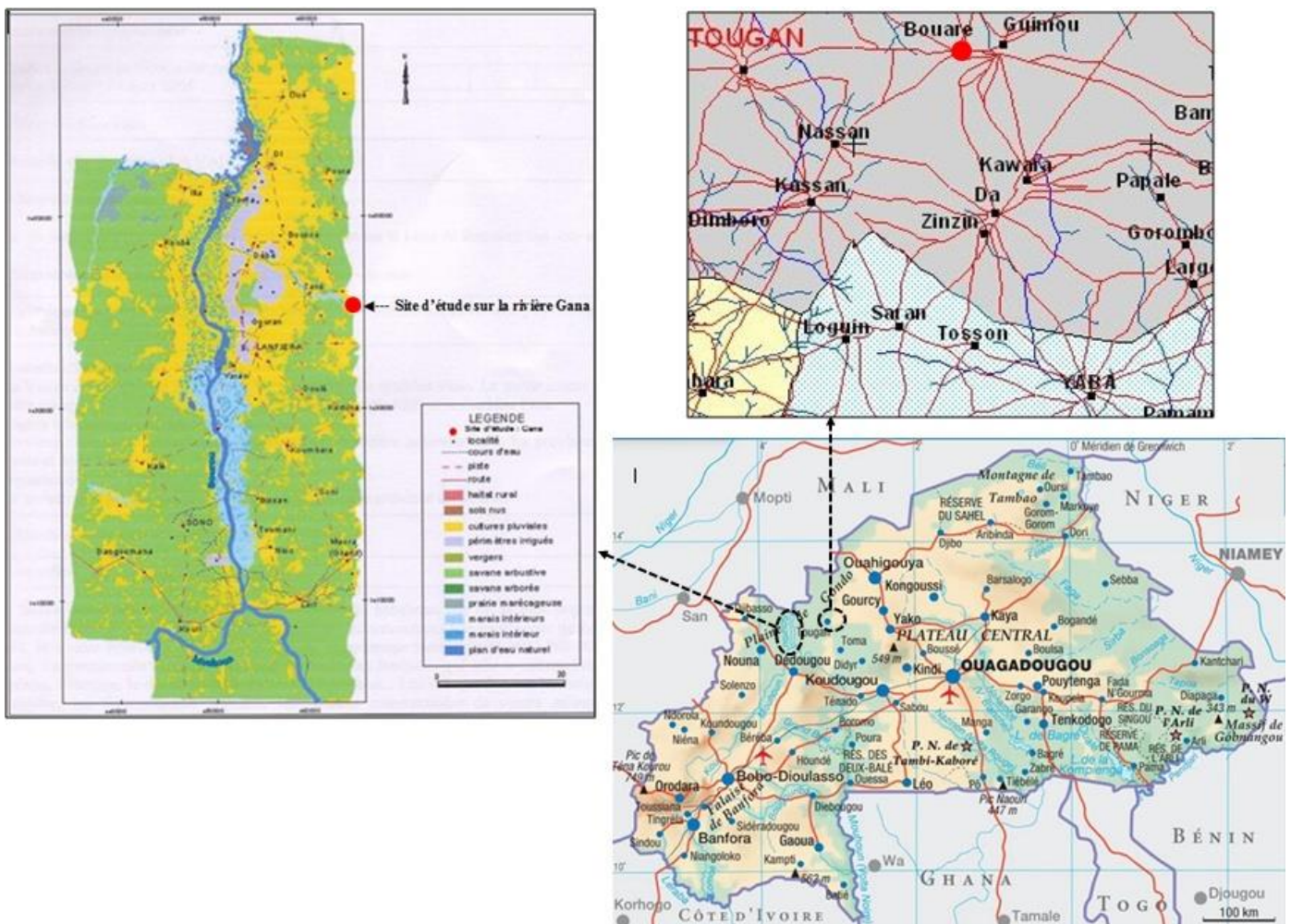


Figure 8 : Localisation du site d'échantillonnage d'eau de surface : sur la rivière Gana et du puits de Boaré/Bouaré dans la Vallée du Sourou (bassin du fleuve Mouhoun).

● Site d'échantillonnage

Les investigations sur la qualité des eaux souterraines et de surface menées ces dernières années dans les bassins des fleuves Nakambé et Mouhoun au Burkina Faso ont révélé une pollution très prononcée des eaux de surface et de puits (Dianou *et al.*, 2004 et 2011 ; Poda *et al.*, 2006; Somé *et al.*, 2008; Lamizana *et al.*, 2008; Savadogo *et al.*, 2013 ; Nitiéma *et al.*, 2013). L'intensification continue de l'utilisation de ces eaux pour différents usages y compris comme source d'eau de boisson (Figure 9) ont motivé notre choix pour les sites indexés dans l'objectif de contribuer à améliorer la qualité des eaux de boissons de ces populations.



Figure 9: Quelques usages de l'eau sur les sites d'échantillonnage : (a) abreuvement d'animaux et (b) approvisionnement en eau de boisson au niveau du site d'échantillonnage du Gana¹; approvisionnement en eau de boisson à (c) Ziga; (d) Boaré² et (e) Loumbila.

Sources: ¹Dianou *et al.*, (2011) ; ²Savadogo *et al.*, (2013).

II. Echantillonnage des points d'eau

Trois campagnes de prélèvement ont été réalisées pour cette étude, respectivement en Novembre 2011 (fin de la saison pluvieuse), Janvier 2012 (saison sèche) et juin 2013 (début de saison pluvieuse). Ces périodes tiennent compte de la saison qui influe sur la qualité de l'eau (Dianou *et al.*, 2011). Un total de 240 échantillons d'eau provenant des barrages N° 3 de la ville de Ouagadougou (Ouaga 3), de Loumbila et de Ziga, ainsi que de la rivière Gana et du puits de Boaré ont été utilisés. Sur chaque site, les échantillons d'eau ont été prélevés en triplicata selon les normes **ISO 5667-1 et ISO 5667-2** (2007), conservés et transportés au laboratoire conformément à la norme française **NF EN ISO 5667-3** (2004). Les échantillons d'eau de 2 litres et 500 ml ont été prélevés dans des flacons stériles, étiquetés puis conservés à 4°C dans des glacières et transportés au laboratoire pour les différents traitements et analyses.

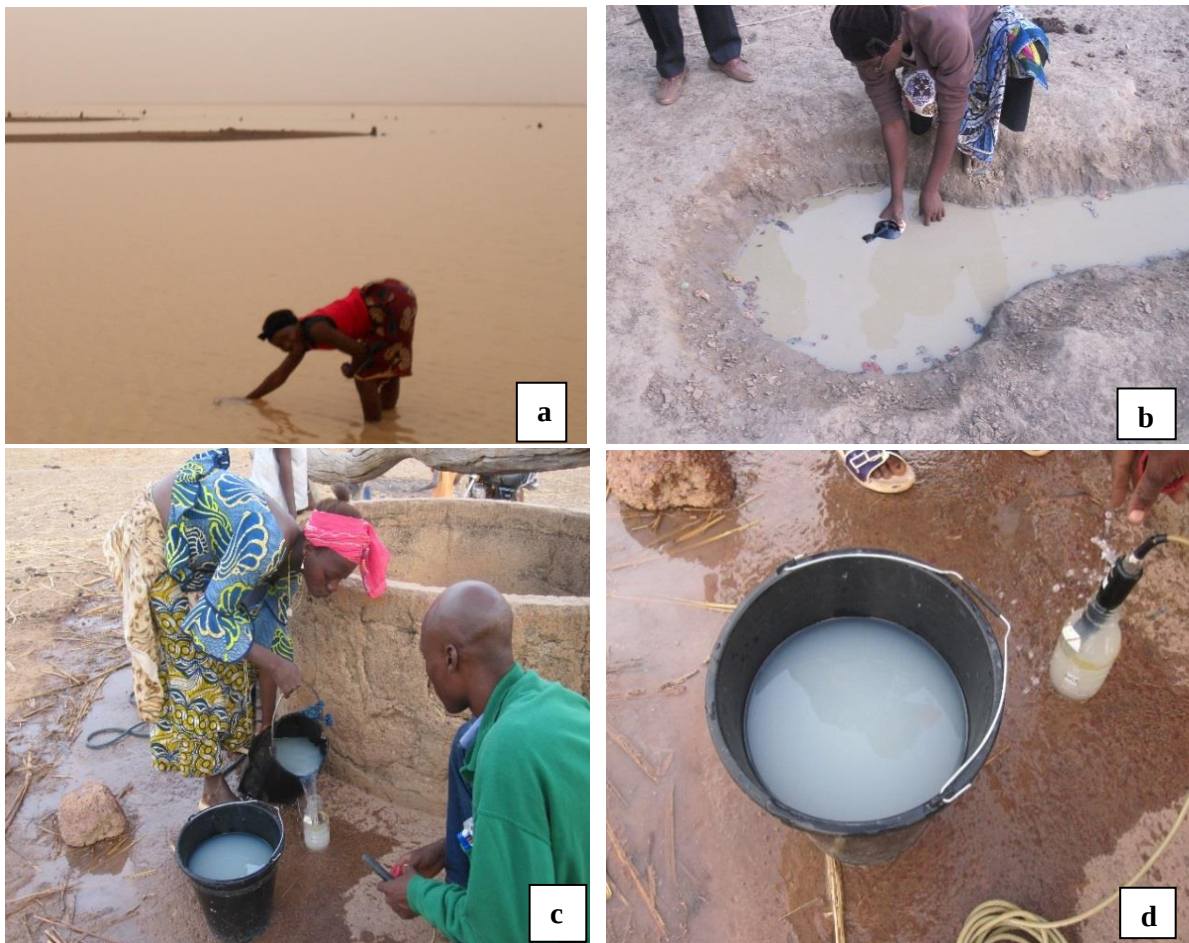


Figure 10 : Echantillonnage de l'eau à Ziga (a), Gana (b) et Boaré (c et d) (Photo : Dianou *et al.*, 2011 ; Kaboré *et al.*, 2013).

III. Optimisation des propriétés épuratoires des graines de *Moringa oleifera*

1. Préparation des coagulants de graines

Des graines mûres et sèches de *Moringa oleifera* de trois (3) mois obtenues au Centre National de Semences Forestières (CNSF) ont été triées et décortiquées pour obtenir des amandes blanches qui ont été broyées dans un mortier en bois (préalablement lavé et séché). Cette méthode de broyage (pilon/mortier) a été utilisée au dépend d'un broyeur électrique pour éviter un colmatage dû à la quantité importante de matières grasses que renferment les graines. La poudre obtenue a été tamisée régulièrement au fur et à mesure que l'on pile de sorte à éviter le colmatage. La farine obtenue a été tamisée avec un tamis de 0,5 mm de diamètre afin d'obtenir une poudre fine et homogène (Folkard et Sutherland, 2002) qui a servi à la préparation des différents coagulants. Des solutions de coagulant de 20 g/l et 100 g/l ont été utilisées pour traiter les échantillons d'eau suivant le protocole décrit par Faby et Eleli (1993). Pour la préparation de ces différents coagulants, 20 g et 50 g de poudre ont été dilués respectivement dans 1 litre et 0,5 litre d'eau distillée stérile. La solution obtenue a été agitée durant une heure afin d'extraire les protéines actives, puis conservée au réfrigérateur à 4°C. La conservation à froid empêche l'altération des protéines actives. Les coagulants de concentration 20 g/l ont été utilisés pour traiter les eaux brutes qui ne sont pas très chargées, tandis que les eaux très chargées ont été traitées avec des solutions de 100 g/l de concentration (Faby et Eleli, 1993).

2. Détermination des paramètres physicochimiques des coagulants de graines de *Moringa oleifera*

Des paramètres physicochimiques des coagulants de graines de *Moringa oleifera* ont été déterminés afin de mieux comprendre et interpréter l'évolution de la qualité physicochimique de l'eau traitée. Ces paramètres physicochimiques sont : les nitrates, nitrites, calcium, magnésium, dureté totale, sulfates et matières organiques.

Les concentrations de sulfates, nitrates et nitrites ont été dosées par spectrophotométrie suivant la méthode **8051, 8039, 8507** du manuel d'utilisation du spectrophotomètre DR 3800 respectivement pour les sulfates, nitrates et nitrites. Les concentrations de calcium, magnésium et la dureté totale ont été déterminées par titrimétrie selon les normes françaises, **NF T 90-016 : 1984** pour le calcium-magnésium et **NF T 90-003 : 1984** pour la dureté totale.

3. Essais d'optimisation du pouvoir clarifiant des graines de *Moringa oleifera*

Des essais de clarification en jar test des échantillons d'eaux brutes ont été effectués au laboratoire de la station de traitement de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) afin d'estimer les doses optimales de coagulant de *Moringa* ainsi que le temps de décantation optimum en fonction des caractéristiques des eaux. Le jar test consiste à appliquer des phases de coagulation-floculation-décantation répétées et identiques sur tous les échantillons d'eaux pour des concentrations différentes de coagulants. Ces jars tests ont été réalisés à l'aide d'un flocculateur à commande électrique possédant six postes (FC6S Velp Scientifica Jar-Test) (Figure 11).

Lors du traitement des eaux, des volumes croissants de coagulants (2,5 ml-5 ml) ont été introduits dans des béchers contenant chacun 500 ml d'échantillon d'eau pendant une phase d'agitation rapide (150 tr/min) qui a duré entre 2 à 5 min suivie d'une agitation modérée (45tr/min) pendant 10 à 15 min suivant les caractéristiques de l'eau. La phase rapide consiste à disperser le coagulant partout dans l'échantillon d'eau de manière rapide et uniforme (Mhaisalkar *et al.*, 1986). La phase lente résulte en l'agglomération des petites particules pour former des gros flocons qui peuvent décanter rapidement sous l'effet de leurs poids moléculaires (Treguer *et al.*, 2005). Les différents traitements ont été réalisés en triple pour chaque concentration de coagulant testée. Les concentrations de coagulant ont été calculées suivant la relation :

$$C = \frac{C1.V1}{V}$$

C1 : Concentration de la solution mère préparée (20 g/l ou 100 g/l)

V1 : Volume de coagulant prélevé pour le traitement

C : Concentration dans l'échantillon traité

V : Volume de l'échantillon d'eau



Figure 11 : Flocculateur FC6S Velp Scientifica Jar-Test : Essai de clarification en jar test des échantillons d'eau (Photo Kaboré, 2013).

Outre les concentrations de coagulants, plusieurs temps de décantation (15 min, 30 min, 1 h, 1 h-30 min et 2 h) ont été testés durant les traitements afin de déterminer les temps optimums de décantation selon les échantillons. La turbidité et le pH des eaux ont été suivis à différents temps de décantation et pour différentes concentrations de coagulants.

IV. Effets des traitements aux graines de *Moringa oleifera* sur les paramètres physicochimiques et microbiologiques des eaux

1. Détermination des paramètres physicochimiques et organoleptiques des eaux traitées aux graines de *Moringa oleifera*

Des paramètres physicochimiques et organoleptiques (turbidité, pH, nitrates, nitrites, calcium, magnésium, dureté totale, sulfates, matières organiques et matières en suspension) ont été suivis avant et après les traitements aux graines de *Moringa oleifera*. Ce choix prend en compte les principaux paramètres d'impact sanitaire et d'acceptabilité de l'eau de boisson.

1.1. Mesure de la turbidité et du pH

La turbidité des eaux a été mesurée avec un turbidimètre de laboratoire WTW Turb 550 IR conformément à la norme française **NF ISO 7027** (2000).

Quant au pH, il a été mesuré suivant la méthode électrochimique à l'aide d'un pH-mètre/thermomètre (330i WTW) équipé d'une électrode combinée Sen Tix 41 conformément à la méthode **10523** (1994).

1.2. Détermination des nitrates, nitrites et sulfates

Les concentrations de sulfates ont été dosées par spectrophotométrie avec un spectrophotomètre Lange Hach DR 3800 suivant la méthode 8051 du manuel d'utilisation du spectrophotomètre DR 3800. Le protocole consiste à introduire dans deux (2) tubes, 25 ml de chaque échantillon dont le premier tube servira pour la lecture du blanc. Au contenu du deuxième tube on rajoute un sachet de sulfaver (réactif). Après agitation, les échantillons sont incubés à l'obscurité pendant 5 min avant la lecture au spectrophotomètre à 650 nm.

Le dosage des nitrates dans les eaux a également été réalisé par spectrophotométrie d'absorption moléculaire suivant le même protocole précédemment décrit (méthode **ISO 7890-3 : 1988**). La lecture a été faite après cinq (5) minutes d'incubation avec le nitrover (réactif spécifique) à l'aide d'un spectrophotomètre DR 3800. L'absorbance a été lue à 355 nm. La valeur est exprimée en mg/l de NO_3^- .

Tout comme les nitrates, les concentrations de nitrites ont été également déterminées par spectrophotométrie d'absorption moléculaire suivant la méthode **ISO 6777: 1984**. La lecture a été faite après vingt (20) minutes d'incubation avec le nitriver (réactif spécifique aux nitrites) à l'aide d'un spectrophotomètre DR 3800. L'absorbance a été lue à 371 nm. La valeur est exprimée en mg/l de NO_2^- .

1.3. Détermination des concentrations de calcium, magnésium et la dureté totale

Les concentrations de calcium, magnésium et la dureté totale ont été déterminées par titrimétrie selon les normes françaises, **NF T 90-016 : 1984** pour le calcium-magnésium et **NF T 90-003 : 1984** pour la dureté totale. Le titrage molaire des ions calcium et magnésium a été fait avec une solution de sel sodique et d'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA) à pH 10. L'acide calcone carboxylique, qui forme un complexe rouge avec le calcium a été utilisé comme indicateur. Le magnésium est alors précipité sous forme d'hydroxyde et n'interfère pas lors du dosage. La concentration en calcium $[\text{Ca}^{++}]$, exprimée en milligrammes par litre, est donnée par la formule :

$$[\text{Ca}^{++}] = 40,08 \times 1000 \times \frac{c \times V_1}{V_2}$$

Où : c représente la concentration en moles par litre de la solution d'EDTA, V_1 le volume en millilitres de la solution d'EDTA utilisée pour le titrage, V_2 le volume en millilitres de l'échantillon dosé (en général 50 ml).

La concentration en magnésium $[Mg^{++}]$, exprimée en milligrammes par litre, est donnée par la formule : $[Mg^{++}] = [Ca^{++} + Mg^{++}] - [Ca^{++}] \times 24,31$, où $[Ca^{++} + Mg^{++}]$ et $[Ca^{++}]$ sont exprimés en mmol/l et 24,31 est la masse molaire de magnésium.

La dureté totale (concentration totale en calcium et magnésium) en degrés français peut être calculée par la formule : $10 \times C$, C étant la concentration totale en calcium et magnésium en mmol/l. Les résultats sont exprimés en mmol/l à 0,02 mmol/l près ou en degrés de dureté français à 0,2 °F près.

1.4. Détermination des concentrations de matières organiques dans les eaux traitées

La matière organique a été déterminée par la méthode de calcination. Pour cela, 100 ml d'eau ont été filtrés et calcinés respectivement à 150 et 550°C pendant 1 heure dans un four de marque Optima.

2. Détermination des paramètres bactériologiques et parasitologiques des eaux traitées aux graines de *Moringa oleifera*

2. 1. Analyse bactériologique

Les techniques d'isolement et de dénombrement des bactéries basées sur la capacité de ces derniers à se multiplier sur des milieux de culture spécifiques sont un moyen largement utilisé pour évaluer la qualité bactériologique de l'eau.

Les indicateurs bactériologiques (*Escherichia coli*, coliformes fécaux, entérocoques) et parasitologiques (formes végétatives et kystes de parasites intestinaux) de pollution fécale des eaux ont été déterminés sur tous les échantillons avant et après traitement. Les coliformes fécaux, *E. coli* et les enterocoques ont été déterminés suivant la méthode de filtration sur membrane et étalement sur des milieux de culture spécifiques suivant la norme française **NF EN ISO 9308-1** (2000). Le protocole a consisté en une filtration sur membrane de 100 ml d'échantillon, suivie d'une mise en culture sur une gélose de différenciation et du dénombrement des organismes cibles présents dans l'échantillon. Le milieu Rapid*E.coli* a été utilisé pour isoler et dénombrer *E. coli* et les coliformes fécaux et le milieu Bile Esculine Azide pour les entérocoques.

2.1.1. Préparation des échantillons et ensemencement

La préparation de l'échantillon, la filtration et l'ensemencement sur les milieux d'isolement spécifiques ont été faits suivant la norme **ISO 8199** (2008). Après prélèvement,

les échantillons d'eau ont été transportés au laboratoire dans des glacières thermostatées contenant de la glace et analysés immédiatement. Dans certaines circonstances exceptionnelles, les échantillons sont conservés à 4°C pendant une durée maximale de 24 heures avant l'analyse.

La préparation des milieux de culture a été faite selon la norme **ISO 8199** (2008). Les milieux gélifiés déshydratés Rapid*E.coli* 2 Agar 356-4024, lot/Ch.-B. : 2B0141 (BIO RAD) et Bile Esculine Azide **ISO 7899-2**, lot : VM356772 205 (MERCK KGaA) ont été préparées conformément aux instructions du fabricant. Des quantités appropriées de milieux déshydratés ont été pesées puis dissoutes dans de l'eau distillé. Les milieux ainsi préparés ont été autoclavés et coulés dans des boîtes de Pétri sous une hotte stérile.

En ce qui concerne l'isolement, 100 ml d'échantillon ont été filtrés sur des supports de filtration stériles sur lesquels ont été placées des membranes filtrantes de 47 mm de diamètre et de porosité nominale de 0,45 µm, munies d'une grille-repère. Après filtration, les membranes ont été déposées sur les milieux de culture gélifiés et incubées pendant 24 heures dans une étuve thermostatée respectivement à 44±5°C pour les cultures sur Rapid*E.coli* 2 Agar et 37°C pour celles sur Bile Esculine Azide.

2.1.2. Dénombrement des bactéries

Sur le milieu Rapid*E.coli*, les coliformes fécaux apparaissent de couleur bleue et *E. coli* de couleur violette ou rose. Le principe de la méthode repose sur la mise en évidence simultanée de deux activités enzymatiques: la β-D-Glucuronidase (GLUC) et la β-D-Galactosidase (GAL). Le milieu contient deux substrats chromogènes: un substrat spécifique de la β-D-Galactosidase qui entraîne la coloration bleue des colonies positives pour cette enzyme et un substrat spécifique de la β-D-Glucuronidase qui donne la coloration rouge des colonies positives pour cette enzyme. Les *E. coli* (GAL⁺/GLUC⁺) forment des colonies violettes à roses et les coliformes autres que *E. coli* (GAL⁺/GLUC⁻) forment des colonies bleues. Le nombre de bactéries (UFC) est exprimé pour 100 ml d'échantillon selon la norme OMS (2011).

Sur la gélose Bile Esculine Azide, l'hydrolyse de l'esculine par les entérocoques font virer le milieu au noir et les ils apparaissent de couleur blanchâtre. L'esculine est un glucoside dérivé de la coumarine (dioxycoumarine et glucose). Les streptocoques du groupe D hydrolysent l'esculine en aglycone qui en présence de sels de fer donne une coloration noire. Les bactéries Gram positif autres que les entérocoques ainsi que les bactéries Gram négatif sont inhibées par l'Azide de sodium.

2. 2. Dénombrement des parasites

Les œufs et/ou kystes de parasites ont été identifiés et dénombrés selon la méthode décrite par Ritchie (1948). Les parasites contenus dans 10 ml d'eau ont été concentrés avec de la formaline et de l'éther, puis observés au microscope (ZEISS, Axiostar plus). Les objectifs de grossissements X10 et X40 ont été utilisés pour l'observation des œufs de parasite ou de larve, avec des oculaires de grossissement X10. Pour le dénombrement des kystes de protozoaires, deux gouttes d'une solution d'iodure de potassium et de l'huile à immersion ont été ajoutées et l'observation a été faite avec l'objectif de grossissement X100. Le nombre d'œufs et/ou de kystes de parasite a été donné après comptage. Le grossissement total est donné par la relation :

$$G = G_{\text{oculaires}} \times G_{\text{objectifs}}$$

V. Evaluation de l'efficacité épuratoire des tourteaux de *Moringa oleifera*

A la recherche d'une efficacité plus grande des graines de *M. oleifera* dans le traitement des eaux, les coagulants de tourteaux ont été testés sur les mêmes échantillons d'eau afin d'évaluer et de comparer les performances épuratoires des deux traitements.

1. Préparation des coagulants de tourteaux de *Moringa oleifera*

En ce qui concerne les tourteaux de *Moringa oleifera*, les graines ont été triées et pressées à froid sans être décortiquées pour extraire la matière grasse avec une machine (presse ZX10), pour un rendement de 30% d'huile. Cette méthode de purification des graines se fait sans chauffage et est accessible aux populations. En outre, la qualité des protéines actives est préservée. Les tourteaux ainsi obtenus ont été séchés 5 jours au soleil puis broyés au mortier comme précédemment (Figure 12). La farine obtenue a été tamisée avec un tamis de 0,5 mm de diamètre pour obtenir une poudre fine et homogène (Folkard et Sutherland, 2002) qui a servi à la préparation des différents coagulants de tourteaux de *Moringa oleifera*. De la même manière que précédemment, des solutions de coagulant de 20 g/l et 100 g/l ont été préparées avec la poudre de tourteaux de graines de *Moringa oleifera*. La solution obtenue a également été agitée durant une heure afin d'extraire les protéines actives, puis conservée au réfrigérateur à 4°C pour empêcher l'altération des protéines actives.

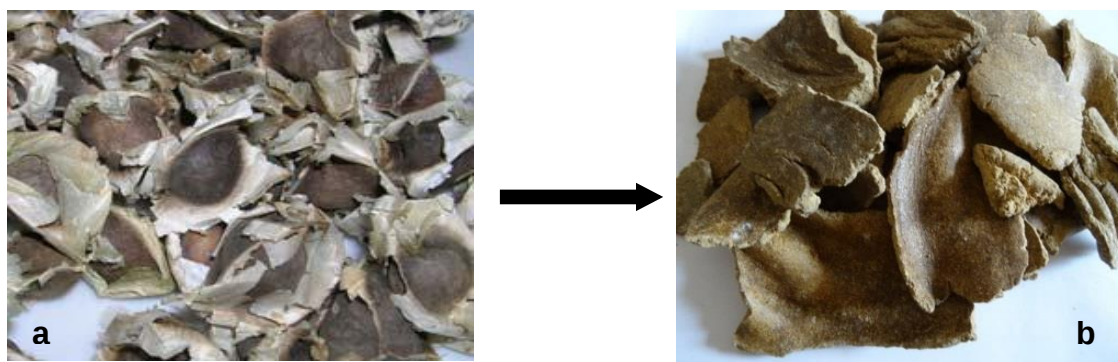


Figure 12 : Graines (a) et tourteaux (b) de *Moringa oleifera* (Photo Kaboré, 2013)

2. Détermination des paramètres physicochimiques des coagulants de tourteaux

Tout comme pour les coagulants de graines, des paramètres physicochimiques ont été également déterminés sur les coagulants de tourteaux de *Moringa oleifera*, suivant les mêmes méthodes. Ce sont : les concentrations en nitrates, nitrites, calcium, magnésium, dureté totale, sulfates et matière organiques.

3. Etude du pouvoir épuratoire des tourteaux de *Moringa oleifera*

Des essais de clarification en jar test avec des coagulants de tourteaux ont été réalisés sur les mêmes échantillons d'eaux et suivant les mêmes protocoles que ceux mis en œuvre avec les traitements aux graines de *Moringa oleifera*. Les doses optimales de coagulant ainsi que le temps de décantation optimum en fonction des caractéristiques des eaux ont été également déterminées afin de préciser les conditions optimales de traitement et d'évaluer leur efficacité comparativement aux graines.

VI. Détermination des qualités physicochimiques et microbiologiques des eaux traitées aux tourteaux de *Moringa oleifera*

Tout comme pour les traitements aux graines de *Moringa oleifera*, les mêmes paramètres physicochimiques de la qualité des eaux de boisson d'impact sanitaire et organoleptiques (turbidité, pH, nitrates, nitrites, calcium, magnésium, dureté totale, sulfates, matière organique et matières en suspension) ont été déterminés sur tous les échantillons avant et après traitement aux tourteaux de *Moringa oleifera*.

La qualité microbiologique (bactériologique et parasitologique) des eaux a été également évaluée à travers le dénombrement des mêmes indicateurs de pollution fécale que ceux décrits précédemment (*Escherichia coli*, coliformes fécaux, entérocoques, kystes de

parasites) pour les essais avec les graines de *M. oleifera*. Les différentes analyses physicochimiques et microbiologiques également ont été effectuées suivant les mêmes procédures que celles décrites précédemment.

VII. Evaluation de la qualité microbiologique des eaux traitées aux graines et tourteaux de *Moringa oleifera* durant la conservation

Afin de définir les conditions optimales de conservation des eaux traitées, les paramètres microbiologiques (*Escherichia coli*, coliformes fécaux, entérocoques et kystes de parasites intestinaux) ont été suivis durant la conservation en fonction de la durée et de la température de conservation. Ainsi, les échantillons d'eau traités aux graines et aux tourteaux de *Moringa oleifera* ont été conservés à température ambiante (25-30°C) et au réfrigérateur à 4°C dans des flacons de verre stériles. Les indicateurs microbiens de contamination fécale susmentionnés ont été dénombrés à des intervalles de 24 h pendant 72 h suivant les mêmes procédures que précédemment indiquées (norme française **NF EN ISO 9308-1** de septembre 2000).

VIII. Estimation du coût des traitements aux graines de *Moringa oleifera* et au sulfate d'alumine

Le coût des traitements est très important pour la viabilité, l'adoption et l'appropriation des technologies. Pour ce faire, une estimation des coûts des différents traitements aux graines de *Moringa oleifera* a été faite comparativement au traitement conventionnel des eaux avec des substances chimiques pratiqué par l'Office National des Eaux et Assainissement (ONEA). Les coûts des traitements ont été évalués sur la base des prix (prix/Kg) des produits sur le marché local et des quantités nécessaires aux traitements d'un (1) m³ d'eau.

IX. Analyse statistique des résultats

Sur un plan d'ensemble, les données obtenues ont fait l'objet d'analyse statistique. Le logiciel XLSTAT 7.5.2. a été utilisé et l'analyse de variances (ANOVA) a été réalisée pour comparer les valeurs moyennes des différentes variables considérées dans chaque cas d'étude. Le test de Newman Keuls a été utilisé pour déterminer les différences significatives entre les variables considérées au seuil de 0,05. Des tests de corrélation de Pearson ont été réalisés entre les variables considérées au seuil de 0,05.

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSION

Partie 1

Optimisation des propriétés épuratoires des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux brutes de consommation.

Les résultats de cette étude ont fait l'objet de 2 articles publiés dans des Revues Scientifiques à comité de lecture :

- ❖ **Aminata KABORE**, Boubacar SAVADOGO, Francis ROSILLON, Alfred S.TRAORE, Dayéri DIANOU (2013b). Optimisation de l'efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de Consommation en Afrique sub-saharienne : cas des eaux du Burkina Faso. *Revue des Sciences de l'Eau*, 26(3) (2013), 209-220 p.
- ❖ **Aminata KABORE**, Boubacar SAVADOGO, Francis ROSILLON, Alfred S.TRAORE, Dayéri DIANOU (2013c). Efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de consommation en Afrique sub-saharienne : cas des eaux du BURKINA FASO. *Annales Université de Ouagadougou Série C*, N°009, ISBN 979-10-90524-17-0, 107-130p, Décembre 2013.

Introduction

La clarification est une étape primordiale dans le traitement des eaux, du fait que la turbidité est un paramètre organoleptique très important dans l'acceptation et l'utilisation de l'eau. En outre, bien qu'elle ne soit pas un indicateur direct de risque pour la santé, Bratby (2006) a montré une forte relation entre la turbidité et la pollution microbienne du fait qu'elle peut constituer une source de nutriment et un abri aux agents pathogènes, favorisant ainsi leur prolifération et des flambées de maladies d'origine hydrique (Altaher et Alghamdi, 2011). Selon Rodier (2009), la turbidité est un paramètre important à suivre lors de la production d'eau potable, car elle rend compte de l'efficacité de la clarification. C'est donc un paramètre très important dans le traitement et la stabilité des eaux.

1. Optimisation du pouvoir clarifiant des graines de *Moringa oleifera*

Durant le traitement des échantillons d'eau de chaque site avec différentes concentrations de *Moringa oleifera*, la turbidité et le pH ont été mesurés toutes les 30 minutes durant 2 heures, puis après 24 heures. Le tableau IV présente l'évolution de la turbidité des eaux en fonction des concentrations de coagulant de graines de *Moringa oleifera* et du temps de décantation.

Tableau IV: Turbidités moyennes des eaux en fonction des concentrations de coagulant de graines de *Moringa oleifera* et du temps de décantation (Kaboré *et al.* 2013c).

Echantillon d'eau	Concentration de coagulant de <i>M. oleifera</i> (mg/l)	Turbidité initiale (NTU)	Turbidité après traitement (NTU)				
			Temps de décantation (mn)				
			30	60	90	120	1440
Loumbila	100	76,4	22,23 ^b	15,40 ^c	11,83 ^d	10,32 ^d	6,54 ^e
	150		22,17 ^b	16,83 ^c	14,27 ^d	12,10 ^d	7,05 ^e
	200		19,53 ^b	13,07 ^c	10,45 ^{cd}	8,96 ^{cd}	6,03 ^d
	250		17,30 ^b	11,87 ^c	9,34 ^d	7,50 ^e	4,81 ^f
	300		17,53 ^b	12,73 ^c	10,35 ^d	9,17 ^d	6,42 ^e
Ouaga 3	100	9,06	13,90 ^a	9,61 ^b	8,42 ^{cd}	7,53 ^d	2,98 ^e
	150		14,23 ^a	10,60 ^b	8,02 ^d	7,59 ^d	2,33 ^e
	200		18,10 ^a	10,08 ^b	8,49 ^c	7,03 ^d	2,31 ^e
	250		18,83 ^a	10,27 ^b	7,75 ^{cd}	6,44 ^d	2,14 ^e
	300		19,10 ^a	10,77 ^b	7,60 ^d	6,82 ^d	2,15 ^e
Gana	7000	6681,7	852 ^a	695,30 ^c	609 ^d	378,70 ^e	358,10 ^f
	8000		737,67 ^b	489,67 ^c	426,67 ^d	262,33 ^e	74,37 ^f
	10000		1048,60 ^b	749,33 ^c	589,67 ^d	455 ^e	109,80 ^f
	12000		875,67 ^b	632 ^c	470 ^d	341,33 ^e	117,27 ^f
	14000		1258,30 ^b	775,60 ^c	624,33 ^d	428 ^e	140,33 ^f
	16000		1128,20 ^b	677,50 ^c	573 ^c	396,67 ^c	134,67 ^c
Boaré	400	150,3	110,30 ^b	88,40 ^c	83,17 ^{cd}	77,30 ^d	54,06 ^e
	500		87,30 ^b	71,87 ^c	60,03 ^d	48,10 ^e	22,90 ^f
	600		86,90 ^b	68,60 ^c	53,57 ^d	41,23 ^e	22,03 ^f
	700		84,60 ^b	69,47 ^c	56,50 ^d	45,27 ^e	20,80 ^f
	800		65,40 ^b	52,17 ^c	42,94 ^d	36,70 ^e	18,50 ^f
	900		95,40 ^b	89,90 ^c	75 ^d	69,50 ^e	27,30 ^f
Norme (OMS, 2011)			< 5 NTU				

Pour chaque colonne, les valeurs ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil 5%.

L'analyse de variance indique que la concentration de coagulant et le temps de décantation influencent significativement ($p < 0,0001$) l'efficacité de la clarification des eaux quelle que soit la nature de l'échantillon. Il ressort sur un plan d'ensemble que la clarification des eaux avec les coagulants de graines de *Moringa oleifera* est rapide durant les trente (30) premières minutes de décantation mais lente après une (1) heure quelle que soit la concentration de coagulant, exceptés les échantillons de faible turbidité ou à forte teneur en argile (cas de Ouaga 3 et Boaré respectivement) (tableau IV).

Pour l'échantillon d'eau de Loumbila, la concentration de 250 mg/l de coagulant a donné la meilleure valeur de turbidité aussi bien pour deux (2) heures (7,5 NTU) que pour 24 heures de décantation (4,81 NTU) pour des abattements respectifs de 90,18 % et 93,7 %. À cette concentration, la turbidité obtenue après 24 heures de décantation (4,81 NTU) répond à la norme fixée par l'OMS (tableau IV).

En ce qui concerne l'échantillon du Gana qui présentait une turbidité élevée (6 681 NTU), de fortes concentrations de coagulant (> 7 g/L) ont été utilisées. Un abattement rapide de la turbidité au bout de 30 minutes de décantation a également été observé pour toutes les concentrations de *M. oleifera*. La concentration de 8 g/L de coagulant a donné la meilleure turbidité aussi bien pour deux heures (262 NTU) que pour 24 heures (74 NTU) de décantation pour des abattements respectifs de 96,07 % et 98,88 %. Au-delà de cette concentration, la turbidité de l'eau est restée uniformément élevée due à l'excès de matières organiques du coagulant. Toutefois, bien que la clarification soit importante, le traitement demeure inefficace pour obtenir de l'eau propre à la consommation même au bout de 24 heures. En somme, il apparaît que l'efficacité de la clarification augmente avec celle de la turbidité initiale de l'échantillon d'eau brute mais nécessite l'utilisation de fortes concentrations de coagulant (≥ 7 g/l) comme le montre le traitement de l'échantillon du Gana (6681 NTU) (tableau IV).

Pour les eaux de faible turbidité (9,06 NTU) ou argileuses (150 NTU), respectivement pour Ouaga 3 et Boaré, la turbidité après clarification est restée supérieure à la norme OMS (2011) même au-delà de 24 heures de décantation, pour des concentrations optimales comprises respectivement entre 250-300 mg/l et 800 mg/l (tableau IV). Ainsi, les coagulants de graines de *Moringa* n'abaissent pas la turbidité des eaux faiblement turbides comme certaines études l'ont également soulignée (Jahn 1988 ; Faby *et al.*, 1993). En effet, l'efficacité de la coagulation floculation avec les graines de *Moringa oleifera* dépend également de la nature des éléments à flocculer, notamment les matières en suspension telle que les argiles. Outre le temps de décantation, les concentrations de coagulant requises pour un traitement optimum varient également en fonction de la turbidité et du taux de matières organiques présents dans l'eau (Faby *et al.*, 1993 ; Folkard, 1997). Au-delà de la concentration optimale de coagulant, la qualité organoleptique des eaux est affectée par la présence de matières organiques résiduelles dans l'eau traitée (tableau IV).

Ainsi, l'efficacité du traitement des eaux avec les graines de *Moringa oleifera* varie en fonction des caractéristiques physicochimiques des eaux, de la concentration de coagulant

et du temps de décantation. Le temps de décantation optimum pour la clarification est supérieur ou égale à 2 heures en fonction des caractéristiques physicochimiques des eaux brutes. Les doses élevées de coagulant, des temps longs de décantation et la présence de lipides dans l'eau traitée constituent des contraintes au traitement avec les graines de *Moringa oleifera*.

2. Effet du traitement sur les paramètres physicochimiques des eaux

L'effet du traitement sur les paramètres physicochimiques a également été évalué. Les résultats obtenus avant et après 2 h de décantation avec les concentrations optimales de coagulant sont présentés dans le tableau V.

Tableau V: Paramètres physicochimiques moyens des eaux avant (Av) et après (Ap) 2 h de traitement avec les concentrations optimales de coagulant de *Moringa oleifera* (Kaboré *et al.*, 2013b).

Site	pH		Nitrates (mg/l)		Nitrites (mg/l)		Calcium (mg/l)		Magnésium (mg/l)		Sulfates (mg/l)		Dureté totale		Matières Organiques (mg/l)	
	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap
Loumbila	7,7 ^a	7,6 ^a	1 ^a	2 ^a	0 ^a	0 ^a	4 ^a	5 ^a	12 ^a	8 ^b	9 ^a	21 ^b	16 ^a	13 ^b	12 ^a	25 ^b
Ouaga 3	7,6 ^a	7,4 ^a	0 ^a	1 ^a	0 ^a	0 ^a	31 ^a	30,5 ^a	13,5 ^a	5 ^b	10 ^a	15 ^b	45 ^a	36 ^b	6 ^a	14 ^b
Boaré	8,3 ^a	8,1 ^a	10 ^a	4 ^b	0 ^a	0 ^a	39 ^a	13 ^b	17 ^a	7 ^b	12 ^a	31 ^b	46 ^a	31 ^b	38 ^a	62 ^b
Gana	7,9 ^a	6,2 ^b	201 ^a	3 ^b	0 ^a	0 ^a	323 ^a	15 ^b	586 ^a	12 ^b	0 ^a	18 ^b	913 ^a	27 ^b	1800 ^a	253 ^b
Norme (OMS, 2011)	6,5-8		50		3		-		-		500		-		-	

Pour chaque paramètre, les valeurs ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil 5%.

Le suivi du pH des eaux durant le traitement a montré une légère variation, comprise entre 0,15 - 0,25 unité (tableau V). Cette variation n'a été statistiquement significative ($p < 0,0001$) que pour les échantillons du Gana où la concentration de coagulant utilisée a été très élevée. En accord avec nos résultats, des études ont montré que la composition chimique (pH, conductivité) des eaux évolue peu après traitement aux graines de *M. oleifera* (Folkard, 1997). Ainsi, les valeurs de pH obtenues après clarification des différents échantillons d'eaux ont été conformes à la norme.

Outre le pH, une baisse significative des concentrations de nitrates ($p < 0,0001$), calcium ($p < 0,0001$), magnésium ($p < 0,0001$) et dureté totale ($p < 0,0001$) a également été observée pour tous les échantillons, contre une augmentation de celles des sulfates ($p < 0,0001$) et des matières organiques ($p < 0,0001$) pour tous les échantillons excepté celui du Gana pour lequel une baisse des matières organiques a été observée.

Pour les échantillons de Loumbila et de Ouaga 3 qui contenaient de faibles concentrations de nitrates (1 mg/l), le traitement a induit une augmentation de près de 100 % (2 mg/l). Cet apport en nitrates n'affecte nullement la qualité de ces eaux dont le seuil de tolérance est de 50 mg/l (WHO, 2011). Par contre pour les échantillons de Gana et Boaré, les concentrations de nitrates ont significativement baissé respectivement de 98 et 60 % aux conditions optimales de traitement. Selon des études, la coagulation avec des graines de *M. oleifera* est basée sur l'adsorption et la neutralisation dans l'eau de particules chargées négativement (colloïdes) et de métaux par des charges positives des protéines actives (Vikashni *et al.*, 2012). Ce mécanisme pourrait expliquer l'élimination des nitrates, des nitrites ainsi que du calcium et du magnésium avec les colloïdes dans ces échantillons.

Le traitement a induit une augmentation de sulfates (50 à 150 %) et des matières organiques (30 à 100 %) pour tous les échantillons, excepté celui du Gana pour lequel une baisse des matières organiques a été observée. Cependant, malgré l'apport d'ions sulfates dans l'eau traitée par le coagulant, les concentrations finales dans les eaux traitées répondent à la norme OMS dont le seuil est fixé à 250 mg/l.

3. Effet du traitement sur les paramètres microbiologiques des eaux

L'analyse microbiologique du surnageant des échantillons d'eau traités a montré une réduction hautement significative ($p < 0,0001$) de tous les indicateurs de pollution fécale au bout de deux heures de décantation. Le tableau VI présente les paramètres microbiologiques des eaux brutes et après 2h de traitement avec les concentrations optimales de coagulant de graines de *Moringa oleifera*.

Tableau VI : Paramètres microbiologiques des échantillons d'eau avant (Av) et après (Ap) 2 h de traitement avec les concentrations optimales de coagulant (Kaboré *et al.*, 2013c).

Echantillon d'eau	Concentration de <i>M. oleifera</i> (mg/l)	Indicateur microbien (UFC/100 ml)							
		Coliformes fécaux		<i>E. coli</i>		Enterocoques		<i>G. intestinalis</i>	
		Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap
Boaré	800	77 ^a	11 ^b	37 ^a	7 ^b	53 ^a	3 ^b	0 ^a	0 ^a
Gana	8000	1200 ^a	72 ^b	1000 ^a	44 ^b	100 ^a	6 ^b	80 ^a	0 ^b
Loumbila	250	11 ^a	2 ^b	3 ^a	0 ^a	1 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a
Ouaga 3	300	8 ^a	2 ^b	2 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a
Norme (OMS, 2011)		0		0		0		-	

Pour chaque paramètre, les valeurs ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil 5%.

Pour les échantillons d'eau de Loumbila et Ouaga 3 (tableau VI), les concentrations de 250 mg/l et 300 mg/l ont entraîné un abattement de 100% d'*E. coli* et des entérocoques respectivement. En outre, 82 % des coliformes fécaux ont également été éliminé pour les échantillons de Loumbila et 75 % pour l'échantillon de Ouaga 3. Aucun kyste de parasites n'a été retrouvé dans les échantillons d'eau de ces deux sites.

Bien que des réductions hautement significatives ($p < 0,0001$) ont été obtenues pour les échantillons d'eau de Boaré et du Gana, les teneurs en coliformes fécaux, *E. coli* et entérocoques dans les eaux traitées ont été supérieures aux seuils recommandés par l'OMS (2011) pour l'eau de boisson (tableau VI). Pour l'échantillon de Boaré (tableau VI) les abattements ont été pour les coliformes fécaux de 74 %, 87 % pour *E. coli* et près de 90 % pour les entérocoques. Aucun kyste de parasites n'a été retrouvé dans cet échantillon. Le traitement s'est révélé moins performant pour l'échantillon du Gana très pollué au plan bactériologique. Pour cet échantillon les abattements obtenus ont été de l'ordre de 95 % pour les coliformes fécaux, 96 % pour les *E. coli* et 94 % pour les entérocoques. Sur un plan d'ensemble, les eaux traitées de ces deux sites demeurent impropres à la consommation humaine.

Pour l'échantillon d'eau de Gana qui contenait 80 kystes de parasites (*Giardia intestinalis*), un abattement de 100% a été observé avec les traitements aux graines de *Moringa oleifera*. Toutefois, les faibles volumes d'eau utilisés (10 ml contre 1 L recommandé) pour la concentration des kystes pourraient biaiser les résultats obtenus. Ainsi l'efficacité du traitement aux graines de *Moringa oleifera* sur ce paramètre sera réévaluée en utilisant des volumes plus importants.

Les pourcentages d'abattement (par rapport aux échantillons non traités) de la turbidité et des indicateurs microbiens des différents échantillons ont été déterminés et présentés dans le tableau VII.

Tableau VII : Pourcentages d'abattement de la turbidité et des indicateurs microbiens après 2 h de traitement au *Moringa oleifera*.

Echantillons	Concentrations (mg/l)	Abattement Turbidité (%)	Abattement microbien (%)		
			Coliformes fécaux	<i>E. coli</i>	Entérocoques
Boaré	800	75,34	85,71	81,08	94,33
Gana	8000	96,07	94	95,6	94
Loumbila	250	90,18	81,81	100	100
Ouaga 3	300	24,69	85	100	ND

Il apparait ainsi que les abattements microbiens obtenus par les traitements sont fonction des caractéristiques physicochimiques et microbiologiques initiales de l'eau brute mais également de l'efficacité de la clarification. En effet, la liaison des microorganismes aux particules en suspension fait que leur sédimentation entraîne également celle des microorganismes. Ainsi, plus la turbidité de l'eau est réduite plus la qualité microbiologique de l'eau traitée est meilleure (Jahn 1988). Du fait de la relation étroite entre les microorganismes et les particules en suspension, une élimination importante de la turbidité entraîne également celle des microorganismes. En outre, la présence de substance antibactérienne dans les graines de *Moringa oleifera* (Eilert *et al.*, 1981 ; Fisch, 2004) pourrait expliquer les abattements significatifs obtenus (tableau VII).

La présente étude a montré des insuffisances dans l'utilisation des coagulants de graines de *Moringa oleifera* dans la purification des eaux, notamment l'utilisation de fortes concentrations de coagulant, les temps de décantation longs et une modification de la qualité organoleptique de l'eau due à la présence de lipides et de particules de graines en suspension dans l'eau traitée. Pour remédier à ces insuffisances les graines de *Moringa oleifera* ont été débarrassées de leur matière grasse par pression à froid afin d'obtenir des protéines purifiées et non dénaturées. Ces protéines purifiées ont été utilisées comme coagulants comparativement aux graines brutes dans la purification des échantillons d'eau. La partie 2 de l'étude fait l'économie des recherches réalisées à cet effet.

Partie 2

Evaluation des qualités épuratoires des tourteaux de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de consommation

Les résultats obtenus ont fait l'objet d'un article publié dans la revue *Journal of Water Resource and Protection* et de deux communications orales et de deux posters.

❖ **Aminata KABORE**, Boubacar SAVADOGO, Francis ROSILLON, Alfred S. TRAORE, Dayéri DIANOU (2013a). Effectiveness of *Moringa oleifera* Defatted Cake versus Seed in the Treatment of Unsafe Drinking Water: Case Study of Surface and Well Waters in Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, 5, 1076-1086p. doi:10.4236/jwarp.2013.511113, Published Online November 2013. <http://www.scirp.org/journal/jwarp>.

Introduction

Selon Broin *et al.*, (2002), les protéines purifiées sont plus efficaces dans la clarification des eaux. Dans cette seconde phase de l'étude, des échantillons d'eau ont été collectés sur les mêmes sites que précédemment et traités avec des coagulants de tourteaux de *Moringa oleifera* et comparativement avec ceux des graines. Pour une meilleure évaluation de leurs performances épuratoires, les échantillons d'eau ont également été traités au sulfate d'alumine selon le protocole mis en œuvre par l'ONEA. Ainsi, les conditions optimales de clarification (concentrations de coagulant et temps de décantation optimums) et les efficacités épuratoires des tourteaux (graines délipidées) ont été déterminées et comparés à celles des graines et du sulfate d'alumine.

1. Pouvoir clarifiant des tourteaux de *Moringa oleifera*

Les moyennes des turbidités des eaux brutes et traitées aux graines ou aux tourteaux de *Moringa oleifera* ou au sulfate d'alumine sont présentées dans les tableaux VIII et IX. Le temps de décantation pour le traitement des eaux selon le protocole de l'ONEA (15 min) a été retenu pour l'étude.

Tableau VIII : Moyennes des turbidités des échantillons d’eaux de Loumbila, Ouaga 3 et Gana, non traités et traités avec les coagulants de tourteaux de *Moringa oleifera* (1), de graines (2) et de sulfate d’alumine (3) (Kaboré *et al.*, 2013a).

Site	Turbidité initiale	Traitement	Concentration de coagulant (mg/l)	Turbidité (NTU)				
				Temps de décantation (min)				
				15	30	60		
Loumbila	158.67 ^a	1	300	27,67 ^b	13,98 ^{bc}	5,53 ^{hij}		
			350	19,39 ^b	9,21 ^{cd}	4,05 ^{kl}		
			400	11,01 ^c	8,35 ^{cde}	2,94 ^f		
			500	8,29 ^{cde}	5,59 ^{def}	2,23 ^f		
			600	7,98 ^{cde}	4,82 ^{def}	1,77 ^f		
		2	300	32,46 ^b	18,47 ^b	8,73 ^{de}		
			350	24,39 ^b	12,21 ^c	6,05 ^{gh}		
			400	20,97 ^b	9,10 ^{cd}	4,22 ^{def}		
			500	17,12 ^b	8,57 ^{cde}	3,89 ^{ef}		
			600	18,29 ^b	9,04 ^{cd}	3,69 ^{ef}		
		3	22,5	2,24 ^{kl}	ND	ND		
			25	2,20 ^{kl}	ND	ND		
			15	1,77 ^l	ND	ND		
		Ouaga 3	61.53 ^a	1	300	9,82 ^{de}	6,98 ^{fgh}	5,29 ^{hij}
					350	6,63 ^{ghi}	4,45 ^{ijk}	2,64 ^{kl}
400	4,30 ^{ijkl}				2,97 ^{jkl}	1,90 ^l		
2	300			19,60 ^c	9,91 ^c	5,47 ^{hi}		
	350			17,51 ^c	8,47 ^{efg}	5,26 ^{hij}		
	400			13,23 ^d	9,12 ^{ef}	4,40 ^{ijk}		
3	17,5			1,14 ⁱ	ND	ND		
	20			0,36 ^j	ND	ND		
	22,5			0,73 ^j	ND	ND		
Gana	6360 ^a	1	8000	16,90 ^b	11,80 ^c	8,62 ^b		
			9000	13,40 ^b	8,69 ^b	6,10 ^b		
			10000	9,56 ^b	6,07 ^b	4,13 ^b		
			11000	20,90 ^b	17,06 ^b	9,60 ^b		
		2	8000	66,60 ^b	51,20 ^b	27 ^b		
			9000	64,47 ^b	52,37 ^b	27,06 ^b		
			10000	67,40 ^b	33,10 ^b	18,40 ^b		
			11000	62,47 ^b	31,90 ^b	23,30 ^b		
		3	500	4,83 ^b	ND	ND		
			600	4,08 ^b	ND	ND		
			700	1,94 ^b	ND	ND		
Norme (OMS, 2011)				≤ 5 NTU				

Pour chaque colonne, les valeurs ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil 5%.

ND : Non Déterminé

Tableau IX: Moyennes des turbidités des échantillons d'eau de Ziga et Boaré, traitées aux tourteaux (1), aux graines de *Moringa oleifera* (2) et au sulfate d'alumine (3) (Kaboré *et al.*, 2013a).

Site	Turbidité initiale	Traitement	Concentration de coagulant (mg/l)	Turbidité (NTU)					
				temps de décantation (min)					
				15	30	60	120		
Ziga	180.3 ^a	1	400	53 ^{ef}	33,97 ^{ij}	17,63 ^{kl}	10,70 ^{no}		
			500	55,93 ^{ef}	35,63 ^{hi}	19,15 ^k	13,77 ^{mn}		
			600	50,87 ^f	35,17 ⁱ	21,60 ^l	11,23 ⁿ		
			700	35,27 ^g	25,77 ^{jk}	13,20 ^{mn}	7,04 ^o		
			800	78,33 ^b	64,27 ^c	40,20 ^{gh}	27,77 ^j		
		2	400	72,27 ^c	48,60 ^f	24,52 ^{kl}	13,14 ^{mn}		
			500	64,86 ^d	45,43 ^{fg}	23,73 ^{kli}	13,30 ^{mn}		
			600	57,74 ^{de}	43,21 ^g	23,33 ^{kl}	11,03 ⁿ		
			700	54,17 ^{ef}	37,04 ^{hi}	15,69 ^m	10,67 ^{no}		
			800	59,59 ^d	37,51 ^{hi}	23,24 ^{kl}	12 ^{mn}		
		3	35	7,47 ^o	ND	ND	ND		
			40	5,15 ^o	ND	ND	ND		
			45	6,42 ^o	ND	ND	ND		
		Boaré	277 ^a	1	700	46,27 ^f	30,80 ^{jk}	16,01 ^m	9,63 ⁿ
					800	41,73 ^g	32,67 ^{ij}	16,4 ^m	9,95 ⁿ
900	47,83 ^f				37,17 ^h	15,39 ^m	9,35 ⁿ		
2	700			79,33 ^c	63,67 ^d	45,60 ^{fg}	25,17 ^l		
	800			77,10 ^c	66,67 ^d	52,27 ^e	26,90 ^{kl}		
	900			84 ^b	66,43 ^d	44,30 ^{fg}	35,17 ^{hi}		
3	30			5,36 ^o	ND	ND	ND		
	35			3,74 ^o	ND	ND	ND		
	40			2,99 ^o	ND	ND	ND		
Norme (OMS, 2011)				≤ 5 NTU					

Pour chaque colonne, les valeurs ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil 5%.

L'analyse de variance a montré que la turbidité des eaux varie significativement en fonction des échantillons ($p < 0,0001$), du traitement (graines ou tourteaux de *Moringa oleifera*) ($p < 0,0001$), du temps de décantation (respectivement $p < 0,0001$ et $p = 0,000$) et des concentrations de coagulant ($p < 0,0001$) quelque soit les échantillons (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013c). Ainsi, pour tous les échantillons d'eau confondus, il ressort que la turbidité moyenne des eaux traitées aux tourteaux (5,7 NTU) est inférieure à celle obtenue avec les graines de *Moringa*

oleifera (11,8 NTU) (figure 13). En outre, les temps de décantation optimaux obtenus avec les tourteaux de *Moringa oleifera* ont été inférieurs à ceux obtenus avec les graines (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013c). En fonction des échantillons, les temps de décantation optimaux ont été compris entre 15-60 min pour les tourteaux de *Moringa oleifera* contre 60-120 min pour les graines de *Moringa oleifera* et 15 mn pour le sulfate d'alumine.

Le traitement des échantillons d'eaux de Loumbila avec les coagulants de tourteaux de *Moringa oleifera* a permis d'obtenir une turbidité de 4,83 NTU en 30 min de décantation contre 9,04 NTU dans les mêmes conditions qu'avec les graines (tableau VIII). Pour les échantillons d'eau de Ouaga 3, une turbidité de 4,32 NTU a été obtenue en 15 mn pour le traitement aux tourteaux contre 13,23 NTU dans les mêmes conditions avec les graines de *Moringa oleifera* pour lequel une turbidité de 4,4 NTU a été obtenue en 1 heure (tableau VIII). Le temps de décantation optimum pour les échantillons d'eau de Gana avec les tourteaux de *Moringa oleifera* a été de 1 heure (plus faible turbidité : 4,13 NTU). Dans les mêmes conditions, la turbidité de l'eau traitée avec les graines de *Moringa oleifera* (18,4 NTU) a été supérieure à la norme OMS (≤ 5 NTU) (tableau VIII).

Quant aux échantillons d'eau de Ziga et Boaré les temps de décantation optimaux ont été supérieurs à 2 heures pour les deux traitements. Cependant, le traitement aux tourteaux de *Moringa oleifera* a donné des valeurs de turbidité proche de la norme OMS pour les deux échantillons (respectivement 7,04 et 9,35 NTU) comparativement à celles des graines (tableau IX). Du fait de la décantation lente pour ces échantillons d'eau, le temps de décantation appropriée est de 2 h pour les tourteaux et supérieur à 2 h pour les graines.

Les caractéristiques physicochimiques des échantillons d'eau utilisés dans cette seconde phase de l'étude diffèrent de ceux des échantillons précédents. Ces variations, en rapport avec la période d'échantillonnage (2011 et 2012) (Dianou *et al.*, 2011) ont influencé les conditions de traitement, notamment avec les graines de *Moringa oleifera* (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013c). De ce fait, les concentrations optimales précédemment définies pour le traitement aux graines de *Moringa oleifera* (Partie 1 ; tableau IV) n'ont pas permis un traitement optimum de ces échantillons dont les turbidités ont été plus élevées (tableaux VIII et IX). Les concentrations élevées de coagulant utilisées et les temps de décantation obtenus dans cette étude ont donc été fonction des caractéristiques initiales des eaux brutes.

Il ressort également que les tourteaux de graines de *Moringa oleifera* sont aussi efficaces que celui au sulfate d'alumine (tableaux VIII, IX ; figure 13) pour certains échantillons comme ceux de Loumbila et Ouaga 3. Par contre ce traitement s'est avéré moins performant pour les échantillons de Ziga, Gana et Boaré qui ont nécessité l'utilisation de fortes concentrations de

coagulant et des temps de décantation plus long comparativement au sulfate d'alumine. Globalement, pour les tourteaux de *Moringa* les valeurs de turbidité ont été obtenues pour des temps de décantation plus long (15 min - 1 h) comparativement au sulfate d'alumine (15 min).

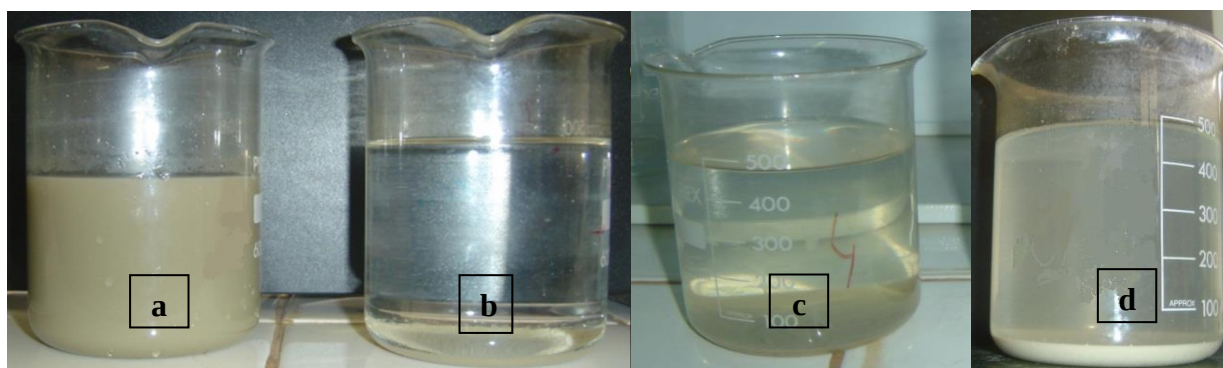


Figure 13 : Echantillon d'eau brute de Gana (a), traité au sulfate d'alumine (b), aux tourteaux de *Moringa oleifera* (c) et aux graines de *M. oleifera* (d) après une (1) heure de décantation.

Selon Vikashni *et al.*, (2012) et Bina *et al.*, (2009), le principe de purification des eaux avec les graines de *Moringa oleifera* est basé sur le mécanisme électrostatique de charge de patch. L'élimination de la matière grasse des graines de *Moringa oleifera* pourrait réduire les interactions entre les lipides et les protéines actives. Cela pourrait expliquer la grande efficacité des tourteaux comparativement aux graines dans le traitement des eaux.

2. Paramètres physicochimiques des eaux traitées aux tourteaux de *Moringa oleifera*

La détermination de la composition physicochimique des coagulants de graines de *Moringa oleifera* est nécessaire pour une interprétation judicieuse des résultats physicochimiques des eaux traitées et pour mieux comprendre leur évolution. Le tableau X présente quelques paramètres physicochimiques des coagulants de graines et tourteaux de *Moringa oleifera*.

Tableau X: Caractéristiques physicochimiques des coagulants de graines et de tourteaux de *Moringa oleifera* (Kaboré *et al.*, 2013a)

Coagulant	Nitrates (mg/l)	Nitrites (mg/l)	Calcium (mg/l)	Magnésium (mg/l)	Sulfates (mg/l)	Dureté totale	Matières organiques (mg/l)
Graines	34	4	0	0	47	0	1400
Tourteaux	19	1	0	0	10	0	200

Il ressort que les graines et les tourteaux de *Moringa oleifera* contiennent des substances minérales notamment les nitrates, les nitrites et les sulfates ainsi que des matières organiques.

Toutefois, leurs concentrations dans les tourteaux sont moins importantes comparativement à celles dans les graines de *Moringa oleifera*. Cela pourrait expliquer les variations de la qualité physicochimique des eaux traitées (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013c). Le tableau XI présente les moyennes des caractéristiques physicochimiques des eaux brutes et des eaux traitées aux graines ou aux tourteaux de *Moringa oleifera*.

Tableau XI: Moyennes des caractéristiques physicochimiques des eaux de Loumbila, Ouaga 3, Ziga, Boaré et Gana après 2h de traitement aux tourteaux (1) et aux graines de *Moringa oleifera* (2), comparativement aux échantillons Non Traités (NT).

Site	Traitement	pH	Nitrates (mg/l)	Nitrites (µg/l)	Calcium (mg/l)	Magnesium (mg/l)	Sulfates (mg/l)	Dureté totale (mg/l)	Matières organiques (mg/l)
Loumbila	NT	7,5 ^c	0 ^h	1 ^{fg}	4,27 ⁱ	12,20 ^g	9,10 ^g	16,45 ^{gh}	12 ⁱ
	1	7,3 ^e	1,67 ^{fg}	2 ^{fg}	6,10 ^{gh}	8,37 ^{hi}	16,67 ^e	14,13 ^h	2 ^j
	2	7,2 ^f	1,87 ^{ef}	4 ^{ef}	5,33 ^{hi}	8,13 ^{ij}	21,13 ^c	13,47 ^h	25 ^g
Ouaga3	NT	7,6 ^b	0 ^h	13 ^d	31,23 ^d	13,50 ^{ef}	9,67 ^f	44,74 ^b	6 ^{ij}
	1	7,4 ^{cd}	1,33 ^{fg}	33 ^b	36,10 ^c	9,34 ^h	13,40 ^f	45,44 ^b	2 ^j
	2	7,3 ^e	1,10 ^g	0 ^g	30,49 ^d	5,29 ^k	14,20 ^f	35,77 ^c	14 ^h
Ziga	NT	8 ^a	7,12 ^c	4 ^{ef}	7,29 ^g	18,90 ^c	16 ^e	26,21 ^e	47 ^e
	1	7,2 ^f	0 ^h	29 ^c	7,32 ^g	14,30 ^e	22 ^c	21,63 ^f	5 ^{ij}
	2	7,4 ^{cd}	2,30 ^e	7 ^e	6,55 ^{gh}	12,40 ^{fg}	34 ^a	18,95 ^{fg}	60 ^d
Boaré	NT	7,1 ^f	9,90 ^b	42 ^a	38,87 ^b	7,12 ^j	11,97 ^f	45,59 ^b	36 ^f
	1	7,2 ^f	1,57 ^{fg}	4 ^{ef}	13,60 ^{ef}	22,30 ^b	14,23 ^f	35,86 ^c	9 ⁱ
	2	7,1 ^f	3,90 ^d	6 ^e	13,12 ^f	17,40 ^d	31 ^b	30,56 ^d	62 ^c
Gana	NT	7,3 ^g	200,80 ^a	0 ^g	322,73 ^a	586 ^a	0 ^h	913,30 ^a	1800 ^a
	1	7,1 ^{de}	1,40 ^{fg}	5 ^{ef}	12,38 ^f	7,60 ^{ij}	19,50 ^{cd}	19,97 ^{fg}	11 ⁱ
	2	6,3 ^h	3,30 ^d	5 ^{ef}	14,83 ^e	12,30 ^{fg}	18,67 ^d	26,98 ^{de}	253 ^b
Norme (OMS, 2011)		6.5-8.5	50	3	-	-	≤500	-	-

Pour chaque colonne, les valeurs ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil 5%.

L'analyse de variance montre que les traitements ont un effet significatif sur les paramètres physicochimiques des eaux ($p < 0,0001$). Quelque soit les échantillons d'eau, les valeurs des teneurs en nitrates et matières organiques obtenus avec les traitements aux tourteaux ont été plus faibles (respectivement 1,19 mg/l et 5,8 mg/l) comparativement à celles obtenues avec les

graines de *Moringa oleifera* (2,5 mg/l et 75,4 mg/l respectivement). En outre, le traitement aux graines de *Moringa oleifera* a induit plus de sulfates (21,2 mg/l) dans l'eau traitée comparativement aux tourteaux (15,9 mg/l). En ce qui concerne le calcium, le magnésium et la dureté totale, il est ressorti que leur teneur est plus faible dans les eaux traitées avec les coagulants de graines de *Moringa oleifera* (respectivement 14,1 mg/l, 11,1 mg/l et 25,1 mg/l) comparativement à celles traitées avec les tourteaux (respectivement 15,1 mg/l, 12,3 mg/l et 27,4 mg/l).

La plus forte réduction de nitrates a été obtenue pour les échantillons d'eau du Gana avec un abattement de 98,5% pour les coagulants de tourteaux de *Moringa oleifera* contre 99,5% avec le traitement aux graines (tableau XI). Toutefois, pour l'ensemble des échantillons d'eau de Loumbila et de Ouaga 3, les deux traitements ont entraîné une augmentation de la concentration en nitrates dans l'eau traitée probablement due à la présence de nitrates dans les coagulants tout comme dans les précédentes études (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013c). Toutefois les valeurs ont été conformes à la norme de l'OMS (50 mg/l) (tableau XI).

En ce qui concerne le calcium et le magnésium, les plus fortes réductions ont été obtenues pour les échantillons d'eau du Gana et de Boaré respectivement (95 - 98%) et (66 - 59%) avec les traitements aux tourteaux contre (96 - 98,8%) et (67-88%) pour le traitement aux graines de *Moringa oleifera* (tableau XI). Globalement, les deux traitements ont entraîné une augmentation des concentrations de sulfates dans les échantillons d'eau traités sans excéder la valeur guide de l'OMS qui est fixée à 250 mg/l. Cela pourrait s'expliquer par la présence de sulfates dans les graines et tourteaux de *Moringa oleifera* (tableau X).

Les coagulants de graines de *Moringa oleifera* ont entraîné une augmentation des teneurs en matières organiques résiduelles de tous les échantillons exceptés l'échantillon d'eau du Gana dont la concentration de matières organiques est passée de 1800 mg/l à 253 mg/l avec 10 g/l de coagulant de graines contre 11 mg/l pour le traitement aux tourteaux de *Moringa oleifera* (tableau XI). L'augmentation de la matière organique dans les eaux traitées serait due à la forte concentration de matières organiques présentes dans les graines de *Moringa oleifera* (tableau X). Cela constitue une limite aux traitements car une eau potable est non seulement limpide, mais aussi exempt de goût et d'odeur (OMS, 2011). Ce résultat est confirmé par nos études antérieures (Kaboré, 2011 ; Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013b ; 2013c) et ceux obtenus par Fatombi *et al.*, (2009).

La coagulation-floculation avec les graines de *Moringa oleifera* est basée sur l'adsorption et la neutralisation des particules négatives (colloïdes) et des métaux par les charges

positives des protéines actives contenues dans les coagulants de graines de *Moringa oleifera* (Bina *et al.*, 2009). Ce mécanisme pourrait expliquer l'élimination des nitrates, du calcium, du magnésium et de la dureté totale de ces échantillons d'eau (tableau XI).

On note ainsi, une différence significative entre l'efficacité des deux traitements dans la purification des eaux. Les tourteaux de graines de *Moringa oleifera* ont une capacité épuratoire plus élevée que les graines, mais cette activité est fonction des caractéristiques initiales de l'eau brute.

3. Paramètres microbiologiques des eaux traitées aux graines de *Moringa oleifera*, aux tourteaux et au sulfate d'alumine

Les indicateurs microbiens de contamination fécale des échantillons d'eau varient significativement en fonction des sites d'échantillonnage ($p < 0,0001$) et des traitements ($p < 0,0001$). Les moyennes des indicateurs pour chaque traitement sont présentées dans le tableau XII.

Tableau XII: Moyennes des concentrations de *E. coli*, coliformes fécaux, entérocoques et kystes de parasites des eaux de Ouaga 3, Loumbila, Ziga, Boaré et Gana, après 2 h de traitement aux tourteaux (1), aux graines (2) et au sulfate d'alumine (15 min) comparativement au échantillons Non Traités (NT) (Kaboré *et al.*, 2013a).

site	Traitement	Coliformes fécaux (UFC/100ml)	<i>E.coli</i> (UFC/100ml)	Entérocoques (UFC/100ml)	Kystes de Parasites (kystes/100 ml)
Loumbila	NT	147 ^c	43 ^b	23 ^c	0 ^b
	1	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0 ^b
	2	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0 ^b
	3	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0
Ouaga 3	NT	203 ^c	120 ^b	10 ^c	0 ^b
	1	33 ^{cd}	10 ^c	0 ^d	0 ^b
	2	10 ^d	0 ^c	0 ^d	0 ^b
	3	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0
Ziga	NT	237 ^c	180 ^b	90 ^c	0 ^b
	1	20 ^d	3 ^c	0 ^d	0 ^b
	2	20 ^d	0 ^c	0 ^d	0 ^b
	3	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0
Boaré	NT	567 ^b	133 ^b	550 ^b	0 ^b
	1	33 ^d	0 ^c	0 ^d	0 ^b
	2	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0 ^b
	3	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0
Gana	NT	6000 ^a	3800 ^a	1933 ^a	2283 ^a
	1	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0 ^b
	2	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0 ^b
	3	0 ^d	0 ^c	0 ^d	0
Norme (OMS, 2011)		0	0	0	0

Pour chaque colonne, les valeurs ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil 5%.

NT : Non Traité

De manière générale, les traitements aux graines et tourteaux de *Moringa oleifera* ont entraîné un abattement hautement significatif ($p < 0,0001$) de tous les indicateurs de pollution fécale dans les échantillons d'eau traités (tableau XII). Pour tous les échantillons d'eau, les traitements au sulfate d'alumine ont entraîné un abattement de 100% de tous les indicateurs microbiens. Concernant les traitements au *Moringa oleifera*, la plus forte réduction microbienne a été obtenue avec les graines respectivement 99,92% pour les coliformes fécaux, 99,92% pour *E. coli* et 100% pour les entérocoques contre 99,3%, 99,76% et 98% respectivement pour les coliformes fécaux, *E. coli* et les entérocoques pour les tourteaux de *Moringa oleifera*. Toutefois, les abattements obtenus avec les deux traitements aux graines de *Moringa oleifera* ont varié significativement en fonction des échantillons d'eau.

Ainsi, pour les échantillons de Loumbila et du Gana les deux traitements ont entraîné des abattements de 100% de tous les indicateurs microbiens, permettant ainsi d'obtenir des eaux conformes à la norme OMS (2011). Tous les kystes de parasites présentent dans ces échantillons ont également été éliminés par les deux traitements (Kaboré *et al.*, 2013a, 2013c). Toutefois, pour mieux évaluer l'effet des traitements sur les kystes de parasites, des volumes plus importants doivent être concentrés. Cet abattement très significatif des indicateurs fécaux dans l'eau du Gana est en lien avec celui de la turbidité (99%). Du fait de la relation étroite entre les microorganismes et les particules en suspension, une élimination importante de la turbidité entraîne également celle des microorganismes.

En ce qui concerne les échantillons de Ouaga 3, les traitements aux graines de *Moringa* ont entraîné un abattements de 100% de *E. coli* et des entérocoques et 95% de coliformes fécaux. Comparativement, les tourteaux ont permis une réduction de 83%, 92% et 100% respectivement pour les coliformes fécaux, *E. coli* et les entérocoques.

Pour les échantillons de Boaré, un abattement de 100% a été obtenu pour les *E. coli* et les entérocoques pour les deux traitements. En ce qui concerne les coliformes fécaux, un abattement de 100% a été obtenu pour les graines contre 94% pour les tourteaux de *Moringa oleifera*.

Pour les échantillons de Ziga traités aux graines de *Moringa oleifera*, un abattement de 100% a été obtenu pour les *E. coli* et des entérocoques et 91% pour les coliformes fécaux. Les traitements aux tourteaux ont donné des abattements de 91, 98 et 100% ont été obtenus respectivement pour les coliformes fécaux, *E. coli* et les entérocoques.

Il apparaît aux conditions optimales de traitement pour les échantillons d'eau de Ouaga 3, Ziga et Boaré, que la qualité microbiologique de l'eau traitée avec les graines est meilleure que celle obtenue avec les tourteaux de *Moringa oleifera* (tableau XII). Les lipides contenus dans les

graines de *Moringa oleifera* auraient un effet bactéricide sur les microorganismes (Nilani *et al.*, 2012 ; Kam, 2012). Cependant, la matière organique induit par les graines affecte non seulement la qualité organoleptique et pourrait provoquer la croissance de bactéries dans l'eau traitée. En effet, selon Lautenschlager *et al.*, (2010), l'abondance des bactéries dans l'eau dépend de la quantité d'éléments nutritifs sous forme de carbone organique (sucre, acides aminés, acides organiques, etc.). L'eau potable ne doit contenir qu'entre 0,5 à 2 mg/l de carbone organique dissous, afin d'assurer sa stabilité microbiologique (Lautenschlager *et al.*, 2010).

Dans ce contexte et en lien avec une de nos hypothèses de recherche, nous avons cherché dans une troisième partie de notre étude à évaluer la qualité microbiologique des eaux traitées avec les graines et tourteaux de *Moringa oleifera* durant la conservation, en relation avec la température et la durée de conservation.

Partie 3

Qualité microbiologique des eaux traitées aux graines et tourteaux de *Moringa oleifera* durant la conservation

Les résultats obtenus ont fait l'objet d'un article publié dans la revue *Journal of Water Resource and Protection*.

Aminata KABORE, Boubacar SAVADOGO, Harmonie OTOIDOBIGA, Adama SAWADOGO, Francis ROSILLON, Alfred S. TRAORE, Dayéri DIANOU (2015), Microbiological quality of water treated with *Moringa oleifera* seeds or cakes during the storage: Case study of water reservoir of Loumbila, Ziga and Ouaga 3 dams in Burkina Faso, *Journal of Water Resource and Protection*, 2015, 7, 312-321p. doi: 10.4236/jwarp.2015.74025, Published Online March 2015. <http://www.scirp.org/journal/jwarp>.

Introduction

Afin de définir les conditions optimales de conservation des eaux traitées aux graines et aux tourteaux de *Moringa oleifera*, l'évolution des indicateurs microbiens de pollution fécale a été suivie dans les eaux traitées de trois sites. Les échantillons d'eau traités ont été conservés à température ambiante et à 4°C et les indicateurs microbiens dénombrés chaque 24 h durant 72 h.

1. Caractéristiques microbiologiques des eaux traitées aux graines et aux tourteaux de *Moringa oleifera*

Les moyennes des indicateurs microbiens dans les échantillons d'eaux traités avec les graines et les tourteaux de *Moringa oleifera* sont présentées dans le tableau XIII.

Tableau XIII: Moyennes des concentrations des coliformes fécaux, *E. coli*, entérocoques dans les eaux de Loumbila, Ouaga 3 et Ziga, traitées avec les tourteaux (1) et les graines de *Moringa oleifera* (2) (Kaboré *et al.*, 2015).

site	Traitement	Coliformes fécaux (UFC/100 ml)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	Entérocoques (UFC/100 ml)
Loumbila	NT	93 ^c	43 ^b	23 ^b
	1	13 ^{ab}	5 ^a	3 ^a
	2	3 ^a	1 ^a	2 ^a
Ouaga3	NT	150 ^c	73 ^c	10 ^a
	1	27 ^{abc}	13 ^{ab}	3 ^{ab}
	2	10 ^a	6 ^a	1 ^a
Ziga	NT	100 ^c	53 ^b	30 ^b
	1	24 ^{bc}	7 ^{ab}	4 ^a
	2	17 ^a	3 ^a	3 ^a
Norme (OMS, 2011)	0	0	0	0

Pour chaque colonne, les valeurs ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman Keuls au seuil 5%.

NT : Non Traité

Tout comme dans les études antérieures (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013b ; 2013c), les traitements aux graines et aux tourteaux de *Moringa oleifera* ont réduit significativement les indicateurs microbiens dans les eaux (tableau XIII). Toutefois, dans cette partie de l'étude, les abattements microbiens obtenus après les différents traitements aux conditions optimales ont été inférieurs comparativement aux précédents (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013b ; 2013c). Cette différence est liée aux caractéristiques initiales des eaux brutes (période d'échantillonnage

différente) qui influe significativement sur les conditions et l'efficacité des traitements, comme démontré précédemment (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013b ; 2013c).

2. Effet de la température et de la durée de conservation sur la qualité microbiologique des eaux traitées aux graines et tourteaux de *Moringa oleifera*.

L'analyse de variance indique que la teneur des indicateurs microbiens durant la conservation varie en fonction des traitements ($p < 0,0001$), de la température ($p < 0,0001$) et de la durée de conservation ($p < 0,0001$). Pour tous les échantillons d'eau confondus, les coliformes fécaux, *E. coli* et les entérocoques ont augmenté en fonction de la température et de la durée de conservation ($p < 0,0001$). Les indicateurs microbiens augmentent avec la durée de conservation respectivement (46, 71 et 95 UFC/100 ml, pour 24, 48 et 72 heures). En outre, il apparaît également que les concentrations microbiennes sont plus élevées dans les eaux conservées à température ambiante (82 UFC/100 ml) qu'à 4°C (36 UFC/100 ml). Les figures 14, 15 et 16 présentent respectivement les moyennes des indicateurs microbiens dans les eaux de Loumbila, Ouaga 3 et Ziga, traitées avec les coagulants de graines et de tourteaux de *Moringa oleifera* en fonction de la température et de la durée de conservation comparativement aux échantillons non traités.

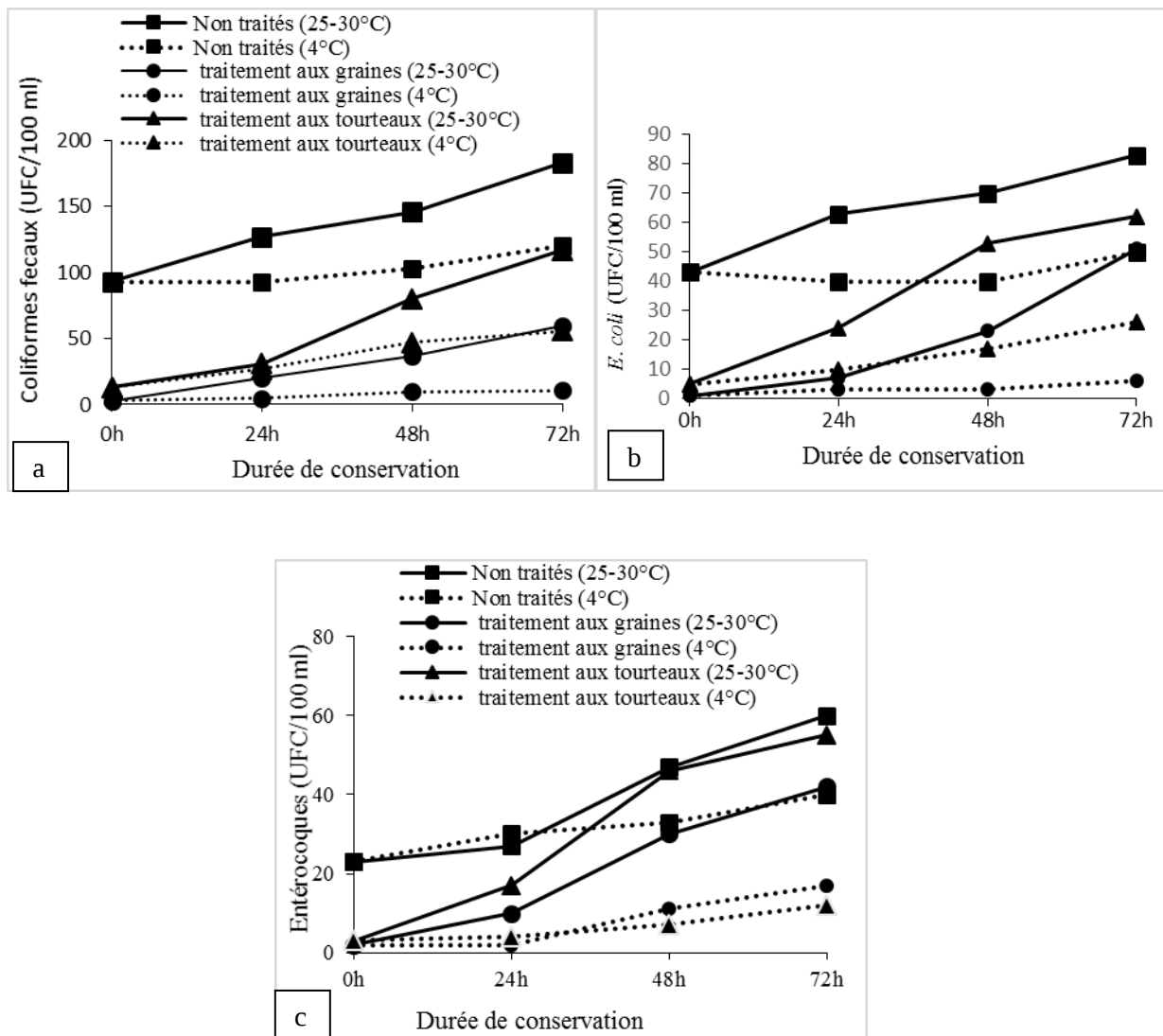


Figure 14: Evolution des coliformes fécaux (a), *E. coli* (b), entérocoques (c) dans les échantillons d'eau de Loumbila non traités et traités aux graines ou aux tourteaux de *Moringa oleifera* en fonction de la durée et de la température de conservation (Kaboré *et al.*, 2015).

Pour ces échantillons d'eau de Loumbila traités aux coagulants de graines de *Moringa oleifera* et conservées à la température ambiante (25-30°C), les coliformes fécaux ont augmentés respectivement de 17, 34 et 57 UFC/100 ml durant 24, 48 et 72 heures (figure 14a). Pour les mêmes durées de conservation, l'accroissement de *E. coli* était respectivement de 6, 22 et 50 UFC/100 ml et de 8, 28 et 40 UFC/100 ml pour les entérocoques (figures 14b, 14c). Pour les mêmes échantillons d'eau traités aux tourteaux et conservés dans les mêmes conditions un accroissement de 18, 67 et 104 UFC/100 ml a été observé pour les coliformes fécaux ; 19, 48 et 57 UFC/100 ml pour *E. coli* et 14, 43 et 52 UFC /100 ml pour les entérocoques respectivement pour 24, 48 et 72 heures de conservation (figures 14a, 14b, 14c).

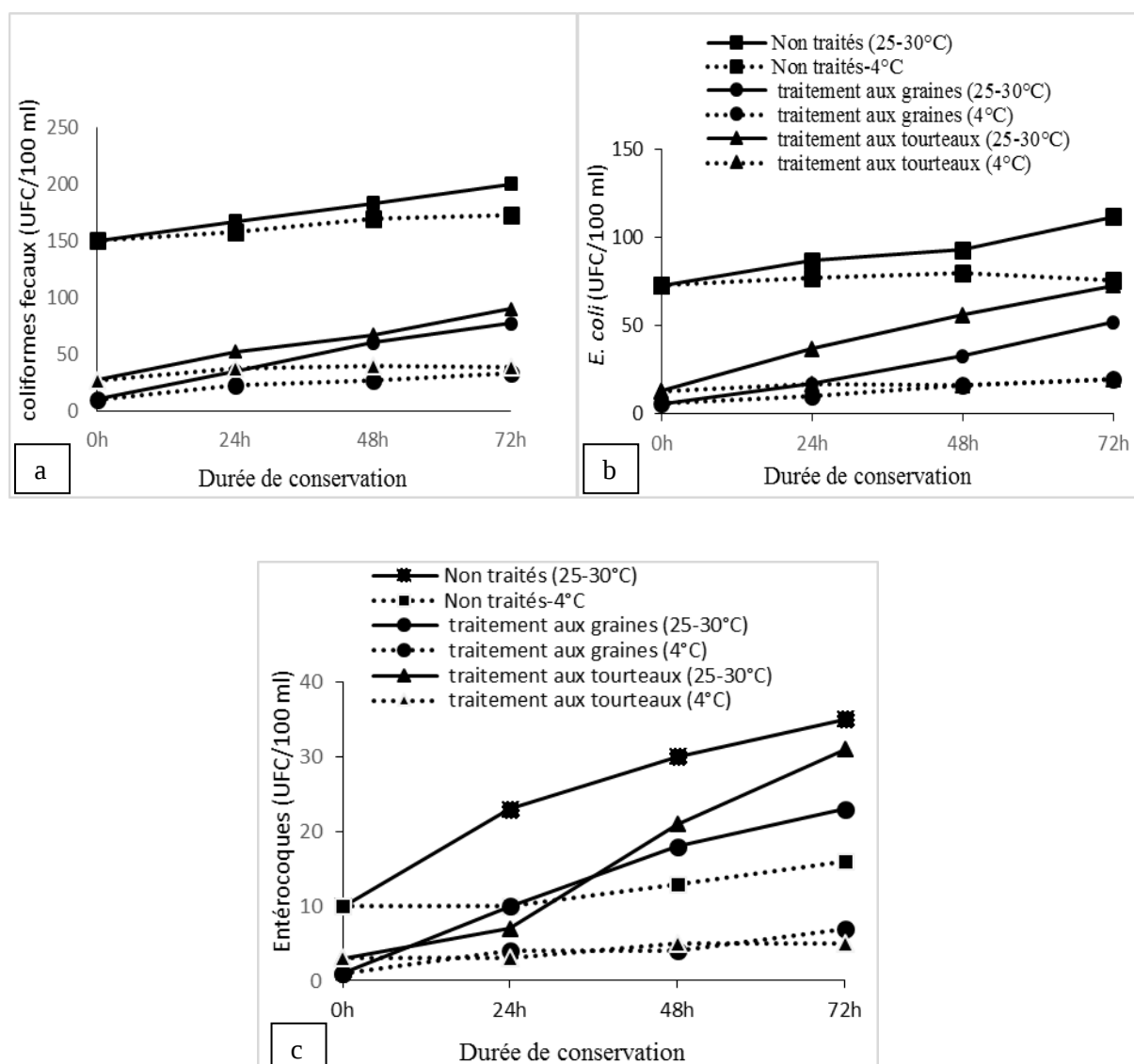


Figure 15: Evolution des coliformes fécaux (a), *E. coli* (b), entérocoques (c) dans les échantillons d'eau de Ouaga 3 non traités et traités aux graines ou aux tourteaux de *Moringa oleifera* en fonction de la durée et de la température de conservation (Kaboré *et al.*, 2015).

En ce qui concerne les échantillons d'eau de Ouaga 3 traités aux coagulants de graines de *Moringa oleifera* et conservées à la température ambiante (25-30°C), une augmentation de 25, 40 et 67 UFC/100 ml a été observée pour les coliformes fécaux respectivement pour 24, 48 et 72 heures de conservation (figure 15a). Pour les mêmes durées de conservation, *E. coli* a augmenté de 11, 27 et 46 UFC/100 ml et les entérocoques de 9, 17 et 22 UFC/100 ml, respectivement (figures 15b, 15c). Pour le traitement aux tourteaux de *Moringa oleifera*, les coliformes fécaux ont augmenté de 25, 50 et 63 UFC /100 ml, *E. coli* de 24, 43 et 60 UFC /100 ml et les entérocoques de 14, 20 et 28 CFU/100 ml respectivement pour 24, 48 et 72 heures de conservation à température ambiante (25-30°C) (figures 15a, 15b, 15c).

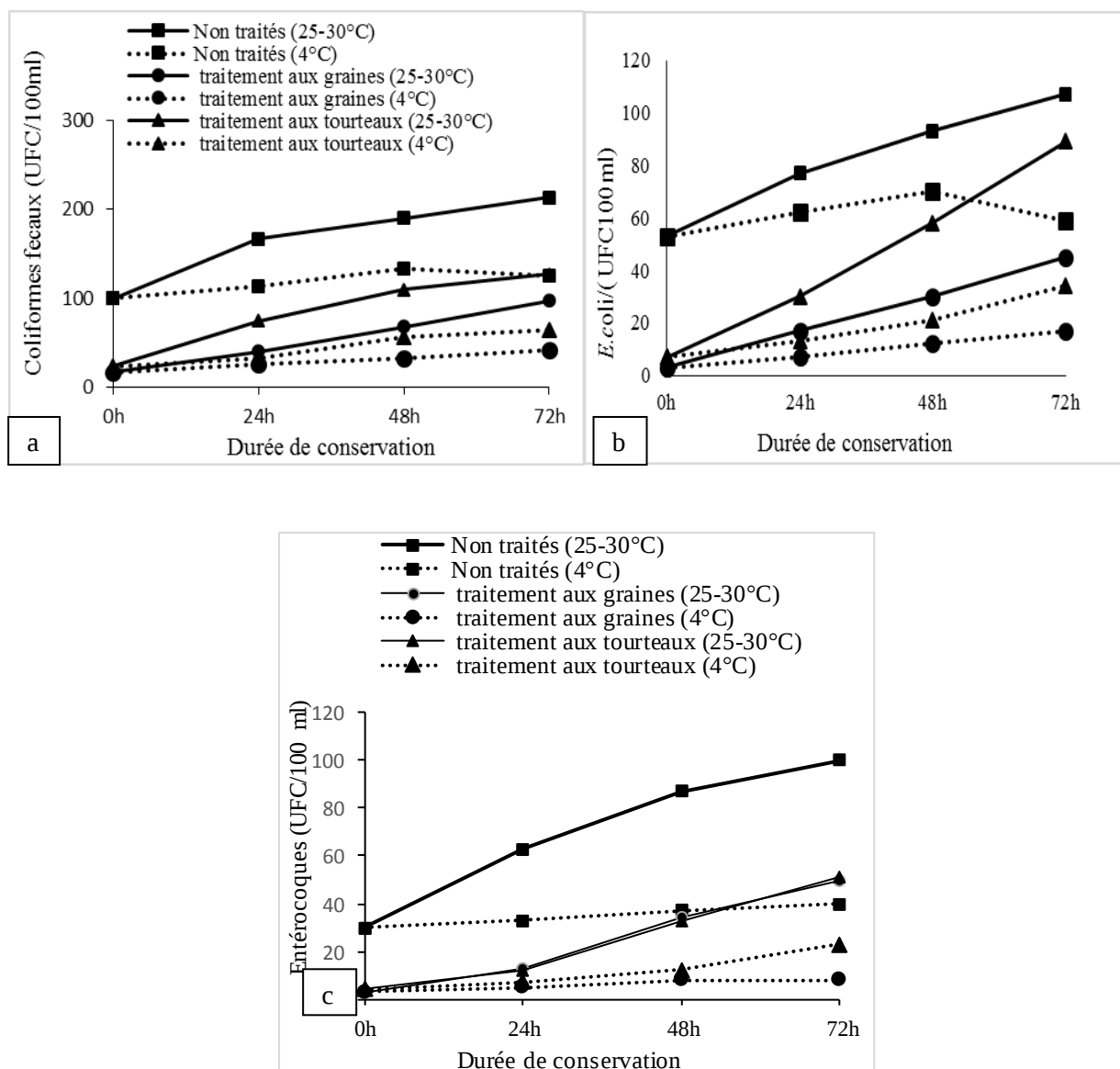


Figure 16: Evolution des coliformes fécaux (a), *E. coli* (b), entérocoques (c) dans les échantillons d'eau de Ziga non traités et traités aux graines ou aux tourteaux de *Moringa oleifera* en fonction de la durée et de la température de conservation (Kaboré *et al.*, 2015).

Pour les échantillons de Ziga traités aux graines de *Moringa oleifera* et conservés à température ambiante, les coliformes fécaux ont augmenté de 23, 51 et 80 UFC/100 ml respectivement pour 24, 48 et 72 heures de conservation (figure 16a). Pour les mêmes durées de conservation, *E. coli* a augmenté de 14, 27 et 42 UFC/100 ml et les entérocoques de 10, 31 et 47 UFC/100 ml, respectivement (figures 16b, 16c). Pour les mêmes échantillons d'eau traités aux tourteaux de *Moringa oleifera* et conservés dans les mêmes conditions, un accroissement de 51, 86 et 103 UFC/100 ml a été observé pour les coliformes fécaux ; 23, 51 et 82 UFC/100 ml pour

E. coli et 8, 29 et 47 UFC /100 ml pour les entérocoques respectivement pour 24, 48 et 72 heures de conservation (figures 16a, 16b, 16c). Aucun parasite n'a été dénombré dans les eaux traitées.

Il ressort également que la conservation à 4°C ralentit la prolifération microbienne dans les eaux traitées. Ainsi, une prolifération bactérienne n'est significative qu'après 48 heures de conservation (Figures 14, 15, 16).

Sur un plan d'ensemble, il ressort que la qualité microbiologique des eaux traitées se dégrade durant la conservation en fonction du traitement et de la température. Cette dégradation de la qualité microbiologique des eaux traitées serait due à la présence d'éléments nutritifs induits par les coagulants de *Moringa oleifera* dans les eaux traitées comme l'ont démontré nos études précédentes (Kaboré *et al.*, 2013a ; 2013b ; 2013c). Toutefois, il ressort que la prolifération microbienne est plus prononcée dans les eaux traitées aux tourteaux comparativement aux graines de *Moringa oleifera*. En se référant à d'autres études, cela pourrait être dû à l'effet des agents antimicrobiens contenus dans les matières grasses des graines de *Moringa oleifera* (30%) qui possèdent des propriétés bactéricides (Nilani *et al.*, 2012 ; Kam, 2012).

Le suivi de la qualité microbiologique des eaux brutes dans les mêmes conditions a montré également une prolifération microbienne dans ces eaux, probablement due à la présence de matières organiques. Cette prolifération microbienne est plus significative dans les eaux brutes comparativement à celles traitées aux graines et aux tourteaux de *Moringa oleifera*. Ainsi, la qualité microbiologique des eaux traitées aux graines ou aux tourteaux de *Moringa oleifera* est meilleure durant la conservation, comparativement à celle des eaux brutes (Figures 14, 15, 16). Cela pourrait également s'expliquer par les propriétés antibactériennes des graines de *Moringa oleifera*. Ainsi, les eaux traitées aux *Moringa oleifera* doivent être conservées à basse température et consommées avant 24 heures. Cependant, la conservation de l'eau à 4°C est difficile à réaliser en milieu rural. Ainsi, une conservation dans des pots en terre (canari) au frais peut être envisagée comme cela est courant en milieu rural.

A l'issue de l'optimisation et de la détermination des conditions optimales de traitement et de conservation des eaux traitées aux graines et aux tourteaux de *Moringa oleifera*, il est important d'évaluer le coût et l'accessibilité de ces traitements pour une meilleure promotion de la technologie. La quatrième partie de notre étude a été consacrée à cette analyse.

Partie 4

Coût et accessibilité des traitements au *Moringa* et au sulfate d'alumine

1. Accessibilité et intérêt de l'utilisation des graines de *Moringa oleifera* dans la purification des eaux comparativement au sulfate d'alumine.

Moringa oleifera est surtout connue au Burkina Faso comme complément alimentaire pour vaincre la malnutrition à cause de la forte valeur nutritive de ses feuilles. Aussi, ses nombreuses vertus, la facilité avec laquelle cette plante peut être cultivée et l'opportunité de générer de nouveaux revenus, ont amené les populations ainsi que plusieurs associations à s'impliquer dans la promotion et la culture de *Moringa oleifera* au Burkina Faso. Ainsi, *Moringa oleifera* est présente sur l'ensemble du territoire Burkinabè soit au niveau domestique, en milieu naturel, avec une concentration élevée en zone sud soudanienne notamment dans les régions des Hauts bassins, Cascades, Sud-Ouest, Est, Boucle du Mouhoun....(figure 17) et au niveau de plantations mises en place (Yako, Fada, Ouahigouya, Pô....) par des groupements de producteurs.

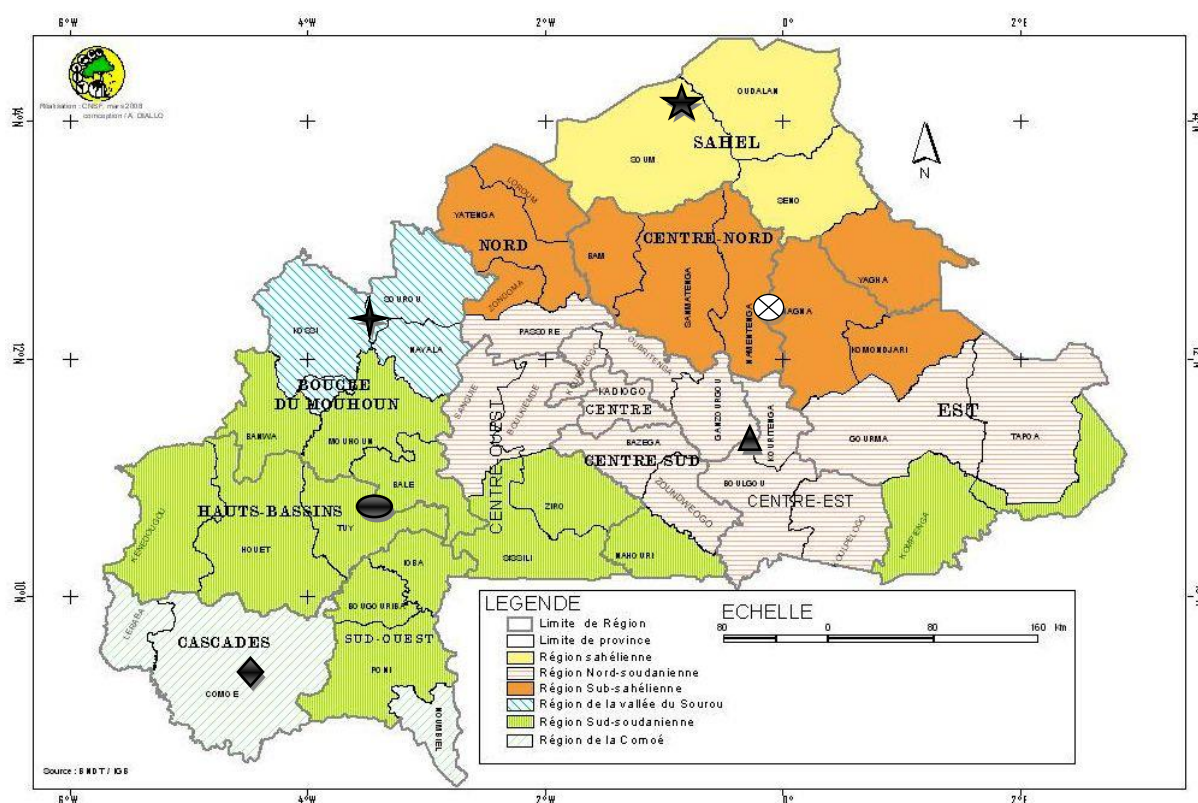


Figure 17 : Répartition géographique de *Moringa oleifera* au Burkina Faso (source : CNSF, 2015). Régions de : Sahel (★), Sub Sahélienne (⊗), Nord Soudanienne (▲), Comoe (◆), vallée du Sourou (★), Sud-Soudanienne (●).

L'intérêt croissant pour le *Moringa oleifera* au Burkina Faso s'est également traduit au plan national par « le projet *Moringa* » initié par le Ministre de la Recherche Scientifique et de

l'Innovation, financé par le Ministère de la Jeunesse et de l'Emploi à travers son Programme Spécial de Création d'Emploi (PSCE) pour favoriser l'approche associative de la jeunesse. Des techniques culturales ont été développées par le Centre National de Semences Forestières (Annexe 1) et un site expérimental de la culture a été mis en place au sein de la station de recherche de Kamboinsé (18 km environ à l'ouest de Ouagadougou) (Annexe 2). Cette expérimentation a conduit à la culture de près de 2196 pieds de *Moringa* sur une superficie de 2,5 ha. Le « projet *Moringa* » a vu l'adhésion de plusieurs associations œuvrant dans la culture, la promotion et la commercialisation des produits de *Moringa oleifera* au Burkina Faso (Lamizana, 2014).

La plante de *Moringa oleifera*, outre son accessibilité et sa non toxicité, permet à moindre coût la purification des eaux de consommation. En outre, elle offre des activités génératrices de revenus dans les domaines alimentaire, médicinal, cosmétique,..... Dans de bonnes conditions, *Moringa oleifera* peut fleurir et fructifier entre 1-2 ans et la récolte des graines peut se faire 2 fois par an (Bosch, 2004 ; CNSF, 2015). Le rendement en graines d'un arbre de 4 ans est d'environ 3,3 kg (Bosch, 2004). Les graines séchées naturellement sur les arbres et non décortiquées se conservent dans des endroits propres et secs pendant plusieurs mois. L'utilisation des tourteaux de *Moringa* dans le traitement des eaux pourrait engendrer des revenus substantiels au profit des populations du fait que l'huile de *Moringa oleifera* est très prisée sur le marché local (30 000 FCFA/L selon Kam, 2012) et international. Les tourteaux de *Moringa oleifera* sont obtenus de manière artisanale avec une presse disponible auprès des producteurs de beurre de karité et se fait sans décortilage ce qui réduit la charge de travail.

Contrairement à la plante de *Moringa oleifera*, l'inconvénient majeur du traitement au sulfate d'alumine se pose en termes d'accessibilité sur le marché local (très peu disponible) ainsi que sa toxicité car son utilisation requiert des dosages précis. L'élimination des déchets nécessite également des précautions particulièrement difficiles à mettre en œuvre par les populations vivant en milieu rural du fait de leur faible niveau d'alphabétisation. En outre, le coût de cette substance rend également son utilisation peu avantageuse. En effet, le prix du kilogramme de sulfate d'alumine est compris entre 2500 - 3500 FCFA auprès de fournisseurs agréés.

2. Estimation du coût de traitements

Sur la base des résultats de cette étude, une estimation des quantités de graines et de tourteaux nécessaires pour traiter 1L d'eau en fonction de la turbidité initiale a été réalisée. Les quantités de poudre de *Moringa oleifera* doivent être déterminées en fonction de la turbidité des

eaux à traiter. Un surdosage aura pour conséquence d'affecter la qualité organoleptique de l'eau traitée. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XIV.

Tableau XIV: Quantités moyennes de graines et de tourteaux de *Moringa oleifera* nécessaires pour traiter 1L d'eau brute

Turbidité initiale	Quantité de graines de <i>Moringa oleifera</i>	Quantité de tourteaux de <i>Moringa oleifera</i>
≤ 50 NTU	0,2-0,3g	0,1-2g
50 NTU ≥ Turbidité ≤ 200 NTU	0,3-0,7g	0,2-0,7g
200 NTU ≥ Turbidité ≤ 1000 NTU	0,8-2g	0,7-1,5g
Turbidité ≥ 1000 NTU	2-10g	1,5-10g

Une estimation du coût de traitement d'un (1) m³ d'eau avec les graines de *Moringa oleifera* et au sulfate d'alumine (protocole de l'ONEA) qui prend en compte la turbidité initiale et les concentrations de coagulant a été réalisée. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XV.

Tableau XV : Coût estimatif des traitements de 1m³ d'eau aux graines de *Moringa oleifera* et au sulfate d'alumine

Coût	<i>Moringa oleifera</i>	Sulfate d'alumine
Kg de matière	300-500 FCFA (CNSF)	2500-3500 FCFA
Traitement de 1m³ d'eau	25 - 300 FCFA	100 - 750 FCFA

Pour le traitement des eaux avec les graines de *Moringa oleifera*, l'estimation du prix des graines a été faite sur la base du prix d'achat du Centre National de Semences Forestières (CNSF) aux populations vivant en milieu rural. Après conditionnement, les graines sont revendues à 18 000 FCFA/Kg au CNSF au profit des populations urbaines.

En milieu rural, il est relativement facile d'acquérir les graines de *Moringa oleifera* du fait de la disponibilité des plantes. Par contre, l'accès aux tourteaux qui nécessite une presse n'est pas à la portée de tous. Pour pallier à cette insuffisance, il est nécessaire de développer et de mieux structurer les filières de commercialisation des produits de *Moringa oleifera* notamment de la production d'huile, encore rare au Burkina Faso où seules quelques associations et

groupements de producteurs s'y intéressent. L'implication des populations à ces activités permettra la mise à disposition des tourteaux de *Moringa oleifera*.

En somme, il ressort que l'utilisation des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de consommation présente de nombreux avantages en termes d'accessibilité, de coût et des revenus qu'elle peut engendrer au profit des populations vivant en milieu rural.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La problématique de l'accès à l'eau potable représente un défi majeur à relever dans les PED pour l'amélioration de la santé et le développement socio-économique des populations. La recherche de méthodes appropriées de purification des eaux de consommation au niveau domestique a justifié la mise en œuvre de la présente étude, dont l'objectif était d'évaluer et d'optimiser les performances épuratoires des graines de *Moringa oleifera* et de définir les conditions optimales de traitement et de conservation des eaux traitées. Il s'agissait de déterminer les conditions optimales de traitements des eaux en fonction de leurs caractéristiques initiales, de comparer les performances épuratoires des tourteaux obtenus par pression à froid avec celles des graines, d'évaluer l'effet des traitements sur des paramètres physicochimiques et microbiologiques d'intérêt sanitaire, de déterminer les conditions optimales de conservations de l'eau traitée et enfin de comparer l'efficacité, le coût et l'accessibilité des traitements par les graines de *Moringa oleifera* à la méthode classique de la floculation-sédimentation utilisant le sulfate d'alumine.

Sur un plan d'ensemble, ces travaux de recherche, ont permis d'enrichir les connaissances sur les qualités épuratoires des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux ainsi que sur les conditions optimales de traitement au regard de leur caractéristiques initiales. L'utilisation des tourteaux des graines obtenus après l'extraction de la matière grasse à froid a permis d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques et organoleptiques des eaux traitées. Les conditions optimales de conservation des eaux traitées ont également été définies après la mise en évidence d'une prolifération bactérienne durant le stockage. Toutefois, il n'a pas été possible de déterminer une méthode permettant de réduire les matières organiques résiduelles dans certaines eaux traitées ce qui aurait eu pour effet une meilleur conservation de la qualité de l'eau. L'étude a fait également ressortir l'intérêt, la disponibilité et l'accessibilité des traitements aux graines de *Moringa oleifera* en milieu rural comparativement à la méthode chimique utilisant le sulfate d'alumine.

Cette recherche constitue un premier travail exploratoire qui ouvre la voie vers des essais de formulation d'un nouveau processus de traitement des eaux par la coagulation-floculation avec les graines de *Moringa oleifera* en milieu rural. En effet, bien que cette technique soit très efficace, accessible et à moindre coût, son application se trouve confrontée à quelques difficultés, notamment la quantité exacte de coagulant à utiliser (qui doit être déterminée en fonction des eaux) et la stabilité des paramètres microbiologiques à long terme.

Des perspectives sur le plan de la recherche s'ouvrent pour la suite du travail à réaliser :

- ✓ mettre en évidence la corrélation entre l'abatement de la turbidité et celui des indicateurs microbiens ;
- ✓ réévaluer l'effet des traitements sur les kystes/œufs parasites en utilisant de volumes plus importants d'eau ;
- ✓ déterminer une méthode permettant de réduire les matières organiques résiduelles dans les eaux traitées aux graines de *Moringa oleifera* ;
- ✓ suivre l'évolution de la qualité de l'eau stockée dans des dispositifs traditionnels comme des canaris en terre ;
- ✓ déterminer et évaluer l'effet de la coagulation floculation avec les graines de *Moringa oleifera* sur d'autres substances chimiques polluantes, notamment l'arsenic et le mercure ;
- ✓ déterminer et évaluer l'effet des traitements aux graines de *Moringa oleifera* sur les virus pathogènes contenus dans les eaux ;
- ✓ étendre la recherche sur la phytoremédiation de la pollution chimique de l'environnement avec des protéines purifiées de *Moringa oleifera* du fait de leur capacité à se lier aux métaux (Kwambwa *et al.*, 2015).

Au Burkina Faso, il est primordial de mieux faire connaître les propriétés épuratoires des graines de *Moringa oleifera* dans la purification des eaux en milieu rural, jusque-là méconnues par une grande partie de la population à travers des activités d'information et en s'appuyant sur les sciences sociales. De ce fait, pour faciliter l'adoption et l'application de cette technique en milieu rural certaines actions pourraient être envisagées :

- ✓ vulgariser la culture du *Moringa* principalement dans les régions à faible couverture d'infrastructures hydrauliques pour un approvisionnement continu en graines ;
- ✓ encourager et financer les activités génératrices de revenus autour du *Moringa* notamment la transformation des graines en huile qui permettra l'approvisionnement permanent en tourteaux ;

- ✓ réaliser des sessions de formation sur la technique de traitement des eaux avec les graines de *Moringa oleifera* sur différentes périodes afin de redéfinir les conditions de traitement selon les eaux brutes à traiter ;
- ✓ installer de petites stations pilotes de traitement des eaux utilisant les graines de *Moringa oleifera* dans ces régions impliquant les populations.

Toutes ces activités de sensibilisation des populations, combinées à l'amélioration des connaissances scientifiques relatives au traitement de l'eau par les graines de *Moringa oleifera*, dont l'apport de la présente thèse, contribueront à fournir des éléments de réponse performants face à la problématique de l'accès à une eau de qualité en milieu rural africain.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ali E.N. (2010). Application of *Moringa* Seeds Extract in Water Treatment; PhD Thesis; Department of Biotechnology Engineering, International Islamic University, Kuala Lumpur, Malaysia.

Aouba S. (2012). Indicateurs empiriques du développement humain durable : cas de l'accès à l'eau potable dans la commune rurale de Saaba au Burkina Faso. Mémoire de Maîtrise en Macroéconomie et gestion de Développement, USTA, Ouagadougou, Burkina Faso, 50 p.

Banque Mondiale (2009). Indicateurs de développement dans le monde. <http://donnees.banquemondiale.org/pays/burkina-faso>

Batenbaum J.C. (2012). Synthèse de l'Association Santé Environnement sur la pollution de l'eau. Forum Mondial de l'Eau (2012).

Belem B., Yago E.L. (2003). Le *Moringa* : une plante dont les graines purifient l'eau. *Environnement* : 21, 19p.

Berger M.R., Habs M., John S.A.A., Schmahi D. (1984). Toxicological assessment of seeds from *Moringa oleifera*/jeters and *M. Stenopetala* two efficient primary coagulants for domestic water treatment of tropical waters. *East African Med. Jr* . Sept., 712-716p.

Bichi M.H., Agunwamba J.C., Muyibi S.A., Abdulkarim M.I. (2012a). Effect of extraction method on the antimicrobial activity of *Moringa Oleifera* Seeds Extract. *Journal Am. Sci.* 8(9):450-458]. (ISSN: 1545-1003).

Bina L.J., Prasai T., Singh A., Yami K.D. (2009). Assessment of drinking water quality of Madhyapur-Thimi and study of antibiotic sensitivity against bacterial isolates. *Nepal Journal of Science and Technology*, Vol. 10, 2009, 167-172p.

Bopp C.A., Brenner F.W., Wells J.G., Strockbine N.A. (1999). *Escherichia*, *Shigella* and *Salmonella*. In Murray, PR, EJ Baron, MA Pfaller, FC Tenover et RH Tenover, éditeurs, Manual of clinical microbiology, 7e édition, American Society for Microbiology Press, p: 459-474p.

Bosch C.H. (2004). *Moringa oleifera* Lam. In: Grubben G.J.H. & Denton O.A. (Éds). PROTA 2: Vegetables/Legumes. [CD-ROM]. PROTA, Wageningen, Pays Bas.

Bradley D. (1994). Health, environment and tropical development, In: Cartledge B. ed. Health and the environment: The Linacre lectures 1992-3. Oxford, Oxford University Press, 126-149p.

Broin M., Santaella C., Cuine S., Kokou K., Peltier G., Joët T. (2002). Flocculants activity of a recombinant protein from *Moringa oleifera* Lam. seeds. *Appl. Microbiol Biotechnol.* 60, 114-119p.

Bukar A., Uba A., Oyeyi T.I. (2010). Antimicrobial Profile of *Moringa oleifera* Lam. extracts against some Food-borne Microorganisms. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(1): 43-48p.

CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology) (2010). Manuel du filtre bio sable, conception, construction, installation, fonctionnement et entretien.

CAWST (2011). Introduction to household water treatment and safe storage (2012). Household Water Treatment and Safe Storage (HWTS) in Emergencies, Technical brief.

CEAEQ (Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec) (2000). Recherche et dénombrement des coliformes totaux, méthode par filtration sur membrane. Gouvernement du Québec, 25 p.

CNRS (Centre National de Recherche Scientifique) (2014). Dégradations : Pollution par les nitrates. http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/degradation/07_pollution.htm.

CNSF (Centre National de Semences Forestières) (2015). Carte phytogéographique du Burkina Faso.

CPEPESC (Commission de Protection des Eaux, du Patrimoine, de l'Environnement, du Sous-Sol et des Chiroptères) (2010). Les paramètres physiques et chimiques des eaux. <http://www.cpepesc.org/Les-principaux-parametres.html>.

AMCOW (Conseil des ministres africains en charge de l'eau) (2006). Etat des lieux Approvisionnement en eau potable et assainissement au Burkina Faso : Traduire les financements en services à l'horizon 2015 et au-delà, 36p.

Craun G., Berger P., Calderon R. (1997). Coliforms bacteria and water born diseases outbreaks, *Journal of the American water works Association*, 89(3), 96-104p.

Davidson J., Myers D., Chakraborty M. (1992). No time to waste: Poverty and the global environment. Oxford, Oxfam, 217p.

Degrémont (2005). Memento technique de l'eau. Degrémont. France, 785 p.

Desjardins R. (1997). Le traitement des eaux. Édition de l'École Polytechnique de Montréal. Montréal. 304 p.

Dewolf M. (1986). Boiling Drinking Water: A critical look, *Water lines*, Vol. 5, n°1, IT Publications, London.

Diallo A.M. (2008). Intégration des connaissances, pratiques et espèces indigènes dans la lutte contre les invasions biologiques et l'amélioration des ressources en eau et de leur qualité: cas du bassin versant du barrage de Tinkisso et de sa forêt humide sincéry-ourssa à Dabola (guinée Conakry), Thèse de doctorat en Science de l'Environnement, Université du Québec, Montréal.

Dianou D., Poda J.N., Sorgho H., Wango S.P., Sondo K.B. (2003). Hydraulic planning and schistosomiasis: Case of Sourou in Burkina Faso. *J. Appl. Res. Vet. Med.*, 1, 105-111p.

Dianou D., Poda J.N., Savadogo L.G., Sorgho H., Wango S.P., Sondo K.B. (2004). Parasitoses intestinales dans la zone du complexe hydroagricole du Sourou au Burkina Faso. *Vertigo*, 5, 1-8p.

Dianou D., Savadogo B., Zongo D., Zougouri T., Poda J.N., Bado H., Rosillon F. (2011). Qualité des eaux de surface dans la vallée du Sourou : cas des rivières Mouhoun, Sourou, Débé et Gana au Burkina Faso, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 5, No.4, pp. 1571-1589.doi:10.1016/j.watres.2010.07.032.

Dundas S., Todd W.T.A. (2000). Clinical presentation, complications and treatment of infection with verocytotoxin producing *Escherichia coli*; challenges for the clinician. *Journal of Applied Microbiology*, 88, 24-30p.

Edberg S., Rice W., Karlin R., Allen M. (2000). *Escherichia coli*, total coliforms and fecal coliforms population as indicators of wastewater treatment efficiency, *Water Environment, Res.*, 71, 332-339p.

Eilert U. (1978). Antibiotic principles of seeds of *Moringa oleifera*. *Indian Medical Journal* 38 (235): 1013-1016 p.

Eilert U., Wolters B., Nahrstedt P. (1981). The antibiotic principle of *Moringa oleifera* and *Moringa stenopetala* *Plant Medica.*, 2, 55-61p.

Elmund G.K, Allen M.J., Rice E.W. (1999). Comparison of *Escherichia coli*, total coliforms and fecal coliforms populations as indicators of wastewater treatment efficiency. *Water Environ. Res.*, 71, 332-339p.

EPA (Environmental Protection Agency) (2000a). Wastewater Technologies Fact Sheet, Chemical Precipitation, EPA 832-F-00-018, September 2000, 8p.

European Union's Drinking Water Standards (1998). Council Directive 98/83/EC on the Quality of Water Intended for Human Consumption, Geneva, 1998.

Faby J. A., Eleli A. (1993). Utilisation de la graine de *Moringa*, essais de floculation au laboratoire et en vraie grandeur. CIEH/EIER/Oieau, Série hydraulique urbaine et assainissement, 132p.

Fahey J.W., Haristoy X., Dolan P.M., Kensler T.W., Scholtus I. Stephenson L.K., Talalay P., Lozniewski A. (2002). Sulforaphane inhibits extracellular, intracellular and antibiotic-resistant strains of *Helicobacter pylori* and prevents benzopyrene-induced stomach tumors; Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 99, 7610-7615 p.

Fahey J.W., Zalcmann A.T., Talalay P. (2001). The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry* 56(1), 5-51. [corrected: *Phytochemistry* 59, 237].

Fatombi J. K., Josse R.G., Mama D., Aminou T. (2009). Étude de l'activité floculante de la caséine acide extraite de la crème de *Cocos nucifera* dans la clarification des eaux de surface *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science* Vol. 22, 1, 2009, 93-101p.

Fisch F., Suarez M., Mermoud N. (2004). Flo antibacterial peptide from the tropical tree *Moringa oleifera*: A template for novel antibacterial agents; University of Lausanne, Lausanne, February 2004.

Folkard G., Sutherland J. (1992). Development of robust water treatment systems incorporating natural coagulants. Field study report, January-March 1992, 16p.

Folkard G., Sutherland J. (2002). Development of a naturally derived coagulant for water and wastewater treatment. *Water Suppl.*, 2, 89-94p.

Folkard G., Sutherland J., Grant W.P. (1989). Optimization on the use of natural coagulants for water purification; Technical report N° R4254, Department of Engineering, University of Leicester.

Folkard G. (1997). The development of the *Moringa oleifera* and *stenopetala* tree to provide valuable products: coagulant for water and wastewater treatment and vegetable oil, Report in European Commission, Research project N° TS3 CT94-0309, 1995-1997.

Folkard G., Sutherland J., Al-Khalili R.S. (2002). La clarification de l'eau par coagulation en utilisant les graines du *Moringa oleifera*. In: L. Fuglie, 2002. L'arbre de la vie, les multiples usages du *Moringa*. CWS/CTA, Dakar, Sénégal, 79-82p.

Gamage J., Zhang Z. (2010). Application of photocatalytic disinfection, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2010, Article ID764870.

Gassenschmidt U., Jany K.K., Tauscher B., Niebergall H. (1995). Isolation and characterization of a flocculation protein from *Moringa oleifera* Lam. *Biochemical and Biophysical Acta* 1243, 477-481p.

Gleick P.H. (2004). World's Water 2004-2005, Island Press, Washington, 1p.

G.S.E. (Groupe Scientifique de l'Eau) (2002). Entérocoques et Streptocoques fécaux: Dans Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine, Institut National de Santé Publique du Québec, 5p.

Grabow W., Slabbert J.L., Morgan W.S.G., Jahn S.A.A. (1985). Toxicity and mutagenicity evaluation of water coagulated with *Moringa oleifera* seed preparations using fish, protozoan, bacterial, coliphage, enzyme and Ames Salmonella assays. *Water SA, Il* (1), 9-14p.

Goldberg S.J., Lebowitz D., Graver E., Hicks S. (1990). An association of human congenital cardiac malformations and drinking water malformation, *J. Am. Coll. Card.*, 16, 155-164p.

HCEFLCD (Haut-Commissariat aux Eaux et Forêt et la Lutte Contre la Désertification) (2006). Etude sur la pisciculture au barrage Almassira, CHAFAAI, Cercle d'ELBROUGE, Province de Settat, 201p.

EAWAG (Institut fédéral suisse pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux) (2005). Désinfection solaire de l'eau guide pour l'application de SODIS, Duebendorf, Avril 2005, 84p.

Jahn S.A.A. (2001). Drinking water from Chinese rivers: challenge of clarification. *Journal of water supply: Research and Technology AQUA*, 50, 1, 15-27p.

Jahn S.A.A. (1989a). Synopsis on natural coagulants for water treatment. In: Proceedings of international seminar on the use of natural coagulants for water treatment, Yogyakarta, 2-7 October 1989, Indonesia, 1-25p.

Jahn S.A.A. (1989b). Différents rôles des coagulants naturels dans la clarification de l'eau dans les technologies appropriées à usage domestique et dans les installations communales d'épuration, In : Proceedings of international seminar on the use of natural coagulants for water treatment, Yogyakarta, 2-7 October 1989, Indonesia, 1-11p.

Jahn S.A.A. (1988a). Using *Moringa oleifera* Lam. seeds as coagulant in developing countries. *Journal of the American Water Works Association*, Vol. 6, 80, 43-50p.

Jahn, S.A.A. (1988b). Chemotaxonomy of flocculating plant materials and their application for rural water purification in developing countries. *Acta Univ. Ups. Symb. Bot. Ups.* XXVIII (3): 171-185p. Uppsala, ISBN 91-554-2348-5.

Jahn S.A.A. (1986). Proper use of African natural coagulants for rural water supplies- Research in the Sudan and guide to new projects; GTZ Manual N°.191.

Jahn S.A.A. (1984). Effectiveness of traditional flocculants as primary coagulants and coagulant aids for the treatment of tropical raw water with more than a thousand-fold fluctuation in turbidity. Document présenté en la 153 Conférence Internationale de l'Association Internationale de Distribution de Agua, Monastir, Tunes, oct. de 1984, publié en *Water Supply*, 2 (3/4).

Jahn S.A.A. (1981). Traditional water purification in tropical developing countries: Existing methods and potential application, GTZ, Schriftenreihe, 117, 483p.

Jahn S.A.A., Dirar H. (1979) Studies on natural water coagulation in the Sudan with special reference to *Moringa oleifera* seeds. *Water SA.*, Vol. 5, 2, 90-97p.

Kaboré A. (2011). Etude du pouvoir flocculant et des qualités épuratoires des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux brutes de consommation en Afrique subsaharienne : Cas des eaux du Burkina Faso. Mémoire de DEA, Université de Ouagadougou, Ouagadougou Burkina Faso, 67p.

Kaboré A., Savadogo B., Rosillon F., Traoré A.S., Dianou D. (2013a). Effectiveness of *Moringa oleifera* Defatted Cake versus Seed in the Treatment of Unsafe Drinking Water: Case Study of Surface and Well Waters in Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, 5, 1076-1086. doi:10.4236/jwarp.2013.511113, Published Online November 2013. <http://www.scirp.org/journal/jwarp>.

Kaboré A., Savadogo B., Rosillon F., Traoré A. S., Dianou D. (2013b). Optimisation de l'efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de Consommation en Afrique sub-saharienne : cas des eaux du Burkina Faso. *Revue des Sciences de l'Eau*, 26(3) (2013), 209-220p.

Kaboré A., Savadogo B., Rosillon F., Traoré A.S., Dianou D. (2013c). Efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de consommation en Afrique sub-saharienne: cas des eaux du Burkina Faso. *Annales Université de Ouagadougou Série C* , N° 009 N° 009, ISBN 979-10-90524-17-0, 107-130p.

Kaboré A., Savadogo B., Otoïdobiga H.C., Sawadogo A., Rosillon F., Traoré A.S., Dianou D. (2015). Microbiological quality of surface water treated with *Moringa oleifera* seeds or cakes during the storage: Case study of water reservoirs of Loumbila, Ziga and Ouaga 3 dams in Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, Vol.7, 4, 2015, <http://www.scirp.org/journal/jwarp>.

Kam Y. (2012). Etude des paramètres physicochimiques et biologiques de l'huile de *Moringa oleifera*. Mémoire de DESS, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 70p.

Kaser F., Werner C., Nahayo D. (1990). Rural water treatment, using *Moringa oleifera* seeds as coagulants. *Natural Resources Development*, 33, 33-47p.

Kwaambwa H.M., Hellsing M.S., Rennie A.R., Barker R. (2015). Interaction of *Moringa oleifera* seed protein with a mineral surface and the influence of surfactants, *Journal of Colloid and Interface Science*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2015.02.033>

Lanoix J.N., Roy M.L. (1976). Manuel du technicien sanitaire. OMS Genève, 21-22p.

Lautenschlager K., Boon N., Wang Y., Egli T., Hammes F. (2010). Overnight Stagnation of Drinking Water in Household Taps Induces Microbial Growth and Changes in Community Composition. *Water Research*, Vol. 17, 44, 4868-4877p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.032>

Leclerc H., Schwartzbrod, Dei Cas E., (2002). Microbial agents associated with waterborne diseases. *Crit. Rev. Microbio.* N° 28, 371-409p.

Livre Bleu, Burkina Faso, Deuxième édition (2012). Rapport pays - Etat des lieux de l'eau et de l'assainissement au niveau national, 21 Février 2012, 36p.

Livre bleu, Burkina Faso. (2005). L'eau, la vie, le développement humain état des lieux, les défis à relever les chantiers du millénaire mars 2005, 18p

Madsen M., Schlund, J., Fadil E., Omer E. (1987). An effect of water coagulation by seeds of *Moringa oleifera* on bacterial concentration. *Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 90, 101-109p.

Maïga Y., Denyigba K., Wethe J., Ouattara A.S. (2009). Sunlight inactivation of *Escherichia coli* in waste stabilization microcosms in sahelian region (Ouagadougou, Burkina Faso), *Journal of photochemistry and photobiology B: Biology*, 2009, Vol. 94, 2, 113-119p.

Maiga (2010). Etude des processus d'élimination des bactéries indicatrices de performances épuratoires des bassins de lagunage sous climat sahélien : influence de la radiation solaire. Thèse de doctorat unique en Sciences biologiques appliquées, Université de Ouagadougou, Burkina, Faso, 128 p.

Maywald A., Zeschnar-Lahl B., Lahl V., Goldsmith E., Hildyard N. (1988). Water fit to drink, In Eds. *The earth report: Monitoring the battle for our environment*. London, Mitchell Beazley, 79-88 p.

Meierhofer R., Wegelin M. (2002). Solar Water Disinfection: A guide for the application of Sodis (cited 2007 June 18).

MAHRH (Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques) (2011). Rapport bilan GIRE Burkina Faso (2010) et perspectives 2011. Ouagadougou, Burkina Faso, 29 p.

MARHRH/DGRE (Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques/Direction générale des Ressources en Eau (2006). PN-AEPA Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et d'Assainissement à l'horizon 2015, Burkina Faso, 55 p.

Ministry of Water and Environment (2001). Decree N° 2001-185/ PRES/PM/MEE, Fixing the Standards of Pollutants in Air, *Water and Soil*, 2001.

Mizier (2005). La mesure de turbidité : un paramètre essentiel pour les eaux potables comme pour les eaux usées: l'eau l'industrie les nuisances, 284p.

Morris R.D., Audet A.M., Angetillo I.F., Chalmers T.C., Mosteller F. (1992). Chlorination, chlorination by products and cancer. A meta-analysis, *Am. Jour. of Public Health*, Vol. 82, 7, 955-963p.

Muller R. Morera P., Lankinen K. S., Berstrom S., MakeJa, P. H., Peltomaa M. (1994). Helminthoses, In: eds. *Health and disease in developing countries*. London, Macmillan Press, 195-209p.

Muyibi S.A., Saad A., Abbas Megat Johari Noor M.M., Fakrul Razi A. (2003). Enhanced coagulation efficiency of *Moringa oleifera* seeds through selective oil extraction. *IIUM Engineering Journal*, 4 (1), 1-11p.

Muyibi S.A., Ameen E.S.M., Noor M.M.J.M., Ahmadum F.R. (2002). Bench scale studies for pretreatment of sanitary landfill leachate with *Moringa oleifera* seed Extract. *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 59, 5, 2002, 513-535p. <http://dx.doi.org/10.1080/00207230212731>

Muyibi S.A., Okuofu C.A. (1995). Coagulation of low turbidity surface waters with *Moringa oleifera* seeds. *Intern. J. Environmental Studies*; Vo1.48, 263-273p.

Muyibi S.A., Evison L.M. (1995a). *Moringa oleifera* seeds for softening hard water. *Water Res.*, Vol. 29, 4, 1099-1105p.

Muyibi S.A., Evison L.M. (1995b). Optimizing of physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Moringa oleifera* seeds. *Water. Res.*, Vo1.29, 12, 2689-2695p.

NRC (National Research Council) (2006). Lost Crops of Africa vegetables: *Moringa*; National Academies Press, Volume 2, London.

Ndabigengesere A., Narasiah K.S. (1998.) Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds, *Water Res.* 32 (3), 781-791p.

Ndabigengesere A., Narasia K.B., Tolbot B.G. (1995). Active agents and Mechanisms of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Res.*, Vol. 29, 2, 703-710p.

NF EN ISO 5667-1 (2007). Qualité de l'eau- échantillonnage-partie 1 : lignes directrices pour la conception des programmes et des techniques d'échantillonnage (indice de classement : T90-511-1).

NF EN ISO 5667-3 (2004). Qualité de l'eau-Echantillonnage- partie 3. Lignes directrices pour la conservation et la manipulation des échantillons d'eau (indice de classement : T90-513)

Noisette (1959). Relation entre mesure de turbidité et matières en suspension non décantables. C.B.E.D.E, *Bull. Trimestriel*, 111. (45), 139p.

Okuda T., Baes A. U., Nishijima W., Okada M. (2001a). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seeds by salt solution. *Water Res.* 35, 405-410p.

Okuda T., Baes A.U., Nishijima W., Okada M. (2001b). Coagulation mechanism of salt solution extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. *Water Res.*, 35 (3), 830-834p.

Okuda T., Baes A.U., Nishijima W., Okada M. (1999). Improvement of extraction method of coagulation active components from *Moringa oleifera* seeds. *Water Res.*, 33, 3373-3378p.

Olsen A. (1987). Low technology water purification by bentonite clay and *Moringa oleifera* seeds flocculation as performed in Sudanese villages: effects on *Schistoma Mansoni Cercariae*. *Water Res.* 21 (5), 517-522p.

Olshansky S.1., Cames B., Rogers R., Smith I. (1997). Infectious diseases, New and ancient threats to world health, *Population Bulletin*, 52 (2), 2-43p.

OMS/UNICEF (Organisation Mondiale de la Santé/Fond des Nations Unies pour l'Enfance) (2012). Progrès en matière d'eau potable et d'assainissement Mars 2012 update World Health Organization Geneva, 11-16p.

OMS/UNICEF (2010). Progress on sanitation and drinking water 2010 update, World Health Organization, Geneva.

ONU (Organisation des Nations Unies) (2012). L'eau potable et l'assainissement, Conférence des Nations Unies sur le développement durable sommet Rio +20 ,20-22 Juin 2012, Rio de Janeiro, Brésil

ONU (2010). Déclaration de l'Assemblée Générale: L'accès à l'eau potable est un droit fondamental, Centre d'Actualités de l'ONU.

OMS (2011). Directives de qualité pour l'eau de boisson, 4^e Edition, ISBN 978 92 4 154815 1, Genève, Suisse, 2011, 531 p.

OMS (2005). Organisation Mondiale de la Santé. Célébration de la Décennie Internationale d'action l'Eau Source de Vie: 2005-2015; Journée Mondiale de l'eau. Guide de sensibilisation.

OMS (2004). Directives de qualité pour l'eau de boisson. Vol. 1: 3^e éd. ISBN 92 4 154638 7, 110p, Genève.

OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2000). Directive de qualité pour l'eau de boisson, volume 2, Critères d'hygiène et documentation à l'appui, Organisation Mondiale de la Santé, 2^e édition, 1050 p.

Ouattara Y., Guiguemde I., Diendére F., Diarra J. et Barry A. (2012). Pollution des eaux dans le bassin du Nakanbe: cas du barrage de Ziga. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6(6): 8034-8050p.

Payment P., Franco E., Siemiatycki J. (1993). Absence of relationship between health effects due to tap water consumption and drinking water quality parameters. *Water Sciences Technology*, 27, 137-143p.

Potelon J.L., Zysman K. (1993). Guide des analyses d'eau potable. Editions de la lettre du Cadre Territorial, 143-145p.

United Nations, UNDP, "Burkina Faso: Access to Safe Drinking Water Has Improved a Lot," 2010. <http://www.un.org/apps/newsFr/printnewsAr.asp?nid=23248>

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) (2011). Problématique de l'eau en République Démocratique du Congo, Rapport technique.

PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement) (2006). Rapport mondial sur le développement humain 2006, Au-delà de la pénurie: Pouvoir, pauvreté et la crise mondiale de l'eau, 64p.

Rapport de la commission sur la gestion de l'eau au Québec. Tome 1, Québec : bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2000, 480p.

Reed R.H. (1997). Solar inactivation of fecal bacteria in water: the critical role of oxygen, *Letters in Applied Microbiology*, 24, 276-280p.

Rice E.W. (1999). *Escherichia coli*. In: *American Water Works Association Manual of water (AWWA) supply practices: waterborne pathogens*: 48, 75-78p.

Richard C., Van N.C. (1961). Relation entre la résistivité d'une eau et son taux de minéralisation, *l'eau*, N°1, 22-24p.

Ritchie L.S. (1948). An Ether Sedimentation Technique for Routine Stool Examination, *Bulletin of US Army*, 1948, 326 p.

Robertson W. (1995). Utilités et limites des indicateurs microbiologiques de la qualité de l'eau potable. Dans : *Air intérieur et eau potable*, sous la direction de Pierre Lajoie et Patrick Levallois, Presses de l'Université Laval, 179-193p.

Rodier J. (1996). L'analyse de l'eau « eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer », 8^{ème} édition, Paris, Dunod, 1394p.

Rodier J. (2009). L'Analyse de l'Eau (9^e éd). Dunod: Paris. P.1-1579p.

Rosillon F., Vander Borgh P., Bado-Sama H. (2005). River contract in Wallonia (Belgium) and its application for water management in the Sourou valley (Burkina Faso). *Water Sciences and Technology*, 52(9), 85-93p.

Rosillon F., Savadogo B., Kaboré A., Bado-Sama H., Dianou D. (2012a). Attempts to Answer on the Origin of the High Nitrates Concentrations in Groundwaters of the Sourou Valley in Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 663-673p. doi:10.4236/jwarp.2012.48077 published online August 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/jwarp>)

Rosillon F., Savadogo B., Kaboré A., Bado-Sama H., Dianou D. (2012b). Estimation des teneurs en nitrates dans les eaux potables par l'utilisation de bandelettes réactives: un exercice d'éducation à l'environnement dans la vallée du Sourou au Burkina Faso. *Vertigo : la Revue Electronique en Sciences de l'Environnement*, 12(2). Publié en ligne en September 2012 (<http://vertigo.revues.org/12274>).

Santé Canada (1991). La qualité bactériologique. Document de support aux recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. Disponible à : www.hc-sc.gc.ca/ehp/dhm/dpc_eau_qualité/eauguide.htm.

Santé Canada (1992). Les nitrates et les nitrites. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. Documentation à l'appui, consulté le 28/04/2006, [en ligne], www.hc-sc.gc.ca/chp/dhmlcatalogue/dpc_pubs/rgepdoc.appui/nitrate.pdf, 1-12p.

Slutsker L., Guarner J., Griffin P. (1998). *Escherichia coli* O157:H7. In: Nelson, AM et CR Horsburg, éditeurs, Pathology of emerging infections. *American Society for Microbiology*, 259-273p.

Savadogo B., Kaboré A., Zongo D., Poda J.N., Bado H., Rosillon F., Dianou D. (2013). Problematic of drinking water access in rural area: case study of the Sourou valley in Burkina Faso. *Journal of Environmental Protection*, 2013, 4, 31-50p. doi:10.4236/jep.2013.41004, Published Online January 2013, <http://www.scirp.org/journal/jep>

Semerjian L., Ayoub G.M. (2003). High-pH-magnesium coagulation-flocculation in wastewater treatment. *Adv. Env. Res.* 7: 389-403p.

Sommet de l'eau (2013). L'eau est la clé du développement durable. Budapest, Hongrie.

Straub T.M., Chandler D.P. (2003). Towards a unified system for detecting waterborne pathogens. *Journal of microbiological methods*. 53 (2): 185-197p.

Suarez M., Entenza J.M., Doerries C., Meyer, E., Bourquin L., Sutherland, J., Marison I., Moreillon P., Mermod N. (2003). Expression of a plant-derived peptide harboring water cleaning and antimicrobial activities. *Biotechnol and Bio eng.* 81 (1): 13-20p.

Suarez M., Haenni M., Canarelli S., Fisch F., Chodanowski P., Servis C., Michielin O., Freitag R., Moreillon P., Mermod N. (2005). Structure-Function characterization and optimization of a plant derived antibacterial peptide. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 49 (9), 3847-3857p.

Sunda (2012). Contribution à la désinfection de l'eau par photosensibilisation avec des extraits de plantes, thèse faculté des sciences de l'ULG, département des sciences et gestion de l'environnement, 160p.

Tapsoba F. (2014). Etude de l'évolution des éléments précurseurs d'eutrophisation : cas du barrage n°3 de Ouagadougou. Master 2, Université de Ouagadougou, 76p.

Tardat-Henry et Beaudry (1980). Chimie des Eaux, Dunod : Paris, 355- 602p.

Thilza I.B., Sanni S., Isah Z.A., Sanni F.S., Talle M., Joseph M.B. (2010). In vitro Antimicrobial activity of water extract of *Moringa oleifera* leaf stalk on bacteria normally implicated in eye diseases. *Academia arena*; 2(6), 80-82p, ISSN 1553-992X.

UNESCO (2005). L'eau et la santé à l'occasion de la journée mondiale de la santé. Bulletin d'information du portail de l'eau de l'UNESCO. N°87, 1-8p.

UNICEF/OMS (2004). Atteindre les OMD en Matière d'eau potable et d'assainissement, NLM: WA., 675, 9p.

UNICEF/OMS (2008). Extrait « Un Aperçu de la situation de l'eau potable et de l'assainissement en Afrique », 11^{ème} Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement de l'Union Africaine sur le thème : Réalisation des Objectifs du Millénaire concernant l'Eau et l'Assainissement 30 juin au 1er juillet 2008, 13p.

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1999). Drinking Water and Health: What You Need to Know! <http://www.epa.gov/safewater/dwh/dw-health.pdf>.

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (2012). Drinking Water Standards and Health Advisories, 2012, 12p.

Vikashni N., Malachite M., Kanayathu K., Subramaniam S. (2012). Water Purification using *Moringa oleifera* and other locally available seeds in Fiji for heavy metal removal. *International Journal of Applied Science and Technology*, Vol. 2, 5, 125-129p.

Villen L., Manjón F., García F.D., Orellana G. (2006). Solar Reactor for Water Disinfection by Sensitised Singlet Oxygen Production in Heterogeneous Medium. *Appl. Catal.*, 69, 1-9p.

Vogt C., Regli S. (1981). Controlling THM while attaining disinfection. *Journal AWWA*, 383-396p.

Wamer D. (1998). Drinking water supply and environmental sanitation for health, presented at the International Conference of Water and Sustainable Development, Paris, Mar. 19-21, 1-10p.

Wei C., Lin W., Zainal Z., Williams N.E., Zhu K., Kruzic A.P., Smith R.L., Rajeshwar K. (1994). Bactericidal activity of TiO_2 photocatalyst in aqueous media: Toward a solar-assisted water disinfection system. *Env. Sci.Techn*, 28(5), 934-938p.

Weber W.J. Jrn. (1972). Physicochemical processes for water quality control, New York, 88-89p.

WSP/UNICEF (2007). Improving Household Drinking Water Quality: Use of Ceramic Water Filters in Cambodia. Field note, 44p.

Zmirou D., Ferley P., Collin J., Charrel M., Berlin J. (1987). A follow-up study of gastrointestinal diseases related to bacteriologically substandard drinking water. *Am. Journal of Public Health* , 77, 582-584p.

ANNEXE 1

CARACTERISTIQUES CULTURALES DE *MORINGA OLEIFERA* (CNSF, NOTE TECHNIQUE 4)

NOM SCIENTIFIQUE : *Moringa oleifera*

GENERALITES SUR L'ESPECE

Nom commun en MOORE : Argantiiga

DIOULA : Ardiana-yiri

FULFUDE : Guilgandani

FRANÇAIS : Ben ailé

UTILISATIONS au Burkina Faso

1. Alimentation
2. Pharmacopée
3. Fourrage
4. Bois d'énergie
5. Brise-vent, Haie-vive

REGION DE PROVENANCE DE L'ESPECE AU BURKINA FASO

1. Sahélienne
2. Sub Sahélienne
3. Nord Soudanienne
4. Sud Soudanienne
5. ESPECE EXOTIQUE

TYPES DE SOL : Pousse sur les rives et aussi dans la savane. La plupart du temps cultivé. Très résistant au sec. Besoin d'un sol bien drainé.

LA GRAINE

Période de récolte : Novembre – Décembre

Avril – Mai

Nombre de Graines par kg : 3 400

Température de conservation des graines : 18 – 22°C

Prétraitement des graines : Trempage dans l'eau pendant 24 heures

Pourcentage moyen de germination : **70%**

Durée de germination : **4 à 10 jours**

TECHNIQUE DE PRODUCTION

1. Semis

- En pot
- En planche

2. Bouturage

3. Durée en pépinière : 5 semaines

4. Hauteur plantable : 25 - 30 cm

5. Date de semis en fonction de la date de plantation par région de provenance

Région de provenance	Période de semis	Période de plantation
Sahélienne	20 - 30 Juin	1 à 20 Août
Sub - Sahélienne	20 - 30 Juin	1 à 20 Août
Nord Soudanienne	5 - 15 Juin	1 ^{er} Juillet – 7 Août
Sud soudanienne	22 mai - 2 Juin	1 ^{er} Juillet – 7 Août

6. Dimension des conteneurs : 20 X 7 cm ; 25 X 7 cm

7. Substrat : 3 terres + 1 sable + (1 fumier ou compost)

TRAVAUX D'ENTRETIEN

8. Arrosage : Biquotidien (48 à 77 litres, matin et soir pour 1000 pots)

9. Ombrage : après cernage et repiquage pendant 2 jours

10. Désherbage et Binage : toutes les deux semaines

11. Sensibilité aux maladies : chenilles défoliatrices

ANNEXE 2

TECHNIQUE DE PLANTATION DE *MORINGA OLEIFERA* (INERA)

- **Culture** : mise en terre des plantes après la germination de la graine dans les conditions ci-dessus (Annexe 1).
- **Espacement** : 2 m entre les plantes.
- **Profondeur des trous** : 30 et 40 cm
- **Diamètre des trous** : 40 cm.
- **Irrigation** : technique du goutte à goutte.

.