



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
D'ANTSIRABE-VAKINANKARATRA

MENTION GENIE INDUSTRIEL

PARCOURS GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER TITRE D'INGENIEUR EN GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET
INDUSTRIELS

INTITULE :



Présenté par : RAMBELOSON Anjaraniaina Mickaya

Soutenu le : 01 février 2022



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
D'ANTSIRABE-VAKINANKARATRA

MENTION GENIE INDUSTRIEL

PARCOURS GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER TITRE D'INGENIEUR EN GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET
INDUSTRIELS

INTITULE :

**« CONCEPTION DE FILTRE A EAU
DOMESTIQUE, EN CERAMIQUE AVEC DE
L'ARGILE, DE LA SCIURE DE BOIS ET DE LA
POUZZOLANE ».**

Présenté par : RAMBELOSON Anjaraniaina Mickaya

Soutenu le : 01 février 2022

Membres de jury :

Président : Professeur RAKOTOSAONA Rijalalaina

Encadreur : Docteur RATSIMBA Marie Hanitriniaina

Examineurs : Docteur RAKOTONDRAMANANA Samuel

Docteur RABIBISOA Daniel

Docteur RABEHARITSARA Andry Tahina

Madame RANAIVOSON Sahondra Olga

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné la force, le courage et la santé de mener à terme ce travail.

J'exprime mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce présent mémoire, en particulier :

- * Professeur RAKOTOSAONA Rijalalaina, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo d'avoir bien voulu accepter de présider ce mémoire
- * Docteur RANAIVOSON Elie Responsable de la Mention Génie Industriel, et Professeur RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, Responsable du Parcours Génie des Procédés Chimiques et Industriels qui m'ont permis de présenter ce mémoire.
- * Docteur RAKOTONDRAMANANA Samuel, Docteur RABIBISOA Daniel, Docteur RABEHARITSARA Andry Tahina et Madame RANAIVOSON Sahondra Olga pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir accepté de siéger parmi les membres de jury ;
- * Docteur RATSIMBA Marie Hanitriniaina, mon encadreur de m'avoir dirigée et aidée tout au long de mes travaux de recherche ;
- * Tous les Enseignants de la Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels pour nous avoir donnés des connaissances nécessaires à notre formation ;
- * Tout le Personnel du Laboratoire Génie des Procédés Chimiques et Industriels, pour leur aide et collaboration ;
- * Tout le Personnel du Laboratoire Qualité Eau de la JIRAMA Mandrozeza pour leur assistance et conseil durant mon stage
- * Mes Parents pour leur soutien moralement et financièrement durant mes années d'études ;
- * Toute ma famille, mes amis pour leurs aides et les marques d'amitié qu'ils ont témoignés.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Partie I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : LES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DE L'EAU A
DOMICILE

Chapitre II : GENERALITES SUR LES MATIERES PREMIERES

Chapitre III : GENERALITES SUR L'EAU DE PUIITS

Partie II : MATERIELS ET METHODES

Chapitre IV : MATERIELS ET MATERIAUX NECESSAIRES

Chapitre V : METHODES DE CONCEPTION DE FILTRE

Partie III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre VII : DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Chapitre VIII : IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES ET
ENVIRONNEMENTAUX

CONCLUSION

GLOSSAIRE

Membrane : barrière permsélective qui réduit le transfert d'un soluté par rapport à un autre.

Perméabilité : rapport entre le débit d'eau traversant la membrane par unité de sa surface, divisée par la pression transmembranaire.

Perméat: fluide qui s'écoule à travers la membrane.

Retentat (concentrat) : fluide qui est retenu par la membrane.

Sélectivité : processus permettant à la membrane de séparer les solutés.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Mode de fonctionnement de la filtration tangentielle [Centre Québécois de Valorisation des biotechnologies.]	5
Figure 2: Courbe de débit de perméation en fonction du temps [Centre Québécois de Valorisation des biotechnologies.]	6
Figure 3: Mode de fonctionnement de la filtration frontale [Centre Québécois de Valorisation des biotechnologies.]	7
Figure 4: Membrane anisotrope [http://www.fndae.fr/documentation]	9
Figure 5: Méthodes de trois récipients [CAWST, 2009]	17
Figure 6: Le fruit, la graine et la feuille du Moringa Olifeira [Bleu, 2014]	18
Figure 7: Traitement de l'eau par désinfection solaire [CAWST, 2009]	19
Figure 8: Type d'argile [Auteur]	21
Figure 9: Filtre à eau sous forme d'une fontaine [Andriamihaja O.M. A, 2014]	25
Figure 10 : Filtre à eau en céramique sous forme d'un pot [Bessières, 2005]	26
Figure 11: Type de pouzzolane [W5]	27
Figure 12: Formation de pouzzolane [W6]	28
Figure 13: Argile Rouge [Auteur]	57
Figure 14: Pouzzolane naturelle [Auteur]	58
Figure 15: Sciure de bois [Auteur]	58
Figure 16 : Moule et Presse à moule [Auteur]	59
Figure 17: Puits étudié [Auteur]	61
Figure 18: Turbidimètre, pH-mètre, conductimètre [Auteur]	68
Figure 19 : Variation des débits de filtration lors des premiers essais de filtration [Auteur]	75
Figure 20: Variation des débits de filtration lors des deuxièmes essais de filtration	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Composition chimique moyenne de la pouzzolane [Rasamoela M., 2011]	32
Tableau 2:Quelques propriétés de la pouzzolane naturelle [Rasamoela M. F., 2011].....	33
Tableau 3: Paramètres à analyser recommandés par le MDDELCC pour déterminer la qualité de l'eau d'un puits [Bleu, 2014].....	47
Tableau 4: Proposition de taux limites de présence des ions [Water Aid, 2004]	48
Tableau 5:Directives de l'OMS pour la caractérisation du risque dans l'eau de consommation [Bessieres, 2005]	52
Tableau 6: Matériels de laboratoire [Auteur]	60
Tableau 7: Proportions de chaque matière première pour les différents essais [Auteur]	64
Tableau 8:Les paramètres utilisant de la méthode directe avec mode opératoire [Auteur]	67
Tableau 9: Matériels nécessaires aux analyses bactériologiques [Auteur].....	70
Tableau 10: Méthodes et conditions de détermination de germes tests.....	72
Tableau 11:Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau de puits [Auteur]	77
Tableau 12 : Résultats d'analyse bactériologique de l'eau de puits [Auteur].....	78
Tableau 13: Paramètres organoleptiques des eaux filtrées [Auteur]	80
Tableau 14: Résultats d'analyse des eaux filtrées [Auteur]	81
Tableau 15:Taux d'abattement des paramètres physico-chimiques [Auteur]	82
Tableau 16:Résultats d'analyse bactériologique des eaux filtrées [Auteur]	84
Tableau 17:Taux d'abattement des germes test [Auteur]	85
Tableau 18:Comparaison de débits de notre filtre avec ceux des études antérieures [Auteur]	87
Tableau 19:Comparaison d'efficacité de nos filtres en termes de réduction microbienne avec celle des autres études [Auteur]	89

LISTE DES UNITES ET ABREVIATIONS

ASR	: <i>Anaérobies Sulfito-réductrices</i>
°C	: degré Celsius
CF	: <i>Coliformes fécaux</i>
Cm	: Centimètre
CSR	: <i>Clostridium Sulfito-réducteurs</i>
CT	: <i>Coliformes totaux</i>
CAWST	: Center for Affordable Water and Sanitation Technology
EC	: <i>Escherichia Colis</i>
EI	: <i>Entérocoques Intestinaux</i>
H	: Heure
Kg	: Kilogramme
L	: Litre
$l.h^{-1}$: litre par heure
$l.h^{-1}.m^{-2}$: litre par heure mètre carré
M	: Mètre
MES	: Matières En Suspension
MON	: Matière Organique Naturelle
mg/l	: milligramme par litre
ml	: Millilitre
mm	: Millimètre
$m.s^{-1}$: mètre par seconde
NF	: Nanofiltration
Nm	: Nanomètre
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
OI	: Osmose Inverse
pH	: potentiel Hydrogène

UFC : Unité Formant Colonie
 μm : micro mètre
 $\mu\text{s/cm}$: micro siemens par centimètre

INTRODUCTION

L'eau est indispensable à la vie. Elle peut également être source de maladies du fait de sa contamination par des déchets ménagers, agricoles, industriels et divers déchets organiques. En effet, certains paramètres présents dans l'eau peuvent dépasser les normes imposées par l'Organisation Mondiale de la Santé. Des analyses physico-chimiques ainsi que bactériologiques de l'eau sont donc nécessaires afin de connaître les traitements adéquats pour rendre l'eau potable.

A Madagascar, l'accès à l'eau potable est un problème non résolu dans les milieux extra-urbains. Les gens qui vivent dans ces derniers n'ont pas la possibilité d'avoir des eaux traitées et potables. A cet effet, ils utilisent les eaux de puits sans traitement au préalable. Dans l'optique de pallier à ce problème, à la suite de plusieurs études menées, la présente étude préconise le traitement de l'eau à domicile. Plusieurs techniques en découlent et celle étudiée ici est la filtration sur céramique. En outre, l'argile, la sciure de bois et la pouzzolane qui est qualifiée sur sa capacité en termes de filtration des eaux grâce à sa porosité, y sont très abondantes. D'où la problématique de la présente étude : le filtre céramique utilisant le mélange argile-sciure de bois-pouzzolane est-il capable d'éliminer les impuretés dans l'eau de puits ?

La résolution à ce problème nous donne l'idée de ce présent mémoire qui s'intitule : « CONCEPTION DE FILTRE A EAU DOMESTIQUE, EN CERAMIQUE AVEC DE L'ARGILE, DE LA SCIURE DE BOIS ET DE LA POUZZOLANE ». L'étude consiste à concevoir des filtres en céramique en valorisant les matériaux locaux. Elle a pour objectif de trouver le mélange adéquat de matériaux argileux, de sciure de bois et de la pouzzolane pour la fabrication des filtres en céramique afin d'avoir une eau potable respectant les normes des paramètres bactériologiques et physico-chimiques recommandées par l'Etat Malagasy. Pour cela, ce travail comporte trois grandes parties :

La première partie est basée sur la synthèse bibliographique concernant les techniques de traitement de l'eau à domicile, les généralités sur les matières premières et sur l'eau de puits ;

La deuxième partie concerne l'identification des matériels et méthodes utilisés lors de l'expérimentation ;

La troisième partie expose les résultats et la discussion.

Partie I : SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : LES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DE L'EAU A DOMICILE

Le principal objectif des recommandations pour la qualité de l'eau potable est de protéger la santé publique. Les directives présentent les recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) pour la gestion des risques liés aux dangers pouvant affecter la sécurité sanitaire de l'eau potable. Les recommandations doivent être examinées dans le contexte de la gestion des risques résultant d'autres sources d'exposition à ces dangers, telles que les déchets, l'air, la nourriture et les produits de consommation.

L'eau est essentielle à la vie et chacun doit disposer d'un approvisionnement satisfaisant en eau (suffisant, sûr et accessible). Un meilleur accès à une eau de boisson saine peut se traduire par des avantages tangibles pour la santé. Tous les efforts doivent être consentis pour obtenir une eau de boisson aussi saine que possible.

I.1 LA TECHNIQUE DE FILTRATION [1]

La filtration est un procédé de séparation qui utilise le passage d'un mélange liquide-solide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les particules solides et laisse passer le liquide (filtrat). La filtration est beaucoup plus rapide que la décantation. Dans cette partie, nous aborderons la filtration membranaire.

I.1.1 Généralité de la filtration membranaire [2] [3]

La filtration membranaire est de plus en plus utilisée comme procédé de séparation dans de nombreux domaines notamment dans le cycle de l'eau (potabilisation de l'eau, traitement des effluents, réutilisation de l'eau, adoucissement, dessalement ...). La filtration membranaire est basée sur l'application d'une différence de pression qui permet le transfert du solvant à travers une membrane dont la taille des pores assure la rétention de solutés.

Les procédés de séparation membranaires sont utilisés pour séparer et surtout concentrer des molécules ou des espèces ioniques en solution, ou pour séparer des particules ou des microorganismes en suspension dans un liquide.

Le but recherché peut être de concentrer une solution, d'isoler ou de séparer un ou plusieurs constituants. Pour ce faire, des membranes sélectives sont utilisés, c'est-à-dire des barrières minces, qui sous l'effet d'une force arrêtent ou laissent passer des substances entre les deux milieux qu'elles séparent. Cette force peut être un gradient de pression, un gradient de potentiel électrique ou un gradient de potentiel chimique, souvent assimilé à un gradient de concentration.

Les critères de sélection d'un procédé dépendent des caractéristiques des substances à séparer, de celles des membranes (dimension, forme, nature chimique, état physique, charge électrique ...) et des conditions hydrodynamiques d'opération. Le transfert sélectif des espèces repose soit sur leur capacité à travers le matériau membranaire, soit sur leur taille par rapport à celle des pores de la membrane (effet de tamis, ou effet stérique), soit par une exclusion ionique, soit encore sur une combinaison de ces différents mécanismes.

Les avantages des procédés de séparation membranaire sur d'autres procédés de séparation sont :

- Une séparation à température modérée, ce qui est particulièrement intéressant vis-à-vis des composés thermosensibles traités surtout en agro-alimentaire et biotechnologies ;
- Une absence de changement de phase, donc une moindre dépense énergétique.
- Accumulation nulle de constituants dans la membrane, d'où un fonctionnement quasiment en continu, n'ayant pas besoin de cycle de régénération comme en échange d'ions. Des arrêts sont cependant nécessaires pour le nettoyage périodique des membranes.

A l'issue d'une opération de filtration membranaire, deux phases sont obtenues:

Le retentât ou concentrât : les molécules et/ou particules retenues par la membrane.

Le perméat ou filtrat : la phase qui peut passer à travers la membrane.

I.1.2 Modes de Fonctionnement [4] [5]

Il existe deux types de filtration : la filtration frontale ou Dead-end filtration et la filtration tangentielle ou cross flow filtration.

Ces deux modes sont très importants et correspondent à deux technologies et deux approches complètement différentes de la filtration.

I.1.2.1 Filtration tangentielle

La filtration tangentielle est une technique membranaire caractérisée par un écoulement tangentiel du liquide à filtrer (rétentat ou concentrat) à la surface de la membrane qui empêche la formation de dépôt à la surface de celle-ci.

Elle met en œuvre une membrane, considérée comme une barrière sélective, une interface entre un milieu brut et un milieu purifié. C'est sous l'action d'une force de transfert, à savoir un gradient de pression de part et d'autre de la membrane, que certains composants du fluide à filtrer, dont la taille est supérieure au diamètre de pores de la membrane, vont être arrêtés, alors que les plus petits vont passer au travers de la membrane.

Cette filtration tangentielle est obtenue par une circulation du rétentat. Le perméat est le liquide qui s'écoule au travers de la membrane sous l'action d'une différence de pression.

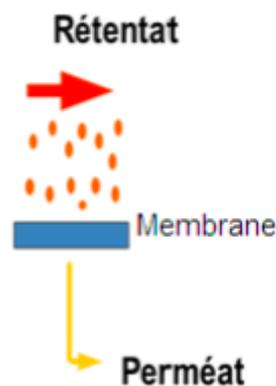


Figure 1: Mode de fonctionnement de la filtration tangentielle [Centre Québécois de Valorisation des biotechnologies.]

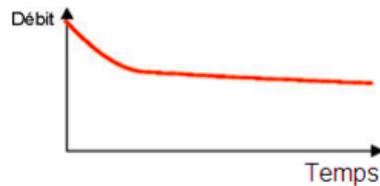


Figure 2: Courbe de débit de perméation en fonction du temps [Centre Québécois de Valorisation des biotechnologies.]

1.1.2.2 La filtration frontale

La plus simple à mettre en œuvre et la moins onéreuse est la filtration frontale dont le principe est de filtrer la solution perpendiculairement à la surface de la membrane. Ce type de procédé n'atteint jamais un état stationnaire. La filtration frontale est une technique qui nécessite un faible investissement, et des coûts énergétiques de fonctionnement qui sont faibles par rapport à la filtration tangentielle. Par contre, ce type de fonctionnement permet essentiellement de filtrer des suspensions qui sont considérées comme faiblement colmatantes dans un secteur d'activité donné. En effet si la solution est fortement colmatante le dépôt devient tel que les flux deviennent trop faibles pour que l'opération puisse fonctionner avec des débits raisonnables. Cette technique est utilisée en traitement de l'eau pour sa potabilisation, mais aussi dans le secteur médical pour enlever toute trace de virus ou de bactérie d'une eau de type « eau du réseau » qui est faiblement colmatante.

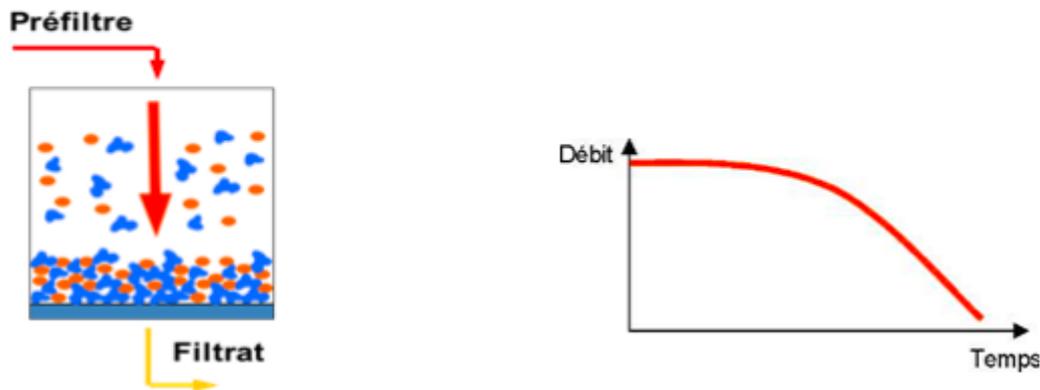


Figure 3: Mode de fonctionnement de la filtration frontale [Centre Québécois de Valorisation des biotechnologies.]

I.1.3 Les différents procédés de filtration membranaires [6]

Les techniques de filtration membranaire ont recours à des membranes de type poreuses. Les composés retenus sont sélectionnés sur une base stérique, c'est-à-dire en fonction de la taille des molécules qui les composent.

On distingue trois niveaux de filtration membranaire, principalement par la taille des pores :

- La microfiltration (MF) : la taille des pores est de l'ordre du micromètre se situant généralement entre 10^{-1} à $10\ \mu\text{m}$;
- L'ultrafiltration (UF) se situe entre la microfiltration et la nanofiltration, avec une taille de pores variant de 1 à $102\ \text{nm}$;
- La nanofiltration (NF) où la taille de pores est de l'ordre de nanomètre ($10^{-3}\ \mu\text{m}$).

I.1.4 La membrane [7] [8]

De façon générale, une membrane peut être définie comme étant une couche mince permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice. Les critères de séparation des particules, des molécules ou encore des ions peuvent être d'ordre stérique (dimension et forme), chimique (nature) ou électrique.

Pour HAMIDI AMINA, une membrane peut être décrite comme une barrière perméable de très mince couche de matière qui va permettre ou interdire le passage ou la rétention de certains espèces ou composants à l'échelle microscopique entre deux milieux qu'elle sépare sous l'action d'une force agissante : qui peut être une différence de pression, de potentiel électrique ou de concentration de part et d'autre de la membrane.

Les membranes utilisées dans le traitement des eaux sont poreuses ou denses et doivent permettre d'enlever les contaminants principalement par effet stérique, sous une pression transmembranaire ou un flux de perméat constant. Elles peuvent être de nature organique ou minérale (filtres céramiques).

I.1.4.1 Les différents types de membrane [9] [10] [11]

I.1.4.1.1 Selon leur nature [10]

La membrane est faite de différents matériaux, tels qu'organique ou minéral.

Les membranes minérales ou céramiques appartiennent aux types suivants de types composites (zircon ZrO_2 sur support macroporeux ou alumine Al_2O_3 ou TiO_2 titane sur alumine, même totalement en carbone ou alumine). La membrane en carbone est constituée d'une suspension d'oxyde de graphite déposée sur un support poreux. Ils sont largement utilisés car ils sont très sélectifs, très forte perméabilité, plus facile à nettoyer, assez agressif assez agressifs sans trop être altérées. Ils ont une excellente résistance chimique, mécanique, en particulier thermique.

Les membranes organiques sont en polymère. Les dérivés cellulosiques restent encore très utilisés, ainsi que les polyamides. D'autres, tels que les polyacryliques, les polyfluorures de vinylidène sont de plus en plus répandus car ils résistent mieux à l'oxydation, au pH ou à la température.

I.1.4.1.2 Selon leur fabrication [10] [11]

Pour obtenir une perméabilité sélective élevée, compatible avec un usage industriel, il est nécessaire que la barrière soit la plus mince possible. Il en résulte une certaine fragilité qui a été palliée par la consolidation de la barrière mince par différents moyens que ce soit, un support à pores de même nature ou de nature différente, un support tissé.

1. Membranes anisotropes (ou asymétrique)

Ces membranes sont formées d'une couche de surface très fine déposée sur un support poreux plus épais. Les propriétés de séparation et de perméabilité sont assurées par la fine couche extérieure, alors que la structure interne assure le support mécanique. Le flux est inversement proportionnel à son épaisseur. Des flux élevés sont recherchés pour des raisons économiques, donc les membranes devraient être aussi fines que possibles. Les technologies de fabrication conventionnelles de membranes permettent de fabriquer des membranes suffisamment résistantes et sans défaut, d'épaisseur minimale de 20 μm .

Les membranes minérales, aussi asymétriques, sont composées d'une matrice à base de céramique sur laquelle sont appliquées une ou plusieurs couches d'oxydes minéraux ou de carbone. La dernière couche est appliquée par frittage. Ainsi, la taille des pores est déterminée par la granulométrie de la poudre initiale. La membrane peut être dense ou poreuse selon l'application envisagée et la tenue mécanique peut encore être améliorée par l'incorporation d'un autre support.

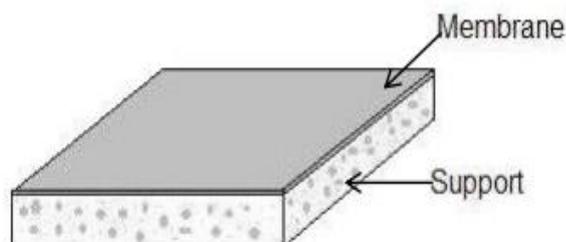


Figure 4: Membrane anisotrope [<http://www.fndae.fr/documentation>]

2. Membranes composites

Elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Dans le cas des membranes minérales, on

a une association d'oxydes minéraux comme support et de métaux tels que la zirconne, l'alumine et le titane.

3. Membranes à charge électrique

Ces membranes peuvent être denses ou poreuses. Les parois des pores sont chargées d'ions positifs ou négatifs. Les membranes chargées positivement favorisent le passage de cations, celles chargées négativement favorisent le passage d'anions. Donc la séparation avec des membranes chargées est basée principalement sur la répulsion d'ions de même charge, mais aussi par la taille des pores. La séparation est contrôlée par la charge et la concentration des ions. Par exemple, les ions monovalents sont plus difficilement retenus que les ions bivalents et, dans la solution à force ionique élevée, la sélectivité diminue. On rencontre ce type de membranes principalement en électrodialyse, mais aussi en osmose inverse.

1.1.4.2. Critères de performances de membranes

La performance des procédés membranaires est évaluée selon des critères et des méthodes standardisées. Elle doit répondre à trois catégories d'exigences : l'efficacité de séparation, un flux élevé et une bonne résistance.

1. Taux de conversion ou productivité

La productivité du procédé membranaire est fortement liée au débit de perméation. Ce dernier est normé par la surface de membrane nécessaire à son obtention. Encore nommé flux volumique ou densité de flux du perméat, il représente la quantité de fluide passant au travers du système de filtration et s'exprime dans le système international en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ et est également exprimé en $\text{L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Le flux (d'eau pure ou d'un solvant organique pur) est une donnée caractéristique de la membrane, le plus souvent, proportionnel à la pression transmembranaire.

Le taux de conversion est un concept qui s'applique à tous les procédés membranaires. C'est la fraction de l'eau d'alimentation convertie en traitée. Ce taux varie de 20% à 50% pour le dessalement de l'eau de mer par OI et il atteint le maximum de 80% à 95% lors du traitement par OI, NF de l'eau saumâtre ou douce.

2. Taux de rétention ou sélectivité de la membrane

La sélectivité est un critère difficile à quantifier et pourtant essentielle. C'est une caractéristique de surface de membrane, qui détermine quels composés de la solution la traversent. Elle dépend de la nature et de la structure d'une substance donnée, de l'environnement chimique à proximité de la membrane et de la propriété des substances à séparer. Elle est, en général, définie par le taux de rétention de l'espèce (sel, macromolécule, particule), également, appelé taux de rejet, que la membrane est sensé retenir.

Ce taux de rétention (TR) est calculé à partir des concentrations de soluté dans le retentât (C_r) et le perméat (C_p) :

$$TR = 1 - \frac{C_p}{C_r}$$

Il y a deux valeurs extrêmes du TR :

- TR=0% signifie que le soluté n'est pas du tout retenu par la membrane
- TR=100% signifie que le soluté est entièrement retenu par la membrane

3. Résistance d'une membrane

La résistance hydraulique (R_m) peut être définie comme étant sa résistance à l'écoulement de fluide à filtrer à travers cette membrane. La résistance d'une membrane est l'inverse de sa perméabilité :

$$R_m = 1/A = S \Delta P_m / Q_p$$

Où R_m [$m \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$] est la résistance d'une membrane, A la perméabilité de la membrane, S [m^2] la surface effective de la membrane, ΔP_m [Pa] la différence de pression transmembranaire effective et Q_p [m^3 / h] le débit volumique de perméation.

Cette relation nous permet de calculer de façon pratique la résistance d'une membrane à partir des mesures de flux de perméation et de la pression transmembranaire.

I.1.4.3. Les caractéristiques des membranes [8] [10] [12] [13]

Les membranes sont généralement caractérisées par leur taille des pores, leur taux de conversion, leur seuil de coupure relatif à une masse moléculaire critique, leur sélectivité ainsi que leur perméabilité à l'eau pure dans des conditions standard.

I.1.4.3.1 La taille des pores

La taille des pores varie de quelques microns en microfiltration à un nanomètre en nanofiltration. La porosité d'une membrane n'est jamais parfaitement uniforme. En deçà du nanomètre, le mécanisme de transfert de solvant est plutôt de type solution/diffusion que convection ; l'eau n'est pas seulement poussée pour s'infiltrer au travers de la membrane, mais aussi elle diffuse au travers de matériau membranaire. La structure du matériau change en fonction des énergies d'activation, donc de la température. La sélectivité des ces membranes dépend de l'affinité chimique du matériau avec les différents composés qui traversent la membrane.

I.1.4.3.2 Le seuil de coupure

Le seuil de coupure est défini comme étant la masse molaire critique pour laquelle 90% des solutés sont retenus par la membrane. Celui-ci se mesure en [g/mol] ou en [Dalton]. Le seuil de coupure est une façon pratique de caractériser les membranes, mais pas tout à fait rigoureuse d'un point de vue scientifique, car il dépend aussi des autres caractéristiques du soluté ainsi que des conditions d'opération. Aussi le seuil de coupure doit-il être défini par rapport à un soluté donné. Cette notion n'a pas de sens en microfiltration malgré une certaine analogie sur le plan des mécanismes, les espèces retenues (microorganismes, boues) ne pouvant être définies ni par une masse molaire ni par une taille en dehors d'un diamètre apparent ou équivalent.

I.1.4.3.3 La perméabilité

La perméabilité exprime la proportionnalité entre la vitesse de perméation à l'eau déminéralisée et la pression transmembranaire à une température donnée. La mesure de la perméabilité permet de vérifier l'état d'une membrane, en particulier l'effet de colmatage.

Comme pour les autres milieux filtrants, cette perméabilité augmente avec la température de l'eau, En fait, la viscosité de l'eau diminue lorsque sa température augmente et cela nécessite une plus faible force motrice pour obtenir le même débit de perméat. En première approximation, il est possible de considérer que la perméabilité d'une membrane est inversement proportionnelle à la viscosité de l'eau.

I.1.4.3.4 Durée de vie

La durée de vie des membranes est cependant difficile à établir, car elle est très variable en fonction du matériau membranaire utilisé et des conditions d'utilisation. Dans tous les secteurs industriels utilisant la microfiltration tangentielle, il est considéré que les membranes minérales ont des durées de vie supérieures aux membranes organiques. Il est cependant préférable d'exprimer cette durée de vie en nombre d'heures d'utilisation. Les garanties des constructeurs peuvent varier de 5 000 heures à plus de 30 000 heures.

I.1.4.3.5 Colmatage et nettoyage des membranes

Le colmatage est défini comme l'accumulation de matière à la surface de la membrane (en particulier à l'entrée des pores) ou à l'intérieur des pores de la membrane. Le colmatage est considéré comme irréversible lorsque les lavages chimiques ne permettent pas de rétablir la perméabilité de la membrane à son niveau initial. Il nécessite donc périodiquement des opérations pour un nettoyage. Celui-ci est coûteux et un impact sur la durée de vie des membranes. Les différents mécanismes de colmatage sont décrits ci-dessous :

1. Colmatage par adsorption

C'est un phénomène physico-chimique dû à des interactions entre certains constituants du fluide et la surface ou l'intérieur des pores de la membrane. Les facteurs d'influence sont le type de molécules en présence, le pH, la présence de cations spécifiques (par exemple le calcium) et aussi la cinétique du processus de filtration, soit la polarisation de concentration et le flux à travers la membrane. En effet, un flux lent favorise les échanges et interactions possibles entre les composés du fluide et la surface de la membrane, entre le soluté et l'intérieur des pores de la membrane. Les molécules les plus susceptibles de colmater les

membranes par adsorption sont les macromolécules, les matières organiques telles que les protéines, qui sont peu solubles et ont une diffusivité élevée.

2. Colmatage par dépôt de matière par convection

La présence de particules dans les fluides peut conduire au simple dépôt de ces particules à la surface de la membrane, pour peu que leur taille soit supérieure ou égale à la taille des pores de la membrane. Un tel dépôt croît en continu au cours du temps. Ceci a pour effet de réduire le flux à travers la membrane et augmenter progressivement la pression.

3. Colmatage par dépôt de matière par gélification, dénaturation, agrégation ou réaction

Le dépôt de matières par convection sur la membrane a pour effet d'en modifier les conditions physico-chimiques, et de modifier le comportement rhéologique du fluide à l'interface membranaire. Ceci peut avoir les conséquences suivantes :

- Gélification, due à des insolubilisations locales;
- Apparition de seuils d'écoulement, du fait de l'accroissement de la concentration, ayant pour conséquence un blocage de flux ;
- Apparition de nouvelles espèces à la surface de la membrane, du fait de réactions, de floculation de dénaturation moléculaire ou de précipitation.

4. Colmatage par développement d'un biofilm

L'accumulation de matière crée une condition favorable à l'encrage de micro-organismes sur les membranes, ce qui peut donner lieu au développement d'un biofilm. Celui-ci a pour effet d'augmenter la résistance hydraulique, de dégrader les membranes et aussi de contaminer le perméat. Une des caractéristiques de ce type de colmatage est le développement rapide de ces micro-organismes sur leurs points d'ancrage. En microfiltration, le colmatage est généralement élevé et la perméabilité initialement élevée réduit progressivement, mais de façon très importante. Il se produit du colmatage interne de la structure de la membrane inhérent à la taille et à la distribution de tailles des pores et des dépôts en surface inhérent à la taille des particules retenues. Les effets des charges sont cependant négligeables. En ultrafiltration, l'accumulation des macromolécules et

des particules colloïdales forme des agrégats ou des gels, la polarisation de concentration devient très importante du fait de cette augmentation de concentration. L'ultrafiltration est particulièrement sujette au colmatage par adsorption. En nanofiltration, une pré-filtration est généralement pratiquée. Celle-ci a pour effet de réduire la possibilité de colmatage particulaire ou colloïdal. La densité des membranes fait en sorte qu'il y a peu de colmatage à l'intérieur des pores. Les dépôts de surface peuvent avoir comme effet de modifier la sélectivité des membranes. Le principal risque de colmatage est cependant dû à la possibilité de développer des biofilms, ce qui engendre des risques plus élevés de contamination.

5. Principe de colmatage

Le colmatage des membranes peut constituer un élément limitant important dans l'application des procédés membranaires à la production d'eau potable. D'abord, ce phénomène peut réduire de façon irréversible ou non la perméabilité des membranes. Cela implique donc une dépense d'énergie supplémentaire pour produire une quantité de perméat constante. Ensuite, plus le colmatage est important, plus il faudra accorder du temps et de l'argent aux lavages chimiques. La durée de vie des membranes s'en trouvera aussi réduite. Finalement, le colmatage peut aussi faire varier le pouvoir de séparation des membranes.

Il existe deux principales catégories de colmatage : le **colmatage microbiologique** et le **colmatage abiotique**.

Dans le cas d'un colmatage microbiologique, des microorganismes peuvent s'attacher, croître à la surface des membranes et produire suffisamment de substances polymériques extracellulaires pour faciliter le développement d'un bio film à la surface des membranes. En plus des microorganismes il y a de nombreux éléments colmatants présents dans les eaux naturelles telles que les particules, les colloïdes, les substances organiques dissoutes et les substances inorganiques peu solubles. Toutefois, les matières inorganiques sont considérées comme peu influentes sur le colmatage par rapport à la MON dans le cas des eaux douces de surface colorées et peu minéralisées. Ces agents colmatant sont associés au colmatage abiotique qui peut se manifester de deux façons : par le

dépôt de matière à l'intérieur des pores de la membrane et par le dépôt de matière à sa surface.

6. Prévention du colmatage

La stratégie générale de prévention du colmatage peut prendre les formes suivantes :

- Préfiltration ;
- Enlèvement plus poussé des particules et des colloïdes par un autre procédé membranaire ou par un traitement conventionnel ;
- Ajustement de pH (acidification) pour déplacer l'équilibre de solutés des sels susceptibles de précipiter (sel de Fe, de Mg, de Ca, de Ba, ...) ;
- Ajout d'un agent antitartre pour empêcher le dépôt de sels à la surface des membranes ;
- Coagulation de la MON. En effet, l'effet colmatant des floccs est, a priori, moins fort que celui des colloïdes ;
- Enlèvement de fer (Fe^{2+}) qui peut précipiter

7. Types de nettoyages

Le colmatage des membranes implique qu'il est nécessaire d'effectuer des rinçages et des lavages de façon périodique afin d'enlever la matière qui s'est déposée à la surface des membranes causant ainsi une baisse de leur perméabilité.

Le nettoyage des membranes a pour but de limiter le colmatage irréversible de perméabilité, et par le fait même, à prolonger la durée de vie des membranes.

Les différentes techniques de nettoyage sont :

- ♣ Le rinçage hydrodynamique ;
- ♣ Le rétro lavage à l'eau ou à l'air. Les fréquences des rétro lavages varient de 15 à 60 minutes tandis que leurs durées varient de 30 s à 3 minutes ;
- ♣ Le nettoyage mécanique ;
- ♣ Le nettoyage chimique ;
- ♣ Le nettoyage enzymatique.

I.2 AUTRES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DE L'EAU A DOMICILE

I.2.1 Les techniques de sédimentation [14], [15], [16]

La décantation ou sédimentation est un processus pendant lequel tout élément solide contenu dans l'eau se dépose naturellement ou par ajout de coagulant, au fil du temps, au fond d'un récipient selon sa granulométrie. Les éléments les plus grossiers décanteront plus vite que les plus fins. Une fois déposées, les particules formées et les micro-organismes qui s'y sont fixés peuvent être retirés facilement.

I.2.1.1. La méthode de trois récipients

Comme son nom l'indique, cette technique s'exécute à l'aide de 3 récipients. Elle consiste à réduire la quantité d'impuretés et de germes pathogènes en mettant l'eau dans un récipient, laissant les impuretés se déposer au fond et transvasant l'eau ainsi rendue plus propre dans un second puis un troisième. C'est l'eau du troisième récipient que l'on peut boire. Il est conseillé d'utiliser un tuyau flexible pour siphonner l'eau d'un récipient à l'autre au lieu de le verser simplement pour moins perturber les sédiments, comme l'indique par la figure suivant



Figure 5: Méthodes de trois récipients [CAWST, 2009]

I.2.1.2 La décantation chimique

Elle consiste à utiliser des produits chimiques pour accélérer la décantation des particules. Ces produits agissent ici comme des coagulants qui permettent aux particules solides présentes dans l'eau de former des agrégats qui se déposent plus rapidement du fait de leur poids. Lorsqu'ils se déposent au fond, l'eau devient plus limpide au-dessus. Les principaux coagulants utilisés sont à base de l'aluminium et de fer, à savoir le sulfate d'alumine $Al_2(SO_4)_3$, le sulfate de fer ($FeSO_4$) et le chlorure de fer ($FeCl_3$). Ils sont commercialisés sous formes de

cristaux. Cette technique a un effet durable sur la conservation de l'eau. Néanmoins, les produits chimiques restent un peu chers et sont difficiles à utiliser. Cette technique nécessite donc une formation complexe, un respect des dosages indiqués par le fabricant.

1.2.1.3 La purification traditionnelle

Mises en œuvre par nos ancêtres depuis des siècles, les techniques traditionnelles de décantation ou de coagulation consistent à mettre des racines, des feuilles, des tiges, des graines ou des plantes tropicales entières dans une eau trouble pour la purifier, la rendre plus claires ou la donner un bon goût. Il existe de nombreux exemples dans le monde, mais le plus connu est l'utilisation des graines de Moringa Olifeira, représentée par la figure ci-dessous.

À Madagascar, cet arbre porte le nom **ananambo**, poussant surtout dans les régions chaudes et humides de Madagascar. Plus connu dans le Nord sous le nom d'ana-mirongo, il peut pourtant pousser dans les zones arides. Ces graines sont broyées puis réduites en poudre avant d'être versées dans l'eau à purifier. En effet, les graines de Moringa Olifeira contiennent des protéines à caractère polyélectrolyte qui permettent aux particules de former des agrégats. Ce qui débarrasse l'eau des boues, des bactéries ou virus qui sédimentent au fond. Cette plante est parallèlement utilisée en médecine traditionnelle (**Annexe 1**).



Figure 6:Le fruit , la graine et la feuille du MoringaOlifeira [Bleu,2014]

1.2.2 Les techniques de désinfection [16][17]

La désinfection est l'opération au résultat momentané permettant d'éliminer ou de tuer les micro-organismes et/ou virus indésirables présents dans l'eau en utilisant des substances chimiques ou physiques.

1.2.2.1 L'ébullition

Le fait de bouillir de l'eau est une activité traditionnelle connue de tous depuis les temps anciens et utilisé jusqu'à nos jours, pour tuer tous les microbes nuisibles à la santé et au bien-être des hommes. Elle consiste à mettre simplement au feu un récipient rempli d'eau à traiter. Les résultats sont satisfaisants car la plupart des germes pathogènes meurent à 70°C. L'eau ainsi traitée peut avoir un goût fade. Pour remédier à cela l'on peut ajouter du sel ou oxygéner l'eau en la secouant dans une bouteille. L'inconvénient ici, c'est la nécessité d'utilisation de combustibles tels que le bois, le charbon ou le gaz qui peut s'avérer néfaste pour la protection de l'environnement et peut coûter cher dans le cas où la quantité d'eau à traiter est élevée.

1.2.2.2 La désinfection solaire

La désinfection solaire est l'utilisation de l'énergie solaire pour éliminer les agents pathogènes de l'eau à boire. La méthode la plus connue est le SODIS (Solar Water Disinfection). Elle consiste à exposer au soleil des bouteilles (PET ou verre transparent) remplies d'eau à traiter pendant au moins 5 heures (Figure 10). Il est préférable que cette eau soit claire pour optimiser la désinfection. En effet, cette potabilisation de l'eau est assurée par le traitement par radiation et le traitement thermique. Ces deux traitements d'ultraviolet et de chaleur ont la capacité de détruire la majeure partie des impuretés et pathogènes. Il est par ailleurs conseillé de peindre les bouteilles en plastique en noir sur la moitié de leur surface ou de les placer sur un toit. Ce traitement est lent et a un effet non durable.

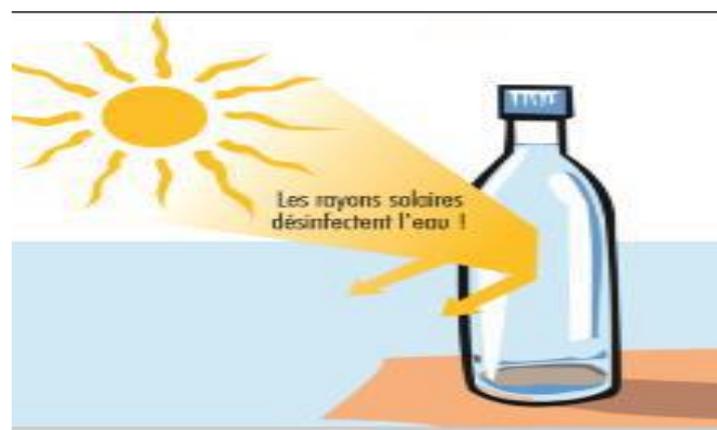


Figure 7: Traitement de l'eau par désinfection solaire [CAWST, 2009]

1.2.2.3 La désinfection chimique

La désinfection chimique consiste à utiliser des produits chimiques pour débarrasser l'eau de boisson des impuretés et des germes pathogènes. Plusieurs composés chimiques sont utilisés. On compte parmi eux l'iode, le permanganate de potassium et le chlore. C'est ce dernier qui est le plus répandu dans les situations d'urgence et on le retrouve sous forme d'eau de javel, de chlorure de chaux ou tablettes de chlore. Selon l'OMS, l'eau de boisson doit contenir entre 0,5mg et 1mg/L de chlore résiduel libre. Avec une bonne conservation, le caractère rémanent de ce chlore pourra éliminer tout risque de ré contamination de l'eau. Il est nécessaire que l'eau soit prétraitée, car la présence de MES inhibe l'action du chlore. Aussi, le chlore au contact de la matière organique produit des nitrates qui sont cancérigènes pour l'homme lors de la consommation.

I.3 CONCLUSION PARTIELLE

Ainsi, les eaux naturelles ne sont pas pures surtout l'eau de surface. Elles contiennent plusieurs éléments chimiques indésirables, plusieurs microorganismes et bactéries qui provoquent des maladies. Pour éliminer ces impuretés, plusieurs techniques de traitement de l'eau à domicile peuvent être appliquées dans tous les milieux. La filtration sur un filtre en céramique est l'une de ces techniques. Au cours de cette étude, nous essayons d'en concevoir un en utilisant l'argile, la pouzzolane et la sciure de bois comme matières premières.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'ARGILE, LA SCIURE DE BOIS ET LA POUZZOLANE

II.1. L'ARGILE [18]

II.1.1 Définition

L'argile est une roche constituée de minéraux essentiels qui sont les minéraux argileux, associés à des minéraux accessoires et à des impuretés diverses. Le mot argile provient du mot latin Argilla signifie « terre de potier »

On appelle également argile une masse minérale terreuse qui, mélangée à l'eau, forme une pâte plastique conservant sa forme après séchage et transforme en pierre après la cuisson.

Les argiles sont composées de différents oxydes, de l'eau libre et liée chimiquement et impuretés organiques. Du point de vue minéralogique, les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés, parfois plus ou moins magnésiens ou ferriques, parfois légèrement calcique et même alcalins.



Figure 8: Type d'argile [Auteur]

II.1.2 Classifications de minéraux argileux

Les minéraux argileux sont classés en plusieurs groupes dont deux seulement nous intéressent, car ils contiennent les principaux constituants des argiles utilisés couramment dans l'industrie céramique. Ce sont : le groupe de la kaolinite et le groupe des micas.

II.1.2.1 Le groupe de la kaolinite

Le groupe de la kaolinite comprend :

- * **La kaolinite** (Si_2) (Al_2O_5) (OH)₄ : c'est la matière constitutive de kaolin, supposée parfaitement pure. Elle se présente comme matière blanche après lavage et décantation des plus grosses parties des débris de la roche mère ;
- * **La dickite et la nacrite** : ces minéraux sont rares. Ils ont la même formule que la kaolinite et ne diffèrent de celle-ci que par la structure de leur réseau ;
- * **L'halloysite** : (Si_2) (Al_2O_5) (OH)₄ + H_2O . Elle renferme une molécule d'eau supplémentaire.

Ces minéraux sont donc alumineux. Ils possèdent une structure en feuillets à deux couches, les feuillets étant séparés par des couches d'eau dans le cas de l'halloysite.

Ils proviennent de l'altération météorique mais surtout hydrothermale (d'origine profonde) de divers silicates alumineux, en particulier, les feldspaths des roches granitiques acides.

II.1.2.2 Le groupe des micas

Dans ce groupe, on retiendra les illites appelées aussi quelquefois bravaisites. Ce sont des minéraux alumino-magnésiens, potassiques et parfois calciques et ferreux. La formule structurale est une formule variable, c'est pourquoi on parle des illites. Ils sont surtout caractérisés par la présence de potassium. Ils ont une structure en feuillets à trois couches et la formule générale peut s'écrire : ($\text{Si}_{3,6}$ $\text{Al}_{0,4}\text{O}_{10}$) Al_2 $\text{K}_{0,4}$ (OH_2).

Les illites sont les minéraux argileux les plus répandus dans la nature et caractérisent surtout les milieux marins.

II.1.2.3 Le groupe de la montmorillonite

Ce groupe renferme des minéraux alumineux, magnésiens et ferreux et qui sont souvent associés aux précédents dans les roches argileuses.

II.1.3 Les argiles du nom du minéral argileux

II.1.3.1 Classification des argiles

Dans la nature, les argiles sont le plus souvent constituées d'un mélange de plusieurs minéraux argileux. Du point de vue de l'industrie céramique, on distingue :

- * **Les argiles réfractaires**, utilisées dans la fabrication des réfractaires silico-alumineux. Ce sont des argiles essentiellement kaolinitiques, riches en alumine (25% à 45%) et renfermant peu d'alcalins. Elles peuvent prendre des colorations diverses.
- * **Les argiles pour produits blancs (porcelaine, faïence fine, vitreous)** : ce sont des argiles généralement kaolinitiques, mais moins riches en alumine et plus riche en silice que les précédentes. On les utilise en mélange avec le kaolin. Leur rôle est surtout d'augmenter la plasticité de la pâte, le kaolin seul étant peu plastique.
- * **Les argiles pour produits grésés** : elles doivent être naturellement grésantes, c'est-à-dire renfermer des fondants (alcalins et alcalino-terreux) et de préférence plastiques, la coloration étant indifférente. Ce sont le plus souvent des argiles mixtes, illito-kaolinitiques.
- * **Les argiles pour produits de terre cuite et faïences communes** : ce sont des argiles de types extrêmement variés, généralement impures, mais renfermant le plus souvent un fort pourcentage d'illites.

II.1.3.2 Formation des gisements d'argiles

La genèse des argiles fait appel à des processus variés et souvent complexes :

- Certaines argiles résultent de la simple dégradation mécanique des roches argileuses préexistantes (schistes par exemple).
- D'autres constituent le résidu d'une altération chimique sous l'action des agents atmosphériques (altération météorique) ou sous l'action de solutions hydrothermales. On peut y trouver des minéraux argileux hérités de la roche mère et non transformés, associés à des minéraux argileux transformés et à des minéraux argileux néoformés, c'est-à-dire synthétisés à partir des éléments libérés par l'altération. La nature des produits

argileux formés dépend de la nature de roches mères et des conditions climatiques et de drainage :

- Les argiles d'origine résiduelle qui sont formés au cours de temps géologiques ont été érodées à différentes reprises, transportées par les eaux courantes et sont venues s'accumuler sur le fond des lacs et des mers. Ces dépôts constituent les argiles sédimentaires détritiques.
- Quelquefois, les minéraux argileux peuvent prendre naissance par précipitation chimique à partir des éléments dissous apportés dans les bassins de sédimentation par les rivières. Il s'agit alors d'argiles sédimentaires de néoformation.
- Enfin, des transformations et des néoformations des minéraux argileux peuvent encore se produire postérieurement au dépôt des sédiments, au cours de leur diagenèse (transformation en roche des sédiments nouvellement déposés). Il s'agit des argiles de diagenèse.

II.1.4 Gisements de l'argile à Madagascar

Les argiles sont abondantes à Madagascar. Leurs gisements sont importants tout au long de l'île surtout dans les régions suivantes : Ampanihy, Moramanga, Anjiro, Alaotra, Antananarivo, Ambatolampy, bassin lacustre d'Antanifotsy, Faratsiho, Antsirabe, Bemolanga, Onilahy, Fort-Dauphin.

II.1.5 Les argiles de Madagascar

Les principaux produits argileux reconnus et disponibles à Madagascar sont : les argiles kaoliniques et halloysitiques et les argiles monthmorillonitiques.

II.1.6 L'application de l'argile dans le traitement des eaux

L'argile est un matériau qui présente des microcristaux très actifs pour adsorber. Elle est utilisée depuis des certaines d'années pour la filtration de l'eau et nous l'appellons filtre en céramique. Au fil du temps, la technique a pu être améliorée afin d'obtenir de meilleurs résultats. Elle consiste à utiliser une céramique poreuse pour éliminer les microbes et autres contaminants de l'eau de boisson. Cependant, il existe deux types d'utilisation de ce filtre : utilisation sous forme d'une fontaine et utilisation sous forme d'un pot.

II.1.6.1 Utilisation sous forme d'une fontaine [11]

En forme de fontaine, le filtre est constitué d'une tête en céramique qui peut filtrer les premières impuretés de l'eau. Avec une toute petite structure poreuse de 0,2 μm de diamètre, cette tête en céramique retient les substances nocives étrangères à l'eau telles que les poussières, les sables, la rouille et les germes de tailles comprises entre 0,5 μm et 1 μm . Les céramiques ont également la propriété chimique d'alcaliniser légèrement l'eau. L'eau alcaline stimule le métabolisme, réduit l'acidité du sang et aide à l'absorption rapide des nutriments. La partie principale de la fontaine est constituée d'une cartouche de filtration. Cette dernière est formée de trois couches principales (charbon actif imprégné de sel d'argent, oxydes de silicium, zéolithes et pierres minérales à la base du filtre) dont chacune joue un rôle important dans l'étape de purification de l'eau.



Figure 9: Filtre à eau sous forme d'une fontaine [Andriamihaja O.M . A, 2014]

II.1.6.2 Utilisation sous forme d'un pot [1], [6]

Il est obtenu en mélangeant une certaine quantité d'argile et de matière organique combustible (sciure de bois, balle de riz, enveloppe de café, jute de coco, etc.). Le mélange obtenu est posé dans un moule puis pressé ; il est passé enfin au four pour la cuisson et cela entraînera la combustion de la matière organique qui laissera des micropores diffusés dans toute la céramique. Les pores d'un filtre ont généralement un diamètre qui varie entre 0,6 à 3,0 μm . La plupart des producteurs imprègnent leurs filtres d'une solution d'argent colloïdale, nécessaire pour atteindre une désinfection complète de l'eau. Cela est confirmé

par Hagen et al dans leur rapport en 2009, qui stipule que l'argent est connu pour agir en tant que biocide, capable d'inactiver les bactéries et les virus.

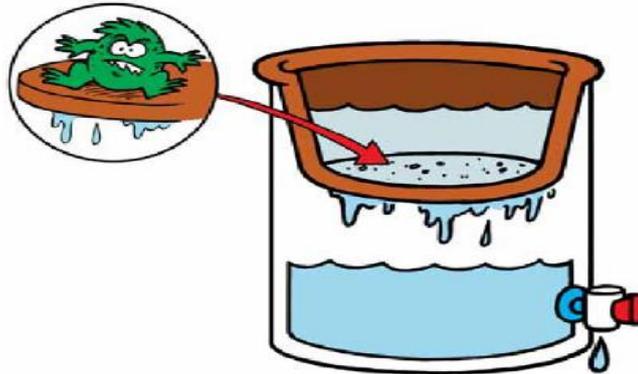


Figure 10 : Filtre à eau en céramique sous forme d'un pot [Bessières, 2005]

Sur le plan microbiologique et organoleptique, la filtration sur céramique est très efficace contre les bactéries, les protozoaires, les helminthes, la turbidité et aussi pour le goût, la couleur et l'odeur. Par contre elle l'est moins sur les virus (Brown et Sobsey, 2006). Aussi, l'efficacité des filtres serait directement liée à la taille des pores du filtre, du débit d'eau qui la traverse et des propriétés physiques de l'eau à traiter.

II.2. LA POUZZOLANE [19], [20]

II.2.1 Définitions

La pouzzolane est un matériau siliceux, alumineux, ferrugineux, n'ayant aucune propriété liante en lui-même, mais possède une propriété de réagir à température ordinaire avec la chaux hydratée pour des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes.

Les pouzzolanes aussi sont des roches naturelles constituées par des scories (projections) volcaniques basaltiques. Elles ont une alvéolaire, de couleur généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. Ce sont des matériaux légers de densité inférieure à 1, poreux, abrasifs, réfractaires, isolants.

Le terme « pouzzolane » provient de Pouzzoles, nom d'une ville italienne de la région de Naples. Il y désigne un matériau volcanique cendreuse de composition trachytique, de couleur claire et friable, utilisé pour la fabrication de mortier et de ciment.



Figure 11: Type de pouzzolane [W5]

II.2.2 Mode de formation

La pouzzolane appartient à la famille des roches éruptives, c'est-à-dire que c'est une roche provenant de la consolidation de magma émanant des profondeurs de l'écorce terrestre.

Dans la pouzzolane, on trouve des scories qui indiquent la profondeur du magma qui l'a créé.

- Magma de surface : Grès carbonifère
- Magma intermédiaire : Roches métamorphiques ;
- Magma profond : Péridotite.

En général, on distingue deux types de roches éruptives : les plutoniques et les roches volcaniques.

Les roches volcaniques se divisent en deux groupes tels que les laves et les projections, et les pouzzolanes appartiennent à ce dernier groupe. Les volcans caractérisés par des explosions violentes projettent des débris de tout calibre. Les matériaux les plus fins, constitués de cendres, peuvent être transportés par le vent et tomber en pluie loin du centre d'émission, c'est le cas des pouzzolanes.

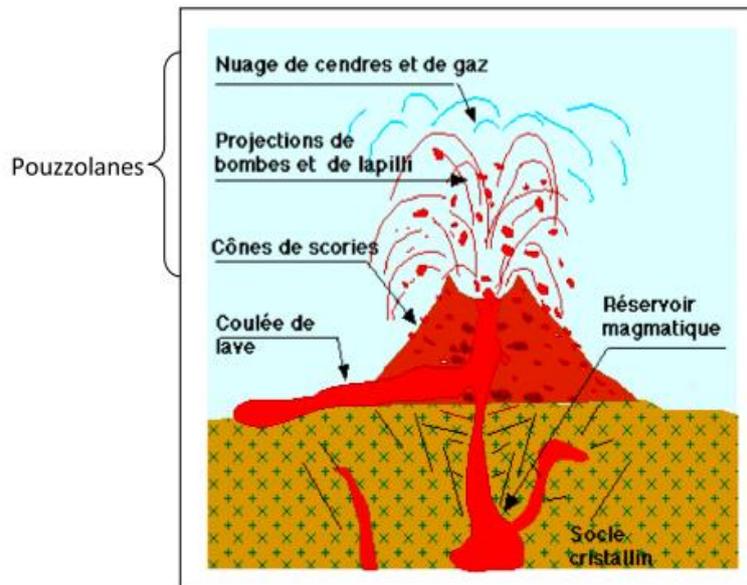


Figure 12: Formation de pouzzolane [W6]

II.2.3 Types de pouzzolanes

Il y a deux types de pouzzolane : les pouzzolanes naturelles et les pouzzolanes artificielles.

II.2.3.1 Pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux possédant des propriétés pouzzolaniques à l'état naturel qui peuvent être améliorées par un traitement approprié d'activation. On distingue :

II.2.3.1.a Le verre volcanique

C'est une roche provenant des éruptions volcaniques qui se trouve dans un état vitreux ou du moins dans une forme d'instabilité qui le rend sensible à l'attaque par l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

II.2.3.1.b Les tufs volcaniques

Ce type de roche est comme la pouzzolane de type verre volcanique mais elle a subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydrothermiques est due à la formation des minéraux zéolithiques de composition variable. Ce genre de pouzzolane est différencié par une texture dure et compacte.

II.2.3.c Les produits pyroclastiques

Ce sont des roches composées principalement ou uniquement de matériaux volcaniques. Les pyroclastes sont, en général, tous matériaux fragmentés produits par les éruptions volcaniques.

II.2.3.2 Les pouzzolanes artificielles

Ce sont des matériaux dont l'activité pouzzolanique apparaît seulement après un traitement approprié, en particulier thermique. Il y a :

II.2.3.2.a Les cendres volantes

Les cendres volantes sont les résidus finement divisés résultants de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques.

On définit trois types de cendre volante, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO) : les cendres volantes qui contiennent des teneurs en CaO inférieures à 8%, celles allant de 8% jusqu'au 20% et celles supérieures à 20%. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃) de 50 à 90%.

II.2.3.2.b Les laitiers granulés du haut fourneau

Le laitier granulé de haut-fourneau est un produit composé essentiellement de silicate, d'aluminosilicate de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer dans un haut-fourneau, et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulees, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment. Les analyses minéralogiques de laitier du haut-fourneau indiquent que la teneur en verre varie de 80 à 100%.

II.2.3.2.c Les argiles calcinées

Ils sont obtenus par cuisson d'argiles à une température variant de 600 à 900°C, puis moulus à la finesse du ciment.

L'argile de base utilisée est constituée en grande partie de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine en état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique.

II.2.3.2.d La fumée de silice

Ce sont des particules de très petite taille (environ de 0,1µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (supérieur à 85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles

permettent d'améliorer la compacité du matériau durci, donc sa résistance mécanique.

II.2.4 Activités pouzzolaniques

L'activité pouzzolanique est un phénomène très difficile, elle est accrue à une réaction de la chaux avec les produits de l'attaque alcaline, des silicates acides.

Cette activité est aussi l'aptitude de la pouzzolane naturelle par mélange avec la chaux à la température ambiante, pour former des composés ayant des propriétés hydrauliques, elle joue un rôle sur les propriétés liants pouzzolaniques. Elle conduit à la formation des composés hydratés dont la nature est définie par les règles générales qui dirigent l'hydratation des liants silico-alumino-calciques.

II.2.4.1 Constituants actifs des pouzzolanes naturelles

En général, la portion active des pouzzolanes est constituée par les phases amorphes ou vitreuses. L'activité pouzzolanique des phases amorphes ou vitreuses ne résulte pas directement de leur composition chimique, elle provient d'une altération des minéraux originaux subséquente à une exposition prolongée à l'eau contenant du CO_2 et à la vapeur d'eau surchauffée.

L'activité pouzzolanique des pouzzolanes naturelles peut être aussi due au caractère zéolithique de leurs constituants tels que l'analcime (Na_2O , Al_2O_3 , 4SiO_2 , $2\text{H}_2\text{O}$). Pour les tufs volcaniques dont la teneur en eau élevée, l'activité pouzzolanique provient des composés zéolithiques, tandis que pour ceux dont la teneur en eau d'hydratation est faible et dont la solubilité dans les acides et les bases est plus élevée, la phase vitreuse joue le rôle prédominant.

Pour les roches sédimentaires, l'activité pouzzolanique repose sur la teneur élevée en silice hydraté possédant une structure poreuse et une grande surface interne.

II.2.4.2 Constituants actifs des pouzzolanes artificielles

Les argiles ne manifestent une activité pouzzolanique qu'après un traitement thermique dans un domaine de température déterminé. Ce domaine de température correspond à une dégradation partielle ou complète de leur structure. L'activité pouzzolanique par recristallisation partielle diminue à nouveau si l'on dépasse ce domaine de température.

Au point de vue chimique, la silice, l'alumine et l'oxyde de fer peuvent devenir actifs par le traitement thermique. Il faut remarquer que ces oxydes à l'état actif ne se trouvent pas nécessairement séparés, mais peuvent se trouver sous forme de combinaison.

Pour les cendres volantes, c'est plutôt la finesse de la poudre qui détermine l'activité pouzzolanique et que la finesse est en relation avec la teneur en charbon du combustible de départ.

II.2.5 Effets de la température sur les pouzzolanes naturelles et artificielles

II.2.5.1 Sur les pouzzolanes naturelles

Par chauffage, il se produit d'abord un changement de stabilité, par perte des constituants volatiles et formation d'une masse poreuse, puis un affaissement de la structure à plus haute température. La formation de la masse poreuse se produit dans le domaine de température compris entre 550°C et 980°C. L'activité pouzzolanique maximale est atteinte par calcination entre 750°C et 980°C pour les roches sédimentaires.

II.2.5.2 Sur les pouzzolanes artificielles

Les argiles de types montmorillonites se déshydratent entre 150 et 300°C et l'activité pouzzolanique de ce groupe est maximale entre 650 et 900°C.

Les argiles de type kaolinite perdent leur eau adsorbée entre 300 et 500°C, et entre 550 et 900°C, la formation de composés pouzzolaniquement actifs est favorable. Pour l'argile de type illite, la perte de l'eau d'adsorption a lieu entre 100 et 300°C et l'activité pouzzolanique maximale est atteinte par calcination entre 750 et 1000°C.

L'effet de la température sur la pouzzolane dépend non seulement de la composition minéralogique ou chimique mais encore de la durée de traitement.

II.2.6 Caractéristiques des pouzzolanes

Les pouzzolanes peuvent être caractérisées sous différentes propriétés telles que : couleur, composition chimique, structure, densité, porosité.

II.2.6.1 Couleur

Les pouzzolanes présentent des couleurs variées allant du noir au rouge, marron à gris, exceptionnellement jaune. Cette variation de couleur est liée au

rapport des pourcentages pondéraux « f » des oxydes ferreux et ferriques donné par la formule ci-après :

$$f = \frac{FeO}{Fe_2O_3}$$

- * Si $f < 0,002$: la coloration est uniformément rouge pour les matériaux réduits à l'état des fines ;
- * Si f est voisine de $0,10$: la coloration vire au brun ;
- * Si f atteint la valeur $0,27$: les produits sont uniformément noirs.

II.2.6.2 Compositions chimiques

Les compositions chimiques des pouzzolanes varient selon leur gisement. Et le tableau ci-dessous montre que les éléments majeurs présents dans la pouzzolane sont la silice, l'alumine et l'oxyde ferrique.

Tableau 1:Composition chimique moyenne de la pouzzolane [Rasamoela M., 2011]

Eléments majeurs	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Teneurs maximales	40-42%	15-30%	10-15%

II.2.6.3 Structure, densité et porosité de la pouzzolane

Les caractéristiques structurales de la pouzzolane peuvent être résumées par leur morphologie vacuolaire, et leur forme déchiquetée. Les vésicules de dimensions variables sont dues aux gaz emprisonnés dans la lave : plus ceux-ci sont fluides, moins la pouzzolane est vacuolaire.

La densité des matériaux pouzzolaniques varie en fonction de leur granulométrie (les éléments les plus fins sont les plus denses). A l'état brut, ces matériaux présentent une densité supérieure à 1, sauf les pouzzolanes qui ont des granulométries grossières (au-delà de 10/20mm).

La porosité aussi varie volumétriquement selon les granulométries. Le tableau ci-dessous montre quelques autres propriétés de la pouzzolane naturelle.

Tableau 2:Quelques propriétés de la pouzzolane naturelle [Rasamoela M. F., 2011]

Porosités (%)	pH	Densité	% rétention en eau	Air (%)	% indices des vides
60-70	6,5-7	0,8-1,3	19-20	46	1,9-2,23

II.2.7 La pouzzolane dans le domaine de filtration

Grâce à ses caractéristiques physiques et chimiques, la pouzzolane est utilisée en filtration dans de nombreux domaines. Elle présente l'avantage d'avoir un pH neutre, et une porosité permettant une filtration naturelle. La plupart des temps, la pouzzolane est séchée et dépoussiérée pour une utilisation en filtration. Leurs applications dans la filtration sont les suivants :

- Epuration des eaux usées : elle est utilisée sous différentes granulométries pour le traitement biologique des eaux usées.
- Traitement d'eau potable : elle permet une double action : mécanique (filtre) et biologique (niche bactériologique : les parasites permettent le développement des bactéries et la dénitrification de l'eau).

II.3 LA SCIURE DE BOIS [21]

II.3.1 Définitions [22]

La sciure de bois désigne l'ensemble des petites particules et fins copeaux issus du sciage de bois.

Après avoir scié ou dressé les bois, les poudres proviennent du sciage ou des débris de la transformation du bois telle que la fabrication des voliges et des résidus du rabot qu'on nomme "sciures de bois".

II.3.2 Caractéristiques de sciure de bois.

Généralement, la sciure de bois a la même propriété interne au bois dans le sciage. Et pour cela, on va voir les propriétés et caractéristiques de bois pour connaître les caractéristiques de sciure de bois.

II.3.3 Les différentes familles de bois

Il existe deux familles de bois :

- Les bois de feuillus (bouleau, hêtre et châtaignier, charme, eucalyptus, etc.) à fibres courtes (0,5 à 1,5 mm).
- Les résineux ou les conifères (pins, sapins et épicéas) à fibres longues (3 à 4 mm). Le « bois de feuillus » est le terme courant servant à désigner les arbres à larges feuilles (latifoliés), qui font partie de la catégorie des angiospermes, tandis que le « bois résineux » désigne les conifères, classés dans la catégorie des gymnospermes. De nombreux feuillus et quelques résineux originaires des régions tropicales sont généralement appelés bois tropicaux ou exotiques, bien que la majeure partie du bois récolté à l'échelle mondiale proviennent de non résineux (58% du volume total). Ce phénomène tient peut-être en partie à la répartition géographique des forêts par rapport au développement industriel.

II.3.4 Composition élémentaire de bois

La composition chimique élémentaire du bois est variable suivant les espèces. Mais on peut envisager qu'à l'état anhydre, le bois est composé d'environ :

- 50 % de carbone,
- 42 % d'oxygène,
- 6 % d'hydrogène,
- 1 % d'azote
- 1 % de minéraux (principalement Ca, K, Na, Mg, Fe, Mn).

On trouve également, dans cette proportion minérale, du soufre, du chlore, du silicium, du phosphore, et d'autres éléments à l'état de trace.

II.3.5 Structure moléculaire de bois.

On distingue deux catégories.

La première catégorie renferme les constituants qui forment quantitativement la partie majoritaire de la substance originelle. Elle est nommée « constituants principaux » dont :

- La cellulose
- La lignine
- Les hémicelluloses

La deuxième catégorie concerne les constituants les plus divers mais moins abondants et moins fréquents et est dénommée « constituants secondaires ou constituants particuliers ou bien corps étrangers ». Les constituants les plus remarquables de cette catégorie sont : les matières colorantes naturelles, les résines, huiles essentielles et oléorésines, les cires, matières grasses, les sucres, hydrates de carbone, les substances azotées, les matières minérales, les acides organiques libres...

a) La cellulose

La cellulose est une macromolécule constituée par la polymérisation d'une molécule élémentaire appelée glucose. Elle a pour formule brute $(C_6H_{10}O_5)_n$ et de composition analogue à l'amidon, mais de poids moléculaire beaucoup plus élevé avec un degré de polymérisation élevé compris entre 5 000 et 10 000. Un degré de polymérisation de 10 000 correspond à une chaîne d'une longueur de 5 μm .

C'est un constituant majoritaire du bois et presque unique du coton et des fibres textiles du type lin, chanvre, jute et ramie.

b) La lignine

C'est un constituant majeur de bois après la cellulose, un polymère complexe non linéaire et les motifs de base associés entre eux constituent un réseau qui s'interpénètre dans le réseau de la cellulose. La lignine donne au bois de nouvelles propriétés et en particulier une grande hydrophobie. C'est un polymère thermoplastique qui soude les fibres entre elles et confère aux plantes leur rigidité. Il faudra soit la dissoudre à l'aide de produits chimiques, soit l'assouplir par montées de température, afin d'extraire du bois des fibres cellulosiques souples et individualisées.

c) Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont les polysaccharides majeurs de la paroi des cellules du bois. Elles sont combinées aux fibrilles de cellulose. Les hémicelluloses sont plus courtes que la cellulose et s'en distinguent par leurs résidus branchés qui sont différents. L'hémicellulose permet d'unir les filaments micellaires de cellulose pour former les fibrilles.

Principales utilisations de la sciure de bois à Madagascar :

- combustibles : fabrication de briquettes combustibles
- litière : dans le poulailler

Chapitre III : GENERALITES SUR L'EAU DE PUIITS

III.1 DEFINITION D'UN PUIITS

Un puits à eau ou un forage est un ouvrage de captage vertical permettant l'exploitation de l'eau d'une nappe, contenue dans les interstices ou dans les fissures d'une roche du sous-sol qu'on nomme aquifère. L'eau est remontée au niveau du sol soit de façon très simple grâce à un récipient (seau par exemple) soit plus facilement grâce à une pompe, manuelle ou motorisée. [W1]

Les puits sont des ouvrages verticaux peu profonds à parois maçonnées et réalisés en gros diamètre. Ils recoupent le toit de la nappe dans les roches consolidées : les débits sont alors faibles, de quelques m³/jour. Ces puits sont sensibles [W2] :

- Aux variations saisonnières (maximum de débit en hiver et minimum en automne) et climatiques (baisse marquée des niveaux des nappes en période de sécheresse prolongée, pouvant aller jusqu'à l'assèchement temporaire de l'ouvrage) ;
- A la pollution de l'eau, principalement par les nitrates et pesticides.

III.2 TYPES DE PUIITS [W3]

Selon les sources d'alimentation des puits, c'est-à-dire les nappes d'eau souterraine, on distingue en deux grandes catégories : le puits de surface et le puits artésien ou puits profond.

Le choix du type d'ouvrage à réaliser dépend essentiellement de la profondeur de la réserve aquifère (il serait par exemple très difficile ou dangereux de faire creuser un puits à la main par des puisatiers à plus de 30m de profondeur), de la nature géologique du sous-sol, de la quantité d'eau quotidienne nécessaire et du coût de l'ouvrage.

II.2.1 Le puits de surface [W1], [W2], [W3]

Le puits de surface est un ouvrage de captage d'eau souterraine avec un diamètre intérieur généralement supérieur à 60 cm et de profondeur de 9 m à partir de la surface du sol. Il est alimenté par la nappe phréatique ou nappe libre. Ce type de puits est facilement accessible. Toutefois, sa faible profondeur augmente considérablement les risques de contamination. En effet, les eaux de surface souillées peuvent facilement s'infiltrer vers la nappe phréatique. Le

rendement de ce type du puits est directement lié aux conditions climatiques (sècheresse et précipitation) et aux usages intensifs.

II.2.2 Le puits profond [W1], [W3], [W4]

Un puits profond est un ouvrage de captage d'eau souterraine ayant un diamètre habituellement de 150 cm et de profondeur environ de 100 m à partir de la surface du sol. Il est alimenté par la nappe d'eau sous-pression ou nappe captive. Il est habituellement fiable et stable toute l'année pour ce qui est de la qualité et de la quantité de l'eau. Ce type de puits est moins vulnérable face à la contamination provenant de la surface du sol. Donc deux avantages importants pour celui-là : en premier lieu, une plus grande salubrité de l'eau, et en second lieu, une plus grande disponibilité.

III.3 QUALITE DE L'EAU DE PUIITS

Les puits sont alimentés par les couches aquifères ou les réserves d'eau souterraine. Malgré qu'elle puisse avoir une apparence claire et limpide et n'avoir aucune odeur ou saveur particulière, l'eau captée peut contenir des éléments pouvant avoir des effets indésirables sur la santé, par exemple des microorganismes pathogènes (bactéries, virus, ou protozoaires), des nitrates-nitrites et autres substances chimiques. [23]

Seule l'analyse de l'eau de puits peut révéler sa potabilité. Il est conseillé de l'analyser au moins deux fois par an pour ses paramètres microbiologiques et au moins une fois pour ses paramètres physico-chimiques.

III.3.1 Les paramètres physico-chimiques [31], [32], [33]

L'analyse des paramètres physico-chimiques est nécessaire pour observer l'évolution de la qualité de l'eau et de distinguer la présence de contamination dans l'eau. Une vingtaine de paramètres doivent être pris en compte pour connaître la qualité d'une eau. Ce sont la **température**, le **pH**, la **conductivité électrique**, la **turbidité**, la **dureté totale et calcique**, la **teneur en silicate**, la **teneur en matière organique alcaline**, la **teneur en ions ammonium**, **nitrates**, **nitrites**, **sulfates**, **manganèse**, **fluorures**, **chlorures**, **arsenic**, **sodium** et **fer**.

III.3.1.1 La température

La température joue un rôle très important sur l'état physique de l'eau, plus précisément, sur la solubilité de sels et surtout des gaz et sur la détermination du

pH. La structure de la molécule d'eau change à chaque variation de la température. C'est un phénomène d'agitation thermique.

III.3.1.2 Le pH

Le pH est un paramètre très sensible à divers facteurs environnementaux. Il dépend aussi des variations de la température, de la salinité, du taux de CO₂ dissous. Il dépend aussi de la nature géologique du terrain. Il est en fonction de l'assimilation chlorophyllienne, de la respiration des organismes et du métabolisme des bactéries et des champignons inférieurs.

III.3.1.3 Conductivité électrique

La conductivité électrique mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. Elle s'exprime $\mu\text{s/cm}$. Cette composante permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau tels que les chlorures, les sulfates, le calcium, le sodium, le magnésium etc... Elle est influencée par la température car une augmentation de cette dernière conduit à l'accroissement de la valeur de la conductivité.

III.3.1.4 La turbidité

La turbidité représente la transparence d'une eau, c'est-à-dire un élément d'intérêt pour des raisons esthétiques. Elle est l'un des facteurs responsables de la coloration de l'eau. Elle a quand même une importance particulière dans le cas des systèmes chlorés. Pour des systèmes traités par chloration, la limite est plus sévère (1NTU) parce que des particules suspendues dans l'eau peuvent empêcher l'action du chlore sur les pathogènes qui s'y attachent.

III.3.1.5 La dureté totale

La dureté totale ou titre hydrotimétrique totale (T.H.) est la somme des concentrations en ions calcium, magnésium et autres cations bivalent et trivalent dans l'eau (ions alcalino-terreux). La présence des ions Ca²⁺ et Mg²⁺ dans l'eau tend à réduire la toxicité des métaux.

III.3.1.6 La dureté calcique

La dureté calcique ou titre calcique (TH_{Ca}) mesure la quantité en ions calcium existants dans l'eau. Il est à noter que le calcium, apporté par l'eau de boisson a de bienfaits sur la densité osseuse.

III.3.1.7 Le titre alcalimétrique simple (TA)

Le titre alcalimétrique simple mesure la concentration en carbonates et en bases fortes dans l'eau. En d'autres termes, il indique la base libre dans l'eau.

III.3.1.8 Le titre alcalimétrique complet (TAC)

Le titre alcalimétrique complet consiste à déterminer la concentration en ions OH^- , CO_3^{2-} et HCO_3^- dans l'eau. Le titre alcalimétrique est nul si le pH de l'eau est inférieur à 8,2. Cela signifie que les ions hydroxydes dans l'eau sont négligeables. Dans ce cas, la mesure de la teneur en ions bicarbonates HCO_3^- donne le titre alcalimétrique complet.

III.3.1.9 L'indice de minéralisation

L'indice de minéralisation dans l'eau donne la quantité des minéraux présents dans l'eau. Les matières minérales sont généralement des sels de calcium, de magnésium et de potassium sous forme de carbonates, sulfates, chlorures et nitrates. Pourtant, cet indice n'arrive pas à identifier chacun de ces minéraux ; il peut juste dénombrer la totalité.

III.3.1.10 Le chlore résiduel

Le chlore résiduel ou chlore libre (Cl_2) représente la teneur en chlore présent dans l'eau. En effet, cette molécule est très réactive. Sa combinaison avec des substances organiques conduit à la formation des halogénés comme le chloroforme. La présence de chlore dans l'eau peut provoquer de maladie.

III.3.1.11 Le silicate

Le silicate mesure la teneur en silice dans l'eau. La silice se dissout partiellement dans l'eau sous forme de $\text{Si}(\text{OH})_4$. Sa présence dans l'eau possède de nombreux avantages pour l'organisme tels que des os plus solides, de beaux cheveux et une peau plus lumineuse, des artères plus souples et une meilleure digestion, etc.

III.3.1.12 Les matières organiques alcalines

Ce paramètre consiste à mesurer la teneur en oxygène dissous dans l'eau, plus précisément, l'oxygène provenant de matières organiques d'origines animales ou végétales. Une eau de bonne qualité est bien oxygénée. La quantité d'oxygène dissous dépend de la température.

III.3.1.13 La teneur en ions ammoniums

L'ammonium est la forme réduite de l'azote. Expérimentalement, l'azote ammoniacal est toxique pour la vie aquatique. Cet élément provient en général du rejet d'eau de la lessive, des engrais sur les terres agricoles et des eaux usées d'origine industrielle.

III.3.1.14 Le nitrate

La teneur en ions nitrates exprime la quantité en ions nitrates (NO_3^-) existants dans l'eau. Le nitrate est présent surtout dans les eaux souterraines contaminées par des résidus d'engrais ou par les eaux usées domestiques ou de l'élevage. Des effets toxiques sévères sont possibles auprès des enfants, la quantité recommandée doit-être respectée.

III.3.1.15 La teneur en nitrite

La teneur en nitrites mesure la quantité d'ions nitrites (NO_2^-) contenus dans l'eau. Les nitrites s'oxydent facilement en nitrates car ils sont instables. Il est toxique à forte dose, et peut provoquer une maladie infantile (méthémoglobinémie).

III.3.1.16 Le sulfate

La teneur en sulfates représente la quantité en ions sulfate (SO_4^{2-}) présents dans l'eau. Les sulfates proviennent surtout de l'eau de pluie et la mise en solution des roches sédimentaires évaporitiques qui sont les gypses, les chlorures, etc. si la teneur en sulfate est très importante, l'eau devient corrosive.

III.3.1.17 Le fluor

Le fluor ne se présente pas à l'état élémentaire dans la nature, mais plutôt sous forme de sels que l'on regroupe sous le terme générique de fluorures. Les fluorures peuvent être présents de façon naturelle surtout dans les eaux souterraines dans les zones plus arides par dissolution des dépôts minéraux contenant du fluor.

III.3.1.18 Le fer

Ce paramètre représente la quantité en ions ferreux (Fe^{2+}) qui existent dans l'eau. Le fer n'a pas d'effet sur la santé, mais c'est un élément nuisible qui cause des mauvais goûts et qui rend « rouge » la lessive et l'aliment cuit avec.

III.3.1.19 Le manganèse

Le manganèse se trouve dans la nature principalement sous forme de minerais. Il existe plus de 250 minerais contenant du manganèse. On trouve également le

manganèse à de très faibles concentrations dans l'eau, les plantes, les animaux et le corps humain. Comme le fer, le manganèse est un élément nuisible qui cause une coloration noire de l'eau.

III.3.1.20 L'arsenic

L'arsenic est un métalloïde qui se trouve naturellement dans le sol, en particulier dans des zones minières et dans certaines formations sédimentaires. Il peut contaminer l'eau souterraine simplement par la dissolution des roches qui en contiennent. L'arsenic est une toxine.

III.3.2 Les paramètres microbiologiques [34], [35], [36]

L'analyse microbiologique d'une eau de boisson est importante pour détecter la présence des germes responsables des maladies transmises par voie hydrique. Selon le programme de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), quatre germes peuvent exister dans l'eau :

III.2.2.1 Les coliformes totaux

Les *coliformes totaux* constituent un groupe hétérogène de bactéries d'origines fécales que l'on retrouve dans l'intestin de mammifères homéothermes et notamment dans les sols, la végétation et l'eau. Ils sont à l'origine des matières fécales humaines ou animales.

La présence des coliformes totaux dans l'eau, n'indique pas obligatoirement une contamination fécale ni un risque sanitaire, mais plutôt une dégradation de la qualité bactérienne de l'eau. Cette dégradation de la qualité de l'eau peut être attribuée à une infiltration d'eau de surface dans le puits, ou au développement d'un biofilm (dépôt de calcaire et de bactéries) sur les parois du puits et ses canalisations.

III.2.2.2 Les coliformes fécaux (*E. coli*)

L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est l'*Escherichia coli* (*E. coli*). Les bactéries *E. coli* sont très abondantes dans la flore intestinale humaine et animale à sang chaud. Il s'agit de la seule espèce de bactéries strictement d'origine fécale. Leur présence dans l'eau signifie que cette dernière est contaminée par une pollution d'origine fécale et qu'elle peut donc contenir des microorganismes pathogènes.

III.2.2.3 Les streptocoques fécaux ou Entérocoques intestinaux

Ce sont des germes présents dans les intestins des animaux à sang chaud. Leur présence dans l'eau en quantité importante est un indicateur de contamination de l'eau par des excréments ainsi que par d'autres germes porteurs de maladies. Ces bactéries s'apparentent aux coliformes fécaux. Un rapport de Coliformes fécaux sur Streptocoques fécaux supérieur ou égal à 4 peut être considéré comme un indice élevé de contamination fécale d'origine humaine (et un rapport faible montre une origine animale de la pollution).

La détection de bactéries *entérocoques* dans l'eau d'un puits peut indiquer une contamination fécale ou une infiltration d'eau de surface. Il est cependant prudent de considérer la présence de bactéries entérocoques comme une indication d'une contamination fécale.

III.2.2.4 Les clostridiiums sulfito-réducteurs ou anaérobies sulfito-réducteurs

Les anaérobies sulfito-réducteurs se caractérisent par des germes anaérobies stricts. Ce sont des germes telluriques présents dans le milieu extérieur tels que le sol, l'eau et l'air. Ces germes sont capables d'y résister très longtemps sous formes de spores. Ils sont très résistants aux traitements de désinfection et constituent un bon indicateur de l'efficacité de celle-ci.

III.4 LES FACTEURS DE CONTAMINATION DE L'EAU DE PUIITS

On appelle pollution toutes modifications des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des composantes de l'environnement (eau, sol, air) comportant ainsi les usages qui en sont faits ou qui pourraient en être faits. Généralement, ce sont les nappes d'eau superficielles (nappes phréatiques) qui sont les plus exposées à ce phénomène, les nappes profondes étant plus ou moins protégées par la capacité filtrante de la couche de sol qui la recouvre.

Plusieurs facteurs entrent en jeu dans le processus de contamination des nappes d'eau phréatiques à savoir : le **type de sol**, le **comportement social des populations** et ainsi que **l'aménagement du puits lui-même**. [32]

III.4.1 Nature du sol et du sous-sol [32], [37]

La migration des micro-organismes potentiellement dans un profil de sol est considérée comme l'élément déterminant du nombre de micro-organismes qui peuvent être transportés et atteindre les eaux souterraines. La survie et le

transport de ces derniers sont largement influencés par la nature (physico-chimique et caractéristiques pédo-biologique) du sol et des particules propres à chaque microorganisme.

III.4.1.1 Effet de la texture du sol

A travers le phénomène d'absorption (mécanisme par lequel les polluants du sol se fixent à la surface des particules du sol), les sols argileux sont plus favorables à la survie des micro-organismes d'origine fécale car ils constituent un abri aux micro-organismes pour se protéger des prédateurs. En ce qui concerne les coliformes fécaux, le temps de demi-vie est d'environ 30 jours dans un sol sableux, alors que dans un sol argileux il dépasse 200 jours. Mais la texture joue un sens inverse sur la pénétration en profondeur des micro-organismes qui est limité pour les sols ayant de fortes charges en cailloux du fait d'une meilleure porosité et de flux d'eau infiltrés plus importants. Ainsi, les eaux usées s'infiltrant dans les sols sablonneux, parviennent à la nappe sans avoir pu bénéficier d'une filtration efficace, et occasionnent ainsi une multitude de pollutions ponctuelles.

III.4.1.2 Effet de la température et du pH de l'eau

La température et le pH peuvent aussi influencer sur la survie de certains microorganismes. Cette survie des bactéries diminue avec la température. En moyenne l'optimum de température de stockage avoisine les 15 à 20 °C. De même dans le cas particulier des bactéries thermophiles l'optimum de survie est à environ 45°C. Lorsque le pH s'éloigne de la neutralité la survie des bactéries semble affectée négativement.

III.4.1.3 Humidité et influence des zones non saturée et saturée de la nappe

L'humidité du sol est l'un des facteurs principaux déterminant la survie des bactéries dans le sol. Le taux de bactéries augmente avec la teneur en humidité. La propagation des micro-organismes dans le sol est essentiellement liée au mouvement de l'eau. Ce régime est variable selon qu'on se trouve dans la zone saturée ou non saturée.

Dans la zone non saturée, on assiste à une infiltration verticale avec un écoulement gravitaire de l'eau. Si le sol est homogène, les bactéries peuvent pénétrer jusqu'à une profondeur de deux mètres sous conditions de charge hydraulique normale observée dans les systèmes d'assainissement autonome.

Dans la zone saturée, l'écoulement est horizontal et le mouvement de bactéries s'effectue généralement dans le même sens que l'écoulement de la nappe sauf en cas de perturbation du gradient hydraulique naturel (en cas de recharge). La distance maximale parcourue par les micro-organismes est essentiellement déterminée par la vitesse d'écoulement de la nappe.

III.4.1.4 Nature des microorganismes et effet de la végétation

Sauf dans le cas particulier de sol stérile (inexistant en milieu naturel), le sol est un lieu où la compétition est systématique, que ce soit pour l'occupation de micro-habitats ou pour l'accès aux nutriments et à l'eau. Pour les E. coli, ils survivraient moins longtemps dans un sol naturel contenant une multitude de micro-organismes que dans un sol stérile.

Les racines jouent aussi un rôle important, principalement comme voies préférentielles de dispersion et de transport des microorganismes d'origine fécale. La végétation favorise la dispersion des bactéries fécales en facilitant leur passage dans la matrice du sol au contact des racines.

III.4.2 Influence de l'aspect social [32], [37]

Plusieurs études faites sur la contamination des eaux de puits ont pu montrer que celles-ci étaient influencées en grande partie par les comportements à risque des populations. Le rejet d'eaux usées mal traitées, la mauvaise gestion des excréta, le mauvais entretien des puits ainsi que les pratiques agricoles et élevages affectent négativement la qualité de l'eau des nappes superficielles que captent les puits domestiques. Or, la pollution bactériologique de la nappe phréatique captée par les puits domestiques est à l'origine de la latrine. Cette contamination provoque de nombreux problèmes de santé au sein des populations. Ces travaux font état d'une pollution beaucoup plus prononcée lorsque la distance de sécurité (15m) n'est pas respectée entre le point d'eau et la latrine la plus proche. Ainsi, les puits présentant des concentrations bactériologiques (streptocoques fécaux, coliformes thermo tolérants et de coliformes totaux) et chimiques élevées (nitrates et ammonium) étaient généralement très proches des latrines, des fosses septiques, des rivières ou eaux stagnantes polluées et des décharges sauvages.

A Madagascar, l'étude faite par Andrianaivoravelona et al a montré que le mauvais entretien de l'environnement du puits (eaux stagnantes et ordures ménagères) serait aussi à l'origine des pollutions de certains puits.

Les pratiques agricoles et les rejets d'eaux usées ne sont pas à négliger dans la pollution des eaux des nappes phréatiques. Ainsi, l'utilisation de fertilisants peut entraîner une pollution de la nappe phréatique par infiltration de ces derniers dans le sol. Dans les zones où l'assainissement des eaux usées n'est pas maîtrisé, la nappe phréatique montre des valeurs élevées en nitrates et surtout en germes d'origines fécales.

III.4.3 Effet de l'aménagement du puits [32]

L'aménagement du puits joue aussi un rôle très important dans la pollution de la nappe. Des investigations ont montré que la pollution des eaux de puits dépendait du degré d'aménagement de ce dernier. Les puits pour lesquels on note des concentrations élevées en nitrates sont constitués pour la majorité par des puits non aménagés ou semi-aménagés, les puits aménagés étant moins vulnérables. Et un puits couvert a moins de chance d'être contaminé. Il est d'autant plus protégé par les effluents arrivant d'une latrine s'il est construit avec du matériau adéquat.

III.5 LES EFFETS DES DIFFERENTS PARAMETRES SPECIFIQUES DANS L'EAU DE PUIITS SUR LA SANTE

L'eau représente un élément essentiel et irremplaçable pour assurer la continuité de la vie. Cependant, elle peut être aussi une source de maladie. La consommation d'une eau potable, facteur déterminant dans la prévention des maladies liées à l'eau, doit bénéficier d'une attention particulière. En effet, l'eau destinée à la consommation humaine ne doit contenir ni substances chimiques dangereuses, ni germes pathogènes et nocifs pour la santé. [37]

Le MDDELCC, ministère du Québec et le Water Aïd Madagascar recommandent d'analyser les paramètres présentés dans le tableau 6 et le tableau 7 pour déterminer la potabilité de l'eau des puits. Parmi les paramètres microbiologiques, le niveau de coliformes fécaux est la mesure la plus fréquemment utilisée pour indiquer la présence d'une contamination de l'eau d'origine fécale. Les bactéries coliformes ne sont souvent pas de pathogènes,

mais ils sont comparativement faciles à analyser et donnent une indication claire de la présence probable de pathogènes parce qu'ils ne se reproduisent que dans les intestins de certains mammifères, dont les êtres humains.

Tableau 3: Paramètres à analyser recommandés par le MDDELCC pour déterminer la qualité de l'eau d'un puits [Bleu, 2014]

Paramètres microbiologiques	Paramètres physico-chimiques
<i>Bactéries entérocoques</i>	Arsenic
<i>Coliformes totaux</i>	Manganèse
<i>Bactérie E. coli</i>	Baryum
	Nitrites-nitrates
	Chlorures
	Sodium
	Fer
	Sulfates
	Fluorures
	Dureté totale basée sur la teneur en calcium et en magnésium

Water Aid Madagascar recommande les analyses présentées dans le tableau 3 avec ses taux limites.

Tableau 4: Proposition de taux limites de présence des ions [Water Aïd, 2004]

Élément (unités de mesure)	Limite idéale (souhaitable)	Limite absolue
Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	2000	3400
pH	Entre 6,5 et 8,5	Entre 4,5 et 10
Turbidité (NTU)	5	20
Coliformes fécaux (col/100 ml)	0	10
Fluor (mg/l)	1.5	8
Arsenic ($\mu\text{g/l}$)	10	50
Alcalinité (mg/l)	--	--
Nitrate (mg/l NO_3^-)	50	100
Nitrite (mg/l NO_2^-)	0.1	3
Fer (mg/l)	0.3	5
Manganèse (mg/l)	0.1	4

III.5.1 La conductivité [37]

Une haute conductivité indique la possibilité de la présence à un niveau important des ions dangereux à la santé et de la corrosivité de l'eau. A un niveau plus élevé que 2 000 $\mu\text{S/cm}$ le goût de l'eau devient salé et elle peut être rejetée par les consommateurs. Des effets néfastes sur la santé sont à craindre à partir d'une valeur de 3 400 $\mu\text{S/cm}$, surtout pour les enfants de moins d'une année et pour des individus avec des problèmes de santé cardio-vasculaires ou des reins.

III.5.2 Le pH [33]

Les eaux naturelles ont en général un pH qui varie entre 6,5 et 8,5. Si le pH est en dessous de 4,5, des irritations des membranes peuvent se produire et l'eau devient fortement corrosive, avec un goût aigre. Si le pH est au-dessus de 10, les mêmes irritations se produisent et le goût devient savonneux.

III.5.3 La turbidité [33], [37]

La turbidité peut avoir des effets importants sur la quantité microbienne de l'eau. En effet, la croissance microbienne dans l'eau est particulièrement marquée à la surface des particules et à l'intérieur des floes, naturellement présents dans l'eau. Plusieurs études ont mis en évidence un lien entre la turbidité et la présence de

microorganismes (virus, bactéries et protozoaires) dans l'eau. Il a été démontré que :

- * Dans une eau ayant une faible turbidité, l'énumération microbienne est généralement faible ;
- * Il existe une bonne corrélation entre le décompte microbien et la turbidité.

III.5.4 Le Fluor [33], [37]

La concentration maximale de fluor est recommandée à 1.5mg/L. La particularité des fluorures est qu'il existe aussi, pour cette substance, une concentration optimale ayant des bienfaits sur la santé (aide le bon développement des dents). A un niveau au-dessous de 1,5 mg/l, les fluorures ont un effet préventif de la carie dentaire. A des niveaux plus élevés, il peut causer de la fluorose dentaire ainsi que de la fluorose osseuse (affaiblissement des squelettes), surtout aux enfants. Ceci constitue l'effet néfaste le plus grave sur la santé engendrée par une exposition prolongée à de fortes doses de fluorures dans l'eau potable. La fluorose osseuse est un état évolutif non fatal dans lequel les os augmentent de densité et deviennent de plus en plus fragiles. Les cas les plus graves se manifestent par une réduction de l'amplitude des mouvements, des déformations du squelette et l'accroissement des risques de fracture.

III.5.5 L'arsenic [33], [37]

Une exposition prolongée à l'arsenic augmente le risque de cancer de la peau, de cancer des organes internes (poumons et vessie) et une mauvaise circulation sanguine. L'arsenic a des effets sur la reproduction et le développement de l'enfant. Cependant, la norme de l'arsenic dans l'eau est recommandée à 10µg/l. A un niveau inférieur à cette valeur, l'arsenic ne cause pas d'effets importants sur la santé. Avec des valeurs supérieures à ce niveau les impacts sur la santé augmentent, mais ils commencent à être importants à environs 50 µg/l.

III.5.6 Le nitrate [33], [37]

La méthémoglobinémie est considérée comme l'effet cible préoccupant chez les humains exposés au nitrate dans l'eau potable. Elle est caractérisée par une capacité réduite du sang à transporter l'oxygène du fait de la diminution des niveaux d'hémoglobine normale. C'est une maladie rare, cependant, ce sont le plus souvent les nouveau-nés qui sont affectés. Elle peut engendrer des troubles respiratoires ainsi que des vomissements et des diarrhées. Dans les cas

extrêmes, on observe une léthargie marquée, une augmentation de la production de salive, une perte de conscience et des crises convulsives. Certains cas peuvent être mortels. En dessous de 50 mg/l NO_3^- le nitrate ne cause pas des effets néfastes. Entre 50 et 100 mg/l NO_3^- les effets sur les nourrissons alimentés avec du lait en poudre mélangé avec l'eau avec si peu de nitrates ne sont pas généralement sévères ; mais au-dessus de ce niveau les risques augmentent. Les personnes les plus vulnérables étant les femmes enceintes et les nourrissons.

III.5.7 Le nitrite [33], [37]

Les nitrites sont dangereux pour la santé. Ils provoqueraient des cas de méthémoglobinémie : résultant d'une oxydation de l'hémoglobine, la formation de méthémoglobine en grande quantité réduit l'oxygénation des cellules, peut se manifester par une cyanose, coloration bleutée de la peau et des muqueuses, et provoquer l'asphyxie et la mort. Les nourrissons de moins de trois mois sont les plus exposés à ce risque en raison de la faible acidité de leurs estomacs, de leur tendance à développer des infections gastro-intestinales et de leur faible capacité à régénérer l'hémoglobine à partir de la méthémoglobine. Les cas mortels demeurent cependant très rares.

III.5.8 Le baryum [37]

Plusieurs études épidémio-écologiques ont révélé des associations entre la teneur en baryum de l'eau potable et la mortalité attribuable aux maladies cardiovasculaires. Par ailleurs, certains sous-groupes de la population pourraient être plus à risque aux effets du baryum tels que les personnes souffrant d'hypertension, de problèmes cardio-vasculaires ou de maladies des poumons, les femmes enceintes et les fumeurs.

III.5.9 Le fer [37]

A des concentrations normalement trouvées dans l'eau, le fer n'a pas d'effet sur la santé, mais est un élément nuisible qui cause des mauvais goûts et qui rend "rouge" la lessive et l'aliment cuit avec. A un niveau inférieur à 0,3 mg/l les effets sont minimes. Au-dessus de ce niveau le goût et la coloration deviennent de plus en plus marqués et pour un niveau plus élevé que 2 mg/l l'eau risque d'être rejetée par les consommateurs. Toutefois un niveau de 5 mg/l est supportable avec l'aval des consommateurs et en absence d'alternative faisable.

III.5.10 Le Manganèse [33], [37]

Le Manganèse est, selon de récentes études épidémiologiques et animales, un métal qui pourrait aussi avoir des effets néfastes sur le développement neurologique. Sa valeur admissible est fixée à 500µg/L. A une concentration entre 160 et 610µg/l de manganèse, l'eau peut être une source d'exposition importante à ce métal pour des enfants âgés de 6 à 15 ans.

III.5.11 Les coliformes fécaux [33]

Les premiers symptômes d'une contamination par les bactéries E. coli sont de nature gastro-intestinale : la gastro-entérite est la maladie la plus fréquente associée à l'ingestion d'eau contaminée. Bien que cette maladie soit souvent bénigne, elle peut parfois avoir des conséquences très graves sur la santé. D'autres maladies plus rares comme les hépatites ou les méningites peuvent aussi être provoquées par l'ingestion d'eau contaminée par les coliformes fécaux.

La limite idéale (0 coliformes fécaux par 100 ml) élimine toute chance de contamination du consommateur et conséquemment élimine aussi les maladies causées par des pathogènes dans l'eau. Avec un niveau de 10 coliformes fécaux par 100 ml il y a très peu de chance que des maladies hydriques se produisent dans des individus sains. Dans l'environnement des gens il y en a plusieurs autres sources possibles de contamination (les mains sales, la nourriture contaminée, l'environnement insalubre) qui seront donc beaucoup plus importants dans le développement de ces maladies.

L'OMS a recommandé les normes sur les degrés de risque selon le nombre de coliformes dans un échantillon de 100ml.

Tableau 5: Directives de l'OMS pour la caractérisation du risque dans l'eau de consommation [Bessieres, 2005]

Nombres de coliformes fécaux ou E. coli par 100ml d'échantillon d'eau	
0	Conforme aux normes de l'OMS
0 – 10	Risque faible
10 – 100	Risque intermédiaire
100 – 1000	Haut risque
1000+	Très haut risque

III.6 REPARTITION ET QUALITE DES RESSOURCES EN EAU A MADAGASCAR

La situation des ressources en eaux se présente de la façon suivante :

III.6.1 Dans la zone des hauts plateaux [28]

III.6.1.1 Les eaux de surface

Les eaux de surface sont abondantes, peu minéralisées, de bonne qualité physico-chimique dans les bassins supérieurs, mais deviennent fortement chargées en matériaux en suspension dans les cours inférieurs. Elles sont également très chargées bactériologiquement ; les germes aérobies varient de 100.000UFC/100ml ; les *coliformes thermotolérants* de 10.000 à 50.000UFC/100ml ; les coliformes totaux de 30.000 à 100.000UFC/100ml et les germes *anaérobies sulfito-réducteurs* de 100 à 10.000UFC/100ml. Elles doivent subir pour ce fait un traitement en plusieurs étapes pour être utilisées pour la boisson et les usages domestiques.

III.6.1.2 Les eaux souterraines

Ce sont des eaux provenant du sous-sol et contenues dans les aquifères ou les roches réservoirs. Un aquifère étant une formation géologique ou une roche, suffisamment poreuse et/ou fissurée (qui peut stocker de l'eau) et suffisamment conducteur pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe et le captage de quantités d'eau appréciables, les micro-organismes sont peu nombreux dans les eaux de la nappe du fait des conditions généralement anaérobies et de faibles quantités de nutriment disponibles.

Les eaux souterraines peuvent être captées par les sources naturelles, forages ou puits domestiques. Selon la profondeur de l'aquifère, les modes d'exploitation seront différents :

- ♣ Les aquifères peu profonds (3 à 10m) sont exploités traditionnellement par des puits, des sources, des puits profonds ou des puits buisés. L'inconvénient de ces ouvrages est leur contact direct avec les éléments souillés de surface, et ils supposent un traitement similaire à celui des eaux de surface pour une utilisation en eau de boisson.
- ♣ Les aquifères profonds (supérieurs à 10m), sont captés par des ouvrages tels que des puits couverts, fermés, équipés de pompes (forages).

Dans la zone des hauts plateaux, l'approvisionnement en eau potable est assuré, par ordre décroissant du nombre d'infrastructures en place, par système gravitaire à partir des sources issues des nappes d'altération ou d'alluvions, par des captages dans des eaux de surface (lacs et rivières), par des puits dans les nappes d'alluvions ou d'altération. La qualité de l'eau, naturellement bonne, peut être préservée par la mise en place de périmètre de protection, et par l'éducation et la mobilisation des bénéficiaires en vue d'assurer la surveillance de l'évolution de la qualité physico-chimique de l'eau et le respect du périmètre de protection.

III.6.2 Dans les bassins sédimentaires [28]

III.6.2.1 Les eaux de surface

Les eaux de surface ont une bonne qualité chimique (eaux douces avec minéralisation normale) sauf pour le cours inférieur de certaines rivières où on observe une forte salinité en période d'étiage. La qualité physique des eaux est caractérisée par une forte teneur en particules argileuses d'origine latéritique.

Les eaux issues des captages d'eaux de surface doivent être traitées. Les principaux problèmes de qualité d'eaux rencontrés sont les minéralisations élevées de certaines eaux comme celles des nappes du sud et des zones côtières, les risques de pollution domestique dans les nappes peu profondes et les eaux de surface des bassins du Nord et de l'Est, les fortes teneurs en matières argileuses des eaux de surface des bassins ouest.

III.6.2.2 Les eaux souterraines

Les eaux souterraines sont rencontrées, en grande quantité, à des profondeurs généralement supérieures à 20 m, dans des formations perméables (sables et

grès) ou fissurées (calcaires). Elles sont de qualité variable, et sont généralement minéralisées, pouvant être salées dans les nappes du sud et les nappes en bordure des mers. Il faut également noter que des fortes concentrations en NaCl et en sulfates peuvent être rencontrées loin de la mer et en particulier dans la région de Betioky.

Les eaux captées par les forages et les puits peuvent rester de bonne qualité si des mesures adéquates de protection et d'utilisation sont prises comme margelle appropriée et pompe obligatoires pour les puits.

III.7 TAUX D'ACCES A L'EAU POTABLE A MADAGASCAR [27], [28], [W3]

L'accès à l'eau potable est effectivement un droit universel et tous les êtres humains devraient en bénéficier. Or actuellement, à Madagascar et en Afrique comme dans la majorité des pays en voie de développement, l'accès à l'eau est loin d'être inclusif. 2,1 milliard de personnes sont encore privées d'eau potable dans le monde.

La population malgache est encore confrontée à un faible taux d'accès à l'eau potable. Pour l'année 2017, l'approvisionnement en eau potable ne touche pas encore la moitié de la population malgache et plus de la moitié des habitants vivent avec des mauvaises pratiques d'assainissement et d'hygiène. Selon l'enquête du Budget Programme par Objectif Régional (BPOR) en 2016 et 2017, le taux d'accès national en eau potable est de 26% et celui de l'assainissement de base est de 25%.

Et pour l'année 2019, seulement 31% de la population ont l'eau potable chez eux. Les 69% restants sont donc pour le moment privés d'eau avec tout ce que cela implique de risques sanitaires et de freins de développement. Alors qu'à côté, seulement 23% des ressources en eau de Madagascar sont utilisées actuellement.

A Madagascar, la JIRAMA ou « Jiro sy Rano Malagasy » est la seule usine qui traite l'eau du lac et de la rivière jusqu'aux réseaux de distribution (Borne fontaine, pompes à domicile...). Mais, malgré les efforts de la JIRAMA, la couverture géographique des services fournis par cette entreprise est limitée. Les subventions et les ressources propres ne satisfont pas les besoins financiers pour étendre le réseau de distribution ou renouveler des équipements. La faible

performance de la Jirama a une incidence forte sur l'accès à l'eau potable en milieu urbain.

Ainsi, la plupart des gens de la campagne n'ont pas encore cet accès à l'eau potable. Selon l'enquête démographique et de santé réalisée à Madagascar, seuls 41,3% de ces gens ont accès à l'eau potable (bornes fontaines, eau du robinet). Pour les restes, ils s'approvisionnent aux eaux de puits mal traités ou aux eaux de source situés au loin du village alors que les 80% de la population malgache vivent encore dans les milieux ruraux. Les besoins restent très importants en ce milieu, avec 8,8 millions de personnes non desservies. Mais, la mise en place d'infrastructures hydrauliques telles que les bornes fontaines et les forages constituent les efforts consentis par l'état pour offrir aux populations une eau « propre ».

Partie II: MATERIELS ET METHODES

Chapitre IV : MATERIELS ET MATIERES PREMIERES POUR LA CONCEPTION DU FILTRE

IV.1 MATIERES PREMIERES POUR LA CONCEPTION DU FILTRE

A Madagascar, l'accès à l'eau potable est encore un problème non résolu surtout dans les milieux ruraux. En effet, la plupart des gens qui habitent ces derniers utilisent encore des eaux de puits. Par ailleurs, ces eaux peuvent contenir des impuretés et des pollutions. Il est donc nécessaire d'effectuer des traitements domestiques afin de rendre ces eaux potables.

Pour notre étude, nous essayons de fabriquer un filtre à eau potable à base de l'argile, de la pouzzolane et de la sciure de bois.

Cette étude a pour but d'évaluer l'efficacité bactériologique et physico-chimique de ce filtre en terme de traitement de l'eau de puits et l'efficacité du filtre en céramique avec la pouzzolane.

IV.1.1 Argile

C'est le matériau de base du filtre en céramique. Il provenait de la carrière d'un potier à Ambohimanga Antsirabe. Dans cette étude, nous avons utilisé l'argile rouge utilisé par les potiers.

L'argile rouge que nous avons utilisée est un minéral ferreux, et appartient au groupe des montmorillonites.



Figure 13:Argile Rouge [Auteur]

IV.1.2 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée pour la réalisation provient de la région de Betafo, situé à 22km à l'ouest d'Antsirabe sur la route nationale 34 (RN 34). Elle est de couleur gris-noire, de forme scoriacée, et appartient aux projections appelées lapillis.



Figure 14: Pouzzolane naturelle [Auteur]

IV.1.3 Sciure de bois

Ce sont des sous-produits faciles à trouver dans toute l'île. Ce sont des poudres provenant d'une scierie au niveau de laquelle d'importants tas embarrassants l'environnement de ce sous-produit sont enregistrés. Ces sciures de bois non utilisées provoquent des problèmes sur l'environnement car elles sont difficilement biodégradables. Cette utilisation de la sciure de bois est une de la gestion de ce sous-produit.

Elles ont été utilisées ici en tant que source de carbone afin de faciliter l'obtention des pores lors du processus de mis à feu du filtre. Une étude a déjà montré l'utilisation réussie des sciures de bois pour la production de filtre en pot céramique. [14]



Figure 15: Sciure de bois [Auteur]

IV.1.4 Eau utilisée pour la conception du filtre

L'eau est utilisée pour avoir un mélange mou ; elle sera éliminée pendant le séchage et le processus de mis à feu.

L'eau utilisée est l'eau de robinet de la JIRAMA.

IV.2 MOULE ET PRESSE A MOULE

Le moule et la presse à moule utilisées pendant la fabrication du filtre sont en plâtre. Le moule est un objet de forme creuse permettant de modeler une pièce de manière standard. Dans notre étude, nous avons utilisé un moule de forme cylindrique de dimension comme suit : diamètre intérieur $D = 26$ cm et de hauteur $h = 16$ cm. Il est muni d'une presse pour l'extrusion des pâtes.

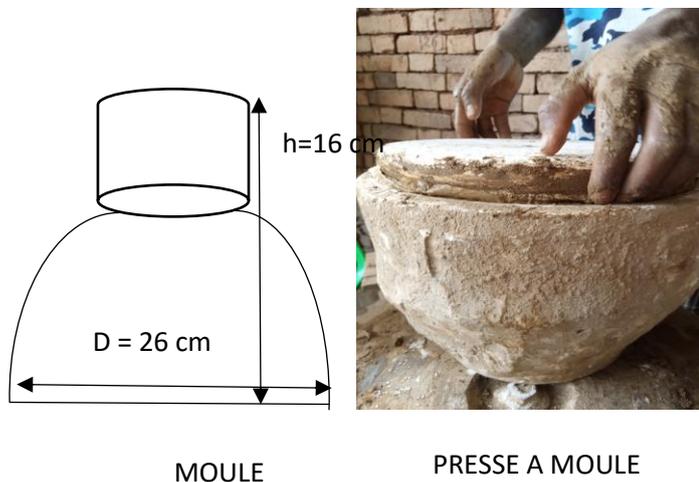


Figure 16 : Moule et Presse à moule [Auteur]

Les matériels pour faire le mélange des matières premières sont :

- Une éponge
- Un couteau
- Un ébauchoir pour lisser l'argile
- Tour

Le matériel de cuisson utilisé au cours de cette étude est un Four céramique à pétrole et gasoil d'une poterie d'Antsirabe.

IV.3 MATERIELS DE LABORATOIRE

Le tableau ci-dessous nous montre les matériels de laboratoire nécessaires avec ses caractéristiques et ses utilisations.

Tableau 6: Matériels de laboratoire [Auteur]

Matériels	Caractéristique	Utilisation
Tamis	Formé par quatre types de maille : 500 µm, 800µm, 4mm et 5mm	Détermination de la granulométrie nécessaire de pouzzolane
Four	Capable de faire une cuisson jusqu'à 1000°C	Cuisson du filtre
Balance	Donne des valeurs exprimées en g	Détermination de la quantité d'argile, de pouzzolane et de sciures de bois pour chaque mélange

IV.4 EAUX A FILTRER : EAUX DE PUIITS

Afin d'évaluer l'efficacité de nos filtres face aux paramètres microbiologiques et aux paramètres physico-chimiques, nous avons choisi de faire le test de filtration avec de l'eau de puits, une eau de consommation quotidienne dans plusieurs zones périurbaines et dans les milieux ruraux de Madagascar.

L'échantillon d'eau a été prélevé à partir d'un puits situé à Mahazina Antsirabe.

Le choix du puits repose sur son entourage, son utilisation et sa description. Il s'agit d'un puits traditionnel (puits creusé), de 12 m de profondeur. D'après notre enquête, il nourrit quatre familles différentes. Son entourage est endommagé par une ferme de porc, par des ordures et une douche, qui se trouvent tout près du puits comme indique la figure suivante.

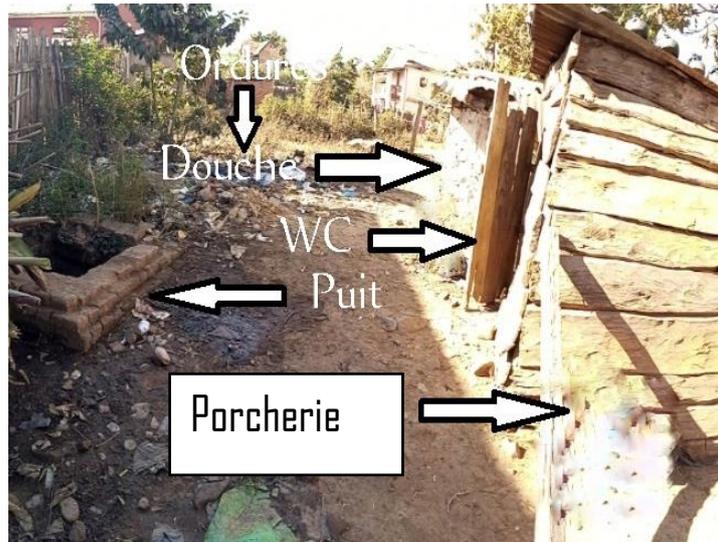


Figure 17: Puits étudié [Auteur]

Chapitre V METHODE DE CONCEPTION DU FILTRE

V.1 ETAPES DE FABRICATION DU FILTRE

A titre de rappel, les matériels et les matériaux ont été trouvés localement et sont accessibles, il s'agit de l'argile, de la pouzzolane et de la sciure de bois.

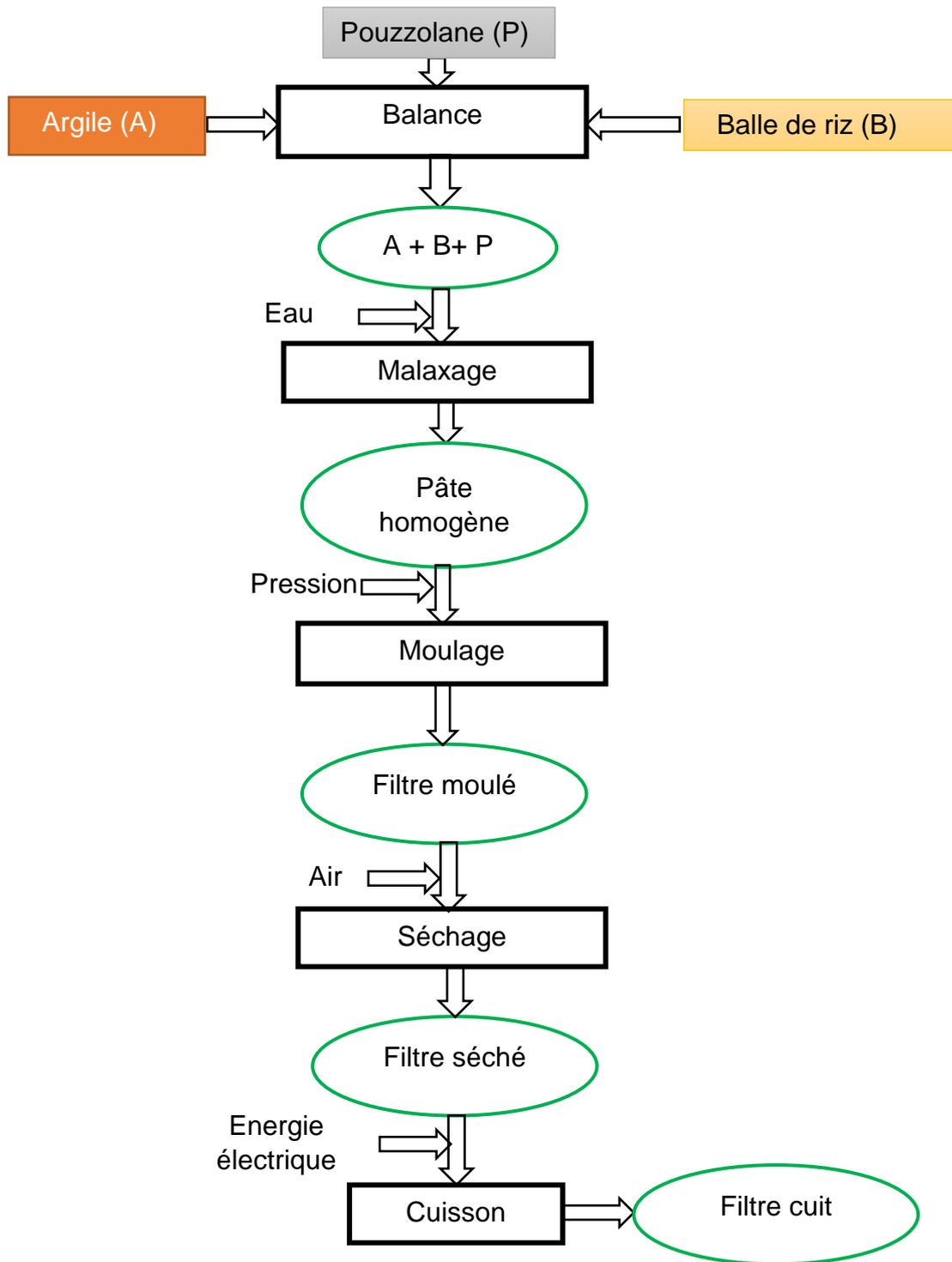
V.1.1 Prétraitement des matières premières

Dans notre cas, l'argile et la pouzzolane ont subi des prétraitements tandis que la sciure de bois est déjà prête à l'emploi et ne nécessite pas de traitement préalable. Les prétraitements sont :

- pour l'argile : l'argile doit être broyé, tamisé et séché avant d'être utilisé
- pour la pouzzolane : le broyage et le tamisage de la pouzzolane nous ont permis d'avoir des particules de diamètres entre 800 μm et 500 μm ;

V.1.2 Processus de fabrication du filtre

Le processus suivi pour la conception des différents types de filtres a été le même. Il faut suivre les étapes indiquées par le diagramme ci-après :



V.1.2.1 Pesage

Nous avons pesé l'argile, la sciure de bois et la pouzzolane dont les proportions sont présentées dans le tableau, dans le but d'obtenir un mélange de 5 kg d'argile-sciure de bois-pouzzolane. La masse d'eau de malaxage utilisée est de 0,40 kg.

Tableau 7: Proportions de chaque matière première pour les différents essais
[Auteur]

Essais	Argile (%)	Sciure de bois (%)	Pouzzolane (%)	Granulométrie de la pouzzolane
Essai 1	80	10	10	800 µm
Essai 2	80	6,6	13,4	800 µm
Essai 3	80	20	0	800 µm
Essai 4	80	0	20	800 µm
Essai 5	80	10	10	500 µm
Essai 6	80	6,6	13,4	500 µm
Essai 7	80	20	0	500 µm
Essai 8	80	0	20	500 µm

V.1.2.2 Malaxage

Le malaxage se fait en deux étapes :

- Mélange à sec :

Pour avoir une pâte homogène dans la meilleure consistance, il faut d'abord bien mélanger les matières premières avant d'introduire la quantité d'eau nécessaire pour le mélange.

- Mélange humide :

C'est la quantité d'eau ajoutée qui détermine la propriété de la pâte, cette quantité joue un grand rôle pour avoir une bonne pâte à mouler ou tourner. Il faut alors bien malaxer la pâte pour avoir la répartition de l'eau dans le produit. Dans notre cas, la teneur en eau est de 25 %.

V.1.2.3 Le moulage

Le mélange obtenu est ensuite introduit dans notre moule pour avoir la forme cylindrique voulue.

V.1.2.4 Le séchage

Nous avons adopté le séchage à l'air libre et l'abri du soleil pendant 10 jours. C'est pendant le cycle de séchage qu'on a observé de divers défauts au niveau de la pièce comme des cassures dues au retrait brusque du volume de la pièce.

V.1.2.5 La cuisson

C'est la dernière étape de la fabrication céramique. Elle consiste à soumettre le produit à un traitement thermique. En effet, le comportement du produit après cuisson nous a permis de dire s'il peut résister ou non à la température donnée. Chaque filtre est mis à feu dans le four pendant 5 à 6 heures à une température de 850°C. Cela permet d'avoir une combustion totale des sciures de bois qui laisseront des micropores au filtre. La pouzzolane est aussi activée en augmentant la taille de leurs pores et l'argile devient dure. La température de la chambre de four est augmentée graduellement : température gardée à 100°C pendant une heure pour enlever l'humidité restante, puis augmentée graduellement à 850°C pendant 2 heures. Elle est gardée à cette température pendant 5 à 6 heures pour permettre la vitrification : les molécules de silice et de l'alumine dans l'argile se fondent et collent et la structure chimique de l'argile et la pouzzolane est changée.

Après cuisson, le filtre est refroidi dans le four pendant environ 15 heures puis à l'air libre.

Les filtres retenus sont ceux qui avaient réussi à passer toutes les étapes sans être endommagés.

V.2 TEST D'EFFICACITE DU FILTRE

Lorsque les filtres sont cuits, ils subissent un test d'efficacité comportant trois étapes : la mesure du débit de la filtration, l'analyse physico-chimique et l'analyse bactériologique des eaux filtrées

V.2.1 Mesure du débit

Dans notre cas, le filtre rempli d'eau à traiter est disposé au-dessus d'un récipient. Le volume d'eau à filtrer ainsi que la durée écoulée lors de la filtration sont mesurés pour pouvoir déterminer le débit de la filtration.

V.2.2 Analyse physico-chimique et analyse microbiologique

Les analyses physico-chimique et bactériologique des eaux de puits brutes et filtrées ont été faites dans le Laboratoire Qualité Eau de la Jirama Mandroseza.

V.2.2.1 Méthode d'analyse physico-chimique

Nous avons fait des analyses complètes pour voir pour quels paramètres physico-chimiques notre filtre est plus efficace. Vingt et un paramètres ont été cherchés. Ce sont : la température, le pH, la turbidité, la conductivité électrique, la dureté totale et calcique, le titre alcalimétrie simple et complète, l'indice de minéralisation, l'ion chlorure, la teneur en matières organiques, la teneur en silicate, la teneur en ions ammoniums, nitrates, nitrites, fer, calcium, magnésium, carbonate, bicarbonate, sodium, sulfate. La méthode d'analyse de ces paramètres peut être classée en trois types : la méthode directe, la méthode colorimétrique et la méthode volumétrique.

V.2.2.1.a Méthode directe

La méthode directe est utilisée pour les paramètres présentés par le tableau 8 ci-après. Il s'agit de mesurer directement chaque paramètre avec l'appareil adéquat.

Tableau 8: Les paramètres utilisant de la méthode directe avec mode opératoire [Auteur]

Paramètres	Appareil de mesure	Mode opératoire d'analyse
Température	Thermomètre	Mesure directe par l'appareil
pH	pH-mètre	<ul style="list-style-type: none"> -Etalonner l'appareil avec une solution tampon à pH=7 et à pH=4 avant toutes mesures. - Plonger la sonde de l'appareil dans l'échantillon à analyser -Effectuer la mesure. - Le pH correspond à la valeur affichée après quelques secondes de stabilité
Turbidité	Turbidimètre	<ul style="list-style-type: none"> -Etalonner le turbidimètre au moyen de la solution étalon avant toutes mesures. -Rincer la cuve turbidimétrique avec l'eau à analyser et la remplir avec précaution pour éviter la formation de bulles d'air. -Essuyer la cuve pour effacer toutes traces de doigts. -Effectuer la mesure en choisissant la bonne gamme
Conductivité électrique	Conductimètre	<ul style="list-style-type: none"> -Etalonner l'appareil avec une solution étalon à conductivité 1278 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C (produit Prolabo). - Plonger la sonde de l'appareil dans l'échantillon à analyser -Effectuer la mesure. - La conductivité correspond à la valeur affichée après quelques secondes de stabilité



Figure 18: Turbidimètre, pH-mètre, conductimètre [Auteur]

V.2.2.1.b Méthode colorimétrique

Dans cette méthode, nous avons utilisé l'appareil spectrophotomètre. Les paramètres déterminés à partir de cette méthode sont : la concentration de l'ammonium, de nitrite et nitrate, de sulfate et de fer.

Pour effectuer ce type d'analyse, il faut suivre les étapes suivantes :

- Réalisation d'une gamme d'étalonnage qui permet de déterminer une absorbance à une longueur d'onde donnée, pour un tube donné ou une cuve de spectrophotomètre de longueur donnée, pour une concentration en composé recherché. Il faut donc préparer une solution de l'élément à doser de faible concentration. Pour la réalisation de gamme d'étalonnage et du dosage, le volume final de liquide dans chaque cuve doit être identique ;
- Réalisation d'un tableau colorimétrique : cela permet d'éviter les erreurs lors de la réalisation de protocoles et de noter les résultats ;
- Lecture des résultats sur le spectrophotomètre.

Les détails sur le mode opératoire d'analyse de chaque paramètre utilisant cette méthode sont énumérés dans l'annexe

V.2.2.1.c Méthode volumétrique

Pour effectuer ce type de méthode d'analyse, il y a alors quatre étapes à suivre :

- ✚ Préparation de la solution à titrer
- ✚ Préparation de la solution titrante
- ✚ Ajout de l'Indicateur coloré adéquat dans la solution à titrer et éventuellement avec une solution tampon
- ✚ Dosage jusqu'à un changement de couleur

Les détails sur le mode opératoire d'analyse de chaque paramètre (dureté totale, dureté calcique, titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet, matières organiques, chlorures) utilisant cette méthode sont énumérés dans l'annexe

V.2.2.2 Méthode d'analyse bactériologique

Les analyses bactériologiques ont été effectuées pour visualiser par dénombrement l'efficacité de chaque filtre sur les quatre germes suivants :

- **Les bactéries *Escherichia coli* (E.C.)**
- **Les bactéries *coliformes totaux* (C.T.)**
- **Les bactéries *Entérocoques* (E.I)**
- **Et les bactéries *Anaérobies sulfito-réducteurs* (ASR)**

Ces bactéries déterminent la potabilité de l'eau selon la norme de potabilité malgache. L'eau est dite potable lorsqu'elle est exempte de ces quatre germes. Les analyses bactériologiques nécessitent un minimum d'attention car chaque geste peut fausser le résultat suite à une contamination microbienne. L'échantillon destiné à l'analyse doit être prélevé soigneusement afin qu'il présente exactement les caractéristiques du milieu d'où il vient. Il faut éviter toutes contaminations depuis le prélèvement jusqu'au laboratoire d'analyse.

Il s'agit d'analyser les eaux à l'entrée et à la sortie de chaque filtre par la méthode de filtration sur membrane suivie d'une culture microbienne avec dénombrement. Les matériels utilisés pour l'analyse de ces quatre germes sont décrits dans le Tableau 9 ci-après :

Tableau 9: Matériels nécessaires aux analyses bactériologiques [Auteur]

Matériels	Caractéristiques	Rôles
Quatre milieux de culture	Couleur : vert brillant, rose, jaune	Nourrir les quatre germes
Trois membranes filtrantes	Papier rond ; Porosité : 0,45 µm	Tenir les germes dans l'eau Assurer la filtration : utiliser comme papier filtre
Trois boîtes de pétri	Verre transparent de forme rond	Contenir le milieu de culture de <i>CT</i> , <i>EC</i> et <i>EI</i> et les trois membranes filtrantes
Un tube à essai	Verre transparent, 10 cm de long	Contenir le milieu de culture de germe <i>ASR</i>
Deux incubateurs	Température : 37°C et 44°C	Assurer la température nécessaire pour l'incubation des bactéries
Un autoclave	-	Assurer la stérilisation des verreries
Rampes de filtration	-	Filtrer l'eau à tester
Une pince à épiler stérilisé par flambage à bec benzène	-	Apporter les membranes de filtration vers les rampes de filtration puis vers les milieux de culture
Un bec-bunsen	-	Stériliser l'environnement de travail jusqu'à 30 cm autour Stériliser le pince à épiler
Alcool 70°	-	Stériliser l'environnement de travail Stériliser la main

V.2.2.2.a Etapes d'analyse

Lors de l'analyse, quatre étapes doivent être effectuées :

- ♣ Préparation au préalable de quatre milieux de culture ;
- ♣ Filtration de l'échantillon d'eau à analyser sur une membrane filtrante ;
- ♣ Emplacement de la membrane ayant fixée les germes dans le milieu de culture ;
- ♣ Et incubation dans l'étuve à différentes températures et à des durées différentes.

V.2.2.2.b Mode opératoire d'analyse

Analyse des germes *coliformes totaux*, *Escherichia Coli* et *Entérocoques*

Une membrane filtrante était placée dans la rampe de filtration et nous avons filtré sur cette membrane 100ml d'échantillon. Cette membrane est ensuite placée à l'aide d'une pince à épiler stérilisée dans le milieu culture dans une boîte de pétri, puis incubée à 37°C pendant 24 heures dans l'incubateur pour le CT, à 44°C pendant 24 heures pour l'EC et à 37°C pendant 48 heures pour l'EI.

La présence de ces germes dans l'eau est identifiée par de :

- ♣ Colonie jaune pour la présence de *coliformes totaux* ;
- ♣ Colonie jaune halo jaune pour la présence de l'*Escherichia Coli* ; et
- ♣ Colonie rouge violacée pour la présence de l'*Entérocoque*.

Analyse des germes *Anaérobies sulfito-réducteurs*

Tout d'abord, nous avons mis 100ml d'échantillon dans un tube à essai qui est chauffé dans un bain marie à 79°C pendant 15 minutes. Après, il est placé immédiatement dans un bain d'eau froide. Puis, 20 ml de milieu Diennert et Guillerd est ajouté dans cet échantillon et le tube est bouchonné. Ensuite, la solution est agitée jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et elle est enfin incubée à 37°C pendant 24 heures.

La présence de ces germes était identifiée par des colonies noires dans le tube à essai et la solution dans ce tube devient toute noire si ces germes sont indénombrables (supérieur à 10.000 UFC).

Le tableau 10 suivant résume les méthodes et conditions de détermination des germes tests précédents :

Tableau 10: Méthodes et conditions de détermination de germes tests

Nom du germe	Nom du milieu	Couleur du milieu	Temps d'incubation	Température d'incubation	Résultats	Normes
CT	Gélose lactosé au bleu de bromothymol et le tergitol 7	Vert	24 h	37°C	Colonie jaune	<1/100ml
EC			24 h	44°C	Colonie jaune halo jaune	<1/100ml
EI	Gélose Slanetz et Bartley	Rose	24 à 48 h	37°C	Colonie rouge violacée	<1/100ml
ASR	Gélose viande foie	Jaune	24 h	37°C	Colonie noire	<1/20ml

Partie III : RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Ce chapitre mettra en exergue dans un premier temps les résultats des travaux en atelier céramique qui vont présenter les différentes compositions testées et celles retenues, les résultats des analyses physico-chimiques microbiologiques des eaux brutes et filtrées. Ensuite, nous présentons les analyses critiques et les interprétations de ces résultats tout en les confrontant à ceux de certains travaux similaires.

VI.1 PRESENTATION DES COMPOSITIONS DU FILTRE

Après avoir essayé les huit (8) premières compositions (Tableau 7), il a été constaté que seules les compositions dans lesquelles la sciure de bois était inférieure ou égale à 10% et la pouzzolane était inférieure ou égale à 13,4% ont donné de bons résultats avec une bonne plasticité. Au-delà de ces proportions, la pâte argileuse est friable et donc inadaptée à la production de filtre.

Aussi, avons-nous observé que les mélanges n'étaient pas solides et se cassaient pendant le séchage. La granulométrie de pouzzolane aussi joue un rôle important sur la qualité du filtre. Cela a donc permis de mieux affiner la recherche avec une première vague de nouvelles compositions un peu précise en granulométrie et une seconde encore plus précise. Alors, nous avons diminué la granulométrie de la pouzzolane en 500µm. Cela a donc permis d'obtenir deux filtres sans fissure de composition **80% d'argile, 10% sciure de bois et 10% de pouzzolane** pour le premier filtre et **80% d'argile, 6,6% sciure de bois et 13,4% de pouzzolane** pour le deuxième filtre. Seule les pouzzolanes de taille 500µm donne un filtre cuit de bonne qualité (lisse et sans fissure).

Les prototypes obtenus après les essais sont ceux ayant résisté à la chaleur dans le four. Nous avons noté ces filtres en **F1 (filtre N°1)** et en **F2 (filtre N°2)**.

Ces deux filtres ont subi les tests d'efficacité : test de débit, analyse des paramètres physico-chimiques et analyse des paramètres bactériologiques au laboratoire d'analyse JIRAMA.

VI.2 DEBIT DE FILTRATION

VI.2.1 Premiers essais de filtration

Les débits de filtration mesurés sur les deux filtres ont varié dans le temps sans toutefois montrer de baisses considérables. Le débit maximal du filtre F1 est de 3

l/h et celui de F2 est de 2,5 l/h. La figure 23 ci-dessous montre la variation des débits des filtres tout au long des jours d'essais.

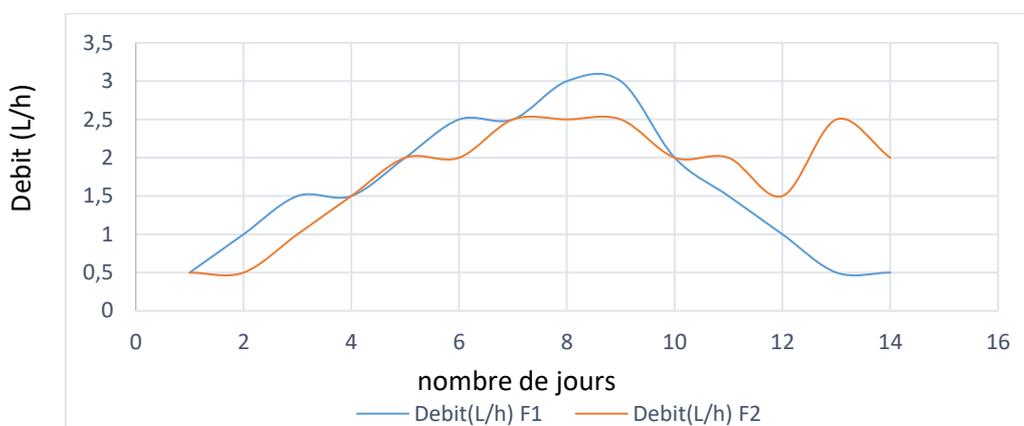


Figure 19 : Variation des débits de filtration lors des premiers essais de filtration [Auteur]

D'après les résultats présentés par la figure 23 ci-dessus, il y a une différence des débits entre les deux filtres. Cette différence pourrait être liée à la variation de composition en argile, sciure de bois, pouzzolane des deux filtres, mais aussi à l'hétérogénéité dans les porosités.

La comparaison des débits des deux filtres a montré que celui avec le filtre F2 est fort. Nous avons remarqué aussi que ce filtre F2 n'a pas la même résistance à l'eau que le filtre F1. F2 résiste bien à l'eau tandis que F1 se dégrade peu à peu tout au long de la filtration : ce phénomène accélère le colmatage par dépôt des particules sur la surface du filtre et explique la diminution de débit avec F1.

Après quatorze jours de filtration, suite à la diminution des débits de filtration, nous avons effectué un lavage de ces deux filtres F1 et F2, puis nous avons repris les essais de filtration. La courbe présentée par la figure 24 ci-dessous nous montre les résultats.

VI.2.2 Deuxièmes essais de filtration

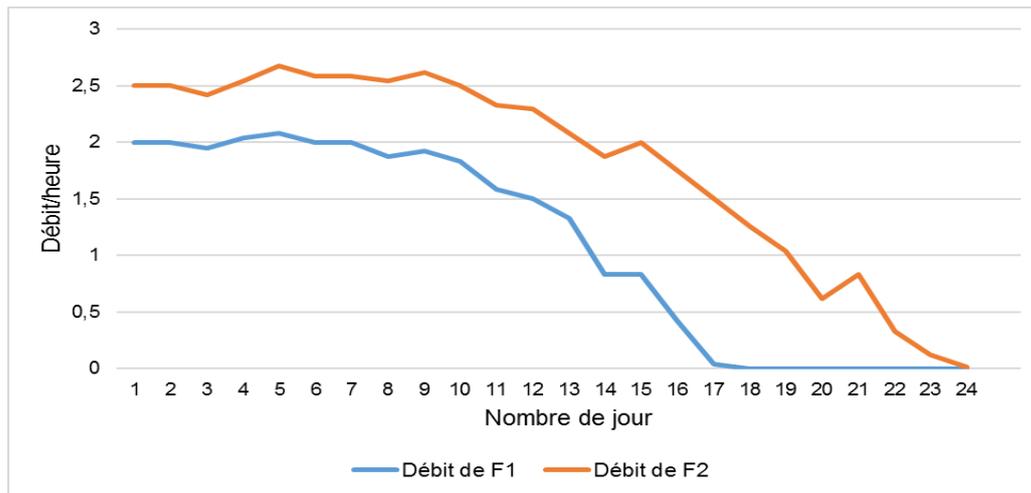


Figure 20: Variation des débits de filtration lors des deuxièmes essais de filtration
[Auteur]

Ces courbes nous confirment que le filtre F2 de composition 80% d'argile, 6,6% sciure de bois et 13,4% de pouzzolane est plus efficace que le filtre F1 de composition 80% d'argile, 10% sciure de bois et 10% de pouzzolane. L'allure générale décroissante des courbes montre que les débits de filtration diminuent au fur et à mesure que la filtration évolue, ce qui est normal car tout phénomène de filtration arrive au stade de colmatage au bout d'un certain temps : au dix-septième jour pour F1 et au vingt quatrième jour pour F2.

Toutefois, d'après les courbes, nous remarquons qu'au cours des filtrations, il y a souvent des augmentations de débit, ces augmentations pourraient être dues à l'augmentation de pression de l'eau à filtrer et la variation de la qualité de l'eau brute. Au cours des essais, nous avons constaté que le débit augmente si le filtre est plein. Il est donc nécessaire de toujours remplir la vase de filtration au cours de son utilisation.

Suite au phénomène de colmatage, nous avons effectué un deuxième lavage à l'aide d'une éponge et du savon et avons repris les essais de filtration. Pendant ces temps, nous avons constaté que les deux filtres peuvent tenir leurs débits auparavant. Nous pouvons conclure donc que nos filtres doivent être lavés tous les vingt jours et ils peuvent être bien régénérés.

VI.3 RESULTATS D'ANALYSE DE L'EAU BRUTE

VI.3.1 Les paramètres physico-chimiques

Le tableau suivant donne les résultats de l'eau de puits ainsi que la comparaison avec la norme Malagasy.

Tableau 11: Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau de puits [Auteur]

NATURE	UNITE	EAU BRUTE	NORME MALAGASY
TEMPERATURE	°C	19,8	20 à 25
TURBIDITE	NTU	23,7	<5
pH		5,68	6.5 à 9
CONDUCTIVITE	µS/cm	1382	<3000
MINERALISATION	mg/l	1245	-
DURETE TOTALE	°f	32	<50
DURETE CALCIQUE	°f	15	-
TITRE ALCALIMETRIQUE	°f	0	-
TAC	°f	1,1	-
CALCIUM	mg/l	60	<200
MAGNESIUM	mg/l	41,31	<50
CARBONATES	mg/l	0	-
BICARBONATES	mg/l	13,42	-
MATIERES ORGANIQUES	mg/l	1,8	<2
AMMONIUM	mg/l	0,25	<0.5
FER TOTALE	mg/l	0	<0.5
CHLORURES	mg/l	350,74	<250
SULFATES	mg/l	9,61	<250
MANGANESE	mg/l	0	<0.05
NITRITES	mg/l	0,35	<0.1
NITRATES	mg/l	0	<50
ARSENIC	mg/l	0	<0.05
SODIUM	mg/l	226,14	-

Interprétation des résultats d'analyse physico-chimique de l'eau brute

Selon le tableau 11 précédent, nous pouvons dire que l'eau de notre puits n'est pas dans les normes de potabilité en termes de paramètres physico-chimiques (température, turbidité, pH, chlorures, nitrites).

Le pH de l'échantillon analysé est 5,68 : il est en dessous de la valeur du pH acceptable suivant les normes de 6.5 à 9. La cause probable de ce pH relativement acide pourrait être la nature géologique du sol.

La valeur de la turbidité est hors norme car l'eau brute contient beaucoup de résidus et est un peu polluée.

Pour la valeur de chlorures, Il y a un écart relativement grand pour la concentration en ions chlorures et la norme, cela pourrait être dû à la nature géologique du sol.

VI.3.2 Les paramètres bactériologiques

Les résultats des analyses bactériologiques de l'eau brute sont dans le tableau 12 suivant.

Tableau 12 : Résultats d'analyse bactériologique de l'eau de puits [Auteur]

Nom des Bactéries	Nombre de germes par 100ml	Norme de l'OMS	Normes Malagasy
<i>Coliformes totaux</i>	3,84 x 10 ³ UFC	0	<1
<i>E. colis</i>	5,2 x 10 ² UFC	0	<1
<i>Entérocoques</i>	<1 UFC	0	<1
<i>Anaérobies sulfito-réducteurs</i>	Indénombrable	0	<20

Interprétation des résultats d'analyse bactériologique de l'eau brute

En terme d'analyse bactériologique, le tableau 12 ci-dessus montre que l'eau de notre puits est fortement contaminée par les *coliformes totaux* ($3,84 \times 10^3$ UFC/100ml), les *E. coli* ($5,2 \times 10^2$ UFC/100ml) et les *anaérobies sulfito-réducteurs* (indénombrable). La forte contamination de l'eau par l'*E. coli* indique la présence de matières fécales dans notre puits car ce germe est le témoin sensible indicateur de matières fécales. Et la présence des spores de bactéries *anaérobies sulfito-réducteurs* dans notre puits aussi suffit à confirmer la contamination fécale des nappes phréatiques. Pour notre cas, le rapport de *Coliformes fécaux (EC)* sur *Streptocoques fécaux (EI)* est de 7,3. Selon les observations de Jagals et al en 2002, un rapport de *Coliformes fécaux (EC)* sur *Streptocoques fécaux (EI)* supérieur ou égal à 4 peut être considéré comme un indice élevé de contamination fécale d'origine humaine (et un rapport faible montre une origine animale de la pollution).

La contamination par les coliformes totaux est influencée par l'environnement immédiat des puits. C'est le cas de notre puits car il est entouré par des rejets d'eaux usées domestiques, particulièrement les eaux usées issues de la douche construite juste à côté, qui s'infiltrent vers la nappe.

VI.4 RESULTATS D'ANALYSE DES EAUX FILTRES

VI.4.1 Les paramètres organoleptiques

Le Tableau 13 ci-dessous résume les caractéristiques organoleptiques des eaux filtrées.

Tableau 13: Paramètres organoleptiques des eaux filtrées [Auteur]

Paramètres	Filtre N°1	Filtre N°2
Aspect	Peu trouble	Limpide
Couleur	Transparente	Transparente
Odeur	Absence	Absence
Goût	Absence	Absence
<p>♣ Filtre N°1 (F1) : filtre formé avec 80% d'argile, 10% sciure de bois et 10% de pouzzolane</p> <p>♣ Filtre N°2 (F2): filtre formé avec 80% d'argile, 6,6% sciure de bois et 13,4% de pouzzolane</p>		

D'après le tableau 13 ci-dessus, nous pouvons dire que les eaux filtrées issues de F1 et celle de F2 sont de bonne qualité organoleptique (limpide, transparente, fade et sans odeur).

VI.4.2 Les paramètres physico-chimiques

Le tableau 14 ci-après nous montre les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux filtrées issues de F1 et F2.

Tableau 14: Résultats d'analyse des eaux filtrées [Auteur]

NATURE	UNITÉ	Filtre N°1	Filtre N°2	EAU BRUTE	NORME MALAGASY
TEMPERATURE	°C	20,4	20,6	19,8	20 à 25
TURBIDITE	NTU	3,82	5,28	23,7	<5
pH		6,82	6,64	5,68	6.5 à 9
CONDUCTIVITE	µS/cm	1256	1308	1382	<3000
MINERALISATION	mg/l	1137	1179	1245	-
DURETE TOTALE	°f	20,8	33,4	32	<500
DURETE CALCIQUE	°f	11	13	15	-
TITRE ALCALIMETRIQUE	°f	0	0	0	-
TAC	°f	1	1,1	1,1	-
CALCIUM	mg/l	44	52	60	<200
MAGNESIUM	mg/l	23,81	49,57	41,31	<50
CARBONATES	mg/l	0	0	0	-
BICARBONATES	mg/l	12,2	13,42	13,42	-
MATIERES ORGANIQUES	mg/l	1,8	2	1,8	<2
AMMONIUM	mg/l	0,24	0,26	0,25	<0.5
FER TOTALE	mg/l	0	0,02	0	<0.5
CHLORURES	mg/l	242,52	291,1	350,74	<250
SULFATES	mg/l	4,06	5,68	9,61	<250
MANGANESE	mg/l	0	0	0	<0.5
NITRITES	mg/l	0,08	0,01	0,35	<0.1
NITRATES	mg/l	0	0,04	0,05	<50
ARSENIC	mg/l	0	0	0	<0.05
SODIUM	mg/l	179,45	168,42	226,14	<200

D'après ce tableau, nous pouvons dire que l'eau filtrée issue de F1 est de bonne qualité par rapport à celle de F2. Pour faciliter l'interprétation des paramètres, nous avons calculé pour chaque paramètre le taux d'abattement de la valeur après filtration par rapport à la valeur initiale :

Tableau 15:Taux d'abattement des paramètres physico-chimiques [Auteur]

Taux d'abattement de chaque filtre		
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	Filtre n°1	Filtre n°2
TEMPERATURE	-3,03%	-4,04%
TURBIDITE	80,70%	73,33 %
pH	-20,07%	-16,90%
CONDUCTIVITE	9,12%	3,87%
MINERALISATION	8,67%	5,30%
DURETE TOTALE	35%	-4,37%
DURETE CALCIQUE	26,7%	13,33%
TITRE ALCALIMETRIQUE	0%	0%
TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET	9,09%	0%
CALCIUM	26,7%	13,33%
MAGNESIUM	41,31%	-20%
CARBONATES	0%	0%
BICARBONATES	9,09%	0%
MATIERES ORGANIQUES	0%	-11,11%
AMMONIUM	4%	-4%
FER TOTALE	0%	2%
CHLORURES	30,85%	17%
SULFATES	57.75%	40,9%
MANGANESE	0%	0%

NITRITES	77.1%	97,1%
NITRATES	100%	20%
ARSENIC	0%	0%
SODIUM	20,65%	25,52%

VI.4.2.1 Le pH

D'après les résultats que nous avons obtenus, nous avons observé une augmentation de pH de l'eau après filtration. Nous pouvons dire alors que le passage de l'eau à travers le filtre en céramique augmente le pH de l'eau. Et il varie en fonction des proportions de la pouzzolane et de la sciure de bois que nous avons utilisé. Le pH de l'eau issue de F1 est supérieur à celui issue de F2. Mais ils sont tous dans la norme recommandée par l'OMS, entre 6,5 et 9.

VI.4.2.2 La dureté totale

La dureté totale de l'eau issue du filtre F2 a augmenté, cela est dû à la proportion de la pouzzolane et de la sciure de bois du filtre.

VI.4.2.3 Les magnésium

Comme la dureté totale a augmenté pour le filtre F2, donc le taux de magnésium augmente évidemment et cela est à cause du filtre.

VI.4.2.4 Les matières organiques

Le taux des matières organiques pour le filtre F2 augmente à cause des caractéristiques du filtre.

VI.4.2.5 L'ammonium

Toutes les formes d'azote (azote organique, ammonium, nitrite etc.) sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. Notre eau brute contient 0,25 mg/l d'ammonium et 0,35 mg/l de nitrites alors que l'eau filtrée avec F1 contient 0,24 mg/l d'ammonium (norme 0,5 mg/l) et 0,08 mg/l de nitrite (norme 0,1 mg/l). L'eau sortant de F2 contient 0,26 mg/l d'ammonium et 0,01 mg/l de nitrites : il y a une augmentation de l'ammonium mais les normes sont respectées, l'étude faite par *J. RODIER* prouve que les eaux en contact avec certains terrains ou certaines conduites peuvent contenir de nitrites indépendamment de toute souillure.

Le nitrate dans l'eau brute peut provenir des fumiers qui s'infiltreront vers le puits. En effet ce puits est construit juste à côté du bâtiment de l'élevage du porc. Le passage de l'eau brute à travers les deux filtres élimine presque tous les nitrates présents dans l'eau brute.

Nous pouvons dire que l'eau filtrée issue de F1 est de bonne qualité par rapport à celle de F2 en termes de paramètres physico-chimiques. Tous ces paramètres sont dans les normes.

VI.4.3 Les paramètres microbiologiques

Le dénombrement des *coliformes fécaux*, des *E. coli*, *Streptocoques fécaux* et des *Anaérobies sulfite-réducteurs* dans les eaux filtrées issues de F1 ne montre aucune trace de ces quatre germes. Tandis que le dénombrement de ces quatre germes de l'eau filtrée sur F2 montre des teneurs faibles en *ASR* mais aucune trace des *EC*, *EI* et *CT* (tableau 16) :

Tableau 16: Résultats d'analyse bactériologique des eaux filtrées [Auteur]

Nom du germe	Nombres de germes par 100ml			Norme de nombre de germes par 100ml	
	Filtre N°1	Filtre N°2	Eau brute	OMS	Malagasy
CT	<1	<1	3,84 x 10 ³	0	<1
E. coli	<1	<1	5,2 x 10 ²	0	<1
Streptocoques fécaux	<1	<1	<1	0	<1
ASR	<1	12	in	0	<20

Le tableau 17 ci-après nous montre le taux d'abattement en *coliformes totaux*, en *E. coli*, en *Streptocoques fécaux* et en *Anaérobies sulfito-réducteurs* de chaque filtre.

Tableau 17:Taux d'abattement des germes test [Auteur]

Nom des germes	Taux d'abattement de chaque filtre	
	Filtre N°1	Filtre N°2
<i>Coliformes totaux</i>	100%	100%
<i>E. coli</i>	100%	100%
Streptocoques fécaux	100%	100%
ASR	100%	99,98%

D'après ce tableau, nous pouvons dire que les deux filtres peuvent éliminer presque toutes les bactéries dans l'eau de puits. Mais, pour une bonne élimination de ces bactéries, il faut utiliser le premier filtre F1 fabriqué à partir de 80% d'argile, 10 % de pouzzolane et 10 % de sciure de bois. Ce filtre donne les meilleurs taux d'abattement : 100% d'abattement des quatre germes.

Chapitre VII : DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Dans ce chapitre seront présentées les discussions des résultats obtenus en comparaison avec des études effectuées auparavant. Le débit sera évalué en premier lieu en fonction des filtres et des différentes compositions. En second lieu, nous évaluerons les rendements des filtres de notre étude par rapport à ceux des autres études afin d'en apprécier l'efficacité.

VII.1 DISCUSSION

VII.1.1 Débits des filtres

Les filtres produits lors de cette étude offrent un débit moyen de 1,8 l/h. Les valeurs dans l'ensemble varient entre 0,5 et 2,5 l/h. Cette tranche de valeurs rejoint sensiblement celle présentée en 2011 par Shanti Kleiman dans son étude sur les filtres produits dans la région nord du Ghana par Pure Home Water : 0,6 à 2,6 l/h. Par ailleurs, la valeur moyenne de débit obtenue dans notre étude est aussi acceptable car elle se retrouve dans la tranche de valeurs admises par plusieurs études c'est-à-dire entre 1 et 3 l/h (Lantagne 2001 ; Brown 2007). Le tableau suivant compare les résultats de notre étude et ceux des autres études antérieures.

Tableau 18: Comparaison de débits de notre filtre avec ceux des études antérieures [Auteur]

Matières premières	Débits L/h	Pays	Références
F1 (argile, sciure de bois, pouzzolane)	0,5-3	Madagascar	La présente étude
F2 (argile, sciure de bois, pouzzolane)	1-2,5	Madagascar	La présente étude
Argile, balles de riz et pouzzolane	1,49 – 2,13	Madagascar	Rakotondrazaka, 2020
Argile, balles de riz	1,5 – 3	Cambodge	Hagen et al, 2009
Argile, balles de riz	0,6 – 2,6	Ghana	Shanti Keiman, 2011
Argile, balles de riz	1 – 3,5	Ghana	Travis Miller, 2010
Argile, balles de riz	1 – 3	Cambodge	Joseph Brown, 2007
Argile, balles de riz	1 – 3	Nicaragua	Daniele Lantagne, 2001
Argile, balles de riz	1 – 9	Burkina Faso	Molly Klarman, 2010

Comme l'indique ce tableau 16, les valeurs minimales et maximales de notre étude restent légèrement inférieures aux autres. Cela pourrait s'expliquer en partie par le fait que les matières premières utilisées ne sont pas les mêmes. La plupart des études menées sur les filtres utilisent les balles de riz comme combustible entrant dans la composition du filtre contrairement à la sciure de bois utilisée dans cette étude.

VII.1.2 L'efficacité du filtre sur l'élimination microbienne

En termes d'efficacité sur l'élimination microbienne, la plupart des études antérieures sur le filtre en céramique ne cherchent que l'efficacité du filtre sur la réduction de bactéries coliformes totaux et *E. coli*. Mais dans cette étude, nous avons cherché l'efficacité de notre filtre sur la réduction des quatre germes

recommandé par l’OMS : les *coliformes totaux*, les *E. colis*, les *streptocoques* et les *ASR*. Si nous comparons nos résultats à ceux des autres études (Lantagne 2001, Smith 2004, Bleu 2014), notre filtre F1 est le plus efficace avec un faible risque de contamination des consommateurs (abattement en *coliformes totaux*, en *E. colis*, en *streptocoques* et en *ASR* jusqu’à 100%). Les études précédentes mouillent leurs filtres par l’argent colloïdal afin d’améliorer leurs résultats et recommandent l’utilisation de chlore pour assurer l’élimination totale des bactéries dans l’eau filtrée. Nos valeurs d’abattement s’apparentent bien à celles trouvées par ces études faites sur les filtres en céramique mouillés par l’argent colloïdal. Nos valeurs sont même parfois meilleures par rapport aux autres résultats dans d’autres travaux de recherche. Le tableau ci-dessous met en évidence une comparaison des résultats de l’étude avec ceux de Lantagne 2001, Smith 2004, Kleiman 2011, Bleu 2014 et Gupta et al 2018.

Tableau 19: Comparaison d'efficacité de nos filtres en termes de réduction microbienne avec celle des autres études [Auteur]

Taux d'abattements						
Matières premières	Type d'eau	CT	EC	EI	ASR	Référence
Argile rouge, balle de riz, pouzzolane	Eau de puits	97,05	80	100	99,89	Rakotondrazaka, 2020
Argile, sciure de bois	Eau de rivière	99,50	99,99	Non validé	Non validé	Sandeep Gupta et al, 2018
Argile, sciure de bois, chamotte	Eau de puits	99,50	100	Non validé	Non validé	Bleu Elodie, 2014
Argile, balles de riz	Eau de puits	73,12	72,28	Non validé	Non validé	Santi Kleiman, 2011
Argile, balles de riz avec argent colloïdal	Eau de surface	100	100	Non validé	Non validé	Smith, 2004
Argile, sciure de bois sans argent colloïdal	Eau de puits	98,23	100	81,82	Non validé	Lantagne, 2001a
Argile, sciure de bois avec argent colloïdal	Eau de puits	100	100	100	Non validé	Lantagne, 2001b
F1 (argile, sciure de bois, pouzzolane)	Eau de puits	100	100	100	100	La présente étude
F2 (argile, sciure de bois, pouzzolane)	Eau de puits	100	100	100	99,98	La présente étude

D'après ce tableau, la performance du filtre en céramique en élimination des bactéries dépend du type d'argile et de matière combustible utilisé. Les filtres constitués de mêmes matières combustibles n'ont pas la même performance.

En général, les filtres contenant de la sciure de bois (Sandeep Gupta et al, 2018 et Bleu Elodie, 2014) sont de bonne performance pour l'élimination des bactéries dans l'eau par rapport aux filtres contenant de la balle de riz (Santi Kleiman, 2011, Rakotondrazaka, 2020). Et si nous comparons nos filtres à ceux de l'étude de Lantagne 2001, Bleu Elodie, 2014 et Sandeep Gupta et al, 2018, l'addition de la pouzzolane dans le filtre en céramique peut améliorer aussi la performance du filtre en termes d'élimination des germes dans l'eau. Les résultats de notre étude sont meilleurs par rapport à ceux de ces études antérieures.

VII.1.3 Efficacité du filtre sur les paramètres physico-chimiques

L'étude complète des paramètres physiques et chimiques de l'eau filtrée fait la différence de la présente étude avec les études antérieures sur le filtre en céramique qui se sont arrêtées à l'étude d'efficacité des paramètres bactériologiques, du pH, de la turbidité et de la conductivité. Cette étude nous a permis de savoir que l'utilisation du filtre en céramique permet d'améliorer les caractéristiques de l'eau filtrée comme la turbidité, la conductivité et la minéralisation, la quantité des matières organiques, les ions ammonium, les nitrates et surtout les nitrites qui sont des éléments dangereux pour la santé.

Cette étude a mis en évidence aussi que le filtre fabriqué avec de la pouzzolane est très efficace que celui à base de l'argile et de sciure de bois seulement.

VII.1.4 Méthode de conception des filtres

Du point de vue méthode de fabrication, nous avons utilisé la même méthode que celle des études antérieures sur les filtres en pot céramique (Lantagne 2001, Klarman 2009, Bleu 2014, Soppe et al 2015, Gupta et al 2018) :

- Préparation des matières premières : séchage, broyage et tamisage de l'argile ;
- Pesage de chaque matériau de la composition pour avoir la proportion ayant définie ;
- Malaxage manuel du mélange de matière première jusqu'à obtention d'une pâte homogène ;

- Moulage de la pâte ;
- Séchage du filtre et cuisson.

VII.2 RECOMMANDATIONS

Cette étude pourrait être une bonne initiative qui devrait permettre d'aboutir à un cadre de production et de distribution pour l'amélioration de la santé de la population Malagasy.

Pour la conception de filtre en céramique, nous recommandons :

- * De mener une étude approfondie sur les propriétés des argiles locales afin de déterminer celles qui sont très efficaces dans la fabrication des filtres
- * De faire des autres études comparatives entre plusieurs combustibles locaux (coques d'arachides, balle de riz) pour déterminer les plus adaptés.
- * De refaire cette même étude sur une période plus longue c'est-à-dire 4 mois, 6 mois ou 1 an en contrôlant les paramètres physico-chimiques et bactériologiques.

Ensuite, pour tenir la performance du filtre, nous recommandons :

- * De nettoyer le filtre en frottant la surface de façon régulière (par semaine).
- * De ne pas attendre le colmatage total du filtre pour le nettoyage afin de prolonger sa durée de vie.
- * De bouillir le filtre avant l'utilisation et tous les trois mois pour assurer l'efficacité du filtre.

Enfin, une étude sur l'utilisation de l'argent colloïdal comme dans les autres études est aussi à mener.

MODE D'EMPLOI DU FILTRE

- * L'utilisateur verse de l'eau dans le filtre. L'eau se déplace lentement à travers le pot en céramique par gravité; elle est ensuite recueillie dans un réservoir de conservation hygiénique. Les utilisateurs ont accès à l'eau traitée grâce à un robinet.
- * Le réservoir inférieur, le robinet et le couvercle doivent être nettoyés régulièrement (par semaine). Le filtre en céramique doit être bouilli et nettoyé avant l'utilisation et tous les trois mois pour assurer l'efficacité du filtre avec un chiffon ou une brosse douce, en prenant soin de ne pas toucher le fond du pot avec quoi que ce soit qui pourrait être contaminé.
- * Les pots en céramique doivent être remplacés tous les 2-3 ans, ou plus tôt si des fissures visibles apparaissent.

Chapitre VIII : APPROCHES SOCIO-ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

L'élaboration du filtre pour eau potable à usage familial de cette étude aura principalement des impacts socio-économiques et environnementaux. L'identification des impacts potentiels a permis de définir les principaux enjeux environnementaux liés à la mise en route du Projet de production du filtre. Les impacts peuvent être positifs et négatifs, lors des étapes de la préparation des matières premières, de la conception et de l'exploitation.

VIII.1 IMPACTS POSITIFS POTENTIELS

Le principal impact positif sera l'amélioration de l'utilisation de l'eau de puits comme source d'eau potable :

- Disponibilité de l'eau potable dans toutes les zones surtout dans les milieux ruraux; pour toutes les familles de tous types de niveau de vie;
- Réduction de l'utilisation des produits chimiques;
- Réduction des maladies d'origine hydrique;
- Valorisation des déchets de sciures de bois

En termes de bénéfices socio-économiques, les impacts positifs sont plus élevés pour tous les peuples Malagasy :

- Accès à l'eau potable pour les populations rurales
- Réduction de la pauvreté par la vulgarisation des techniques de traitement de déchets (sciure de bois) pouvant contribuer à l'amélioration des conditions de vie des populations environnantes
- Amélioration de la vie sociale avec la création d'emplois pour la population locale

VIII.2 IMPACTS NEGATIFS

Des impacts négatifs pourraient être relevés pendant l'élaboration de notre type de filtre à eau potable : l'exploitation potentielle de carrière pour argile, pouzzolane comme matières premières. Elle pourrait constituer des sources d'impacts négatifs pour le milieu naturel.

* Impacts négatifs de l'utilisation de filtre

- Facilité de ré contamination de l'eau potable

- Production de déchets quand le filtre sera cassé ou abimé
 - * Impacts négatifs de l'exploitation de l'argile
- Perte de récolte rizière
- Risque de pollution ou destruction de la nappe phréatique
 - * Impacts négatifs de préparation de la pouzzolane et de l'argile
- Risque de maladie de poumons provoquée par les poussières lors de tamisage et broyage de l'argile et la pouzzolane

Mesures d'atténuation

Les mesures d'atténuation suivantes sont proposées afin de réduire au minimum les impacts défavorables :

- ✚ Désinfection régulière du filtre et du récipient
- ✚ Utilisation des déchets comme fertilisant du sol ou enfouissement
- ✚ Changement de carrière de l'argile
- ✚ Port de masque durant le tamisage et le broyage de l'argile et la pouzzolane
- ✚ Application de la loi sur la gestion de nos forêts
- ✚ Reboisement intensif

CONCLUSION

Le monde est en quête de solution qu'il espère résoudre : le problème d'accès en eau potable, surtout au niveau familial. Madagascar en est concerné car plusieurs familles utilisent encore l'eau de puits chez nous. Le but de cette étude est de contribuer à la résolution de ce problème en proposant la production du filtre à eau en céramique utilisant l'argile, la pouzzolane et les sciures de bois comme matières premières. Cela permet d'avoir une eau potable respectant les normes bactériologique et physico-chimique recommandée par l'Etat Malagasy.

Pour ce faire nous avons conçu différents types de filtres céramiques en variant la composition des matières premières. Pour avoir un filtre céramique de bonne qualité, la proportion de pouzzolane dans le mélange doit être inférieure ou égale à **10%** et celle de la sciure de bois aussi est inférieure ou égale à **10%**. Les essais de fabrication ont montré que la granulométrie de la pouzzolane joue un rôle très important sur l'homogénéité de la pâte. La granulométrie recommandée ne doit pas dépasser les 500µm pour éviter la friabilité de cette pâte.

Les résultats de l'analyse microbiologique se sont avérés satisfaisants car les taux d'abattement sont **100%** en coliformes fécaux ,**100%** en *E. colis* **100%** en *streptocoques* **100%** en *ASR* et toutes les valeurs des paramètres physico-chimiques respectent les normes recommandées par l'OMS. Ces valeurs s'apparentent bien à celles trouvés dans certaines études faites sur les filtres en céramique et sont parfois meilleures par rapport aux résultats dans d'autres travaux de recherche. Ces informations permettent ainsi de confirmer l'hypothèse car les filtres en céramique ont amélioré la qualité bactériologique de l'eau à traiter.

Notre filtre diffère des autres par l'utilisation de la pouzzolane parmi les matières premières. Cette étude a été faite sur la base de matériaux locaux à savoir l'argile, la pouzzolane et la sciure de bois qui sont très répandus dans notre pays. Dans la plupart des autres études, la balle de riz est beaucoup utilisée car selon certains chercheurs, elle est la mieux adaptée car elle permet d'obtenir de meilleurs débits. Il serait donc intéressant pour toutes ces raisons de continuer à mener les recherches approfondies vers d'autres alternatives.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **DEGREMONT**, Lyonnaise Des Eaux, Mémento technique de l'eau, 8ème édition, Paris, 1978.
- [2] Centre de recherche, de développement de transfert technologique acéricole inc, « Procédé de séparation membranaire et leur application dans l'industrie agroalimentaire ».
- [3] Patrice Bacchin, Principes de bases de la filtration membranaire.
- [4] Centre Québécois de Valorisation des biotechnologies. Les techniques membranaires de séparation : une technologie d'avenir ».
- [5] **Siva-unit**, La filtration tangentielle. www.siva-unit.com
- [6] **Serge GARCIA** « Analyse économiques des coûts d'alimentation en eau potable ». [Thèse pour le Doctorat en Sciences Economiques]. Université des Sciences Sociales de Toulouse, 2001, 173 Pages.
- [7] **Amina, H**, *Etude bibliographique sur les techniques de filtration membranaire*, Master en Hydraulique, Université Abou Berk Belkaid-Tlemcen, Faculté de Technologie, 2013
- [8] **Bessières, Y**, *Filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtre critique pour l'anticipation et le contrôle de colmatage*, thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, Université Paul Sabatier, 2005
- [9] **J. MAIRE, H. COLAS, P. MAILLARD** « Membranes de carbone et de graphite et leurs propriétés », Sté CARBONE LORAIN-Paris, France.
- [10] Centre de recherche, de développement de transfert technologique acéricole Inc., « Procédé de séparation membranaire et leur application dans l'industrie agroalimentaire ».
- [11] **J. MAIRE**, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau
- [12] **Patrice Bacchin**, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau.
- [13] **Patrice Bacchin**, Principes de bases de la filtration membranaire
- [14] **Bleu, E. B**, *Traitement de l'eau à domicile : conception et évaluation de l'efficacité des filtres en céramique*, Master d'ingénierie de l'eau et de

l'environnement, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Eau et Assainissement, 2014.

[15] Center for Affordable Water and Sanitation Technology. Household water treatment and safe storage factsheet: ceramic pot filter, Mars, 31p, 2009

[16] Organisation Mondiale de la Santé. *Evaluation des options de traitement domestique de l'eau : cibles sanitaires et spécifiques portant sur les performances microbiologiques*. 2012.

[17] **Dessille, D.**, Conservation et traitement de l'eau à domicile, Décembre, Guide pratique programme de Solidarité Eau, 2012.

[18] **Rasoarimana, A**, Utilisation, *différentes applications et conservations des argiles et ses dérivés à Madagascar*, Licence en Sciences de la terre et de l'environnement, Université de Mahajanga, Faculté des sciences ,2011

[19] **Randrianarivelo, F. I**, *Contribution à l'élaboration de filtre pour eau potable à usage familial*, DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2011

[20] **Philippe, R.**, Memento roches et minéraux industriels : Ponces et pouzzolanes. 1992.

[22] **CH. DOREE**, « Les méthodes de la chimie de la cellulose comprenant des méthodes de recherches sur les celluloses composées », 2ème Edition par Hélène chene et Marcel chene, Editeur : DUNOD, Paris (FR), 582p., 1949

[23] **Czernichowaki, L**, *Pollution des eaux souterraines et superficielles*. BRGM 40615, 71p,1999

[24] **Lagnika, M. et al**, Caractéristiques physico-chimique de l'eau des puits dans la commune de Pobè (Bénin, Afrique de l'Ouest), Applied Biosciences, N° 79 : 6887-6897, Juillet, ISSN 1997-5902, 2014.

[25] **Mpakam, H. G**. Étude des facteurs de pollution des Ressources en eau en Milieu Urbain : Cas de Bafoussam (Ouest-Cameroun). 20 Mai 2015.

[26] **O. M. A.**, Les impuretés bactériologiques dans l'eau : étude des performances des fontaines à eau commerciales et fabrication d'un filtre anti-

bactériologique, Master 2 en Chimie Minérale et Chimie Physique, Université d'Antananarivo, domaine science et technologie, 2014.

[27] **Rajainarisoa, B.** Etude d'une fontaine à eau filtrante : efficacité et cinétique de dégradation du système de filtration. 2014

[28] **Rajaonary, L.** Le suivi de la qualité de l'eau à Madagascar, Ran'eau Malagasy, programme Solidarité-Eau Décembre, 62p. <http://www.raneau.org>, 2018

[29] **Andriamihaja, O. M. A.** Les impuretés bactériologiques dans l'eau : étude des performances des fontaines à eau commerciales et fabrication d'un filtre anti-bactériologique, Master 2 en Chimie Minérale et Chimie Physique, Université d'Antananarivo, domaine science et technologie, 2014.

[31] **EL, Haissoufi et al.** Pollution des eaux de puits certains quartiers de la ville de Fes, Maroc. Microbiol. Ind. San et Environnement. Vol 5, p : 37-68, 2011.

[32] **Gandji, M.** Etude de l'état de la pollution des eaux des puits domestiques : cas de la commune urbaine d'OUAHIGOUYA (BOURKINAFASO), Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Assainissement, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement Burkina Faso, 2015.

[33] **SWISS MAROC.** Potabilisation eau de puits et de forages. 2014.

[34] **Travis, R. M.**, Optimizing Performance of Ceramic Pot Filters in Northern Ghana and Modeling Flow through Paraboloid-Shaped Filters, Master en Ingénierie Civile et Environnement, State University de New York, Massachusetts institute of Technology, 2010.

[35] Wateraid Madagascar. Politique de la qualité de l'eau. Version N°3, Février 2004.

[36] Rapport finale : Cadre stratégique d'investissement pour le secteur de l'eau, l'assainissement et l'hygiène à Madagascar : 2015-2030. Septembre 2015.

[37] **Anais, F.** La qualité de l'eau de puits individuels au Québec : comment améliorer les pratiques d'analyses ? Maîtrise en Environnement, Université de Sherbrook ,2016

[38] Brown, J. M., *Efficacité de filtration en céramique pour le traitement d'eau potable au Cambodge*, 2007.

REFERENCES WEBOGRAPHIQUES

[W1] <https://water.fr/E28-Les-divers-types-de-puits-et-de-forages-Generalites>, consulté le 23 juin 2021

[w2] <https://www.sdea.fr/index.php/fr/les-services/conseil/j-utilise-l-eau-de-puits-et-de-pluie> , consulté le 12 juillet 2021

[w3] / <http://www.borddeleau.com/blog/a-propos-des-puits/>, consulté le 20 juillet 2021

[W4] www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/15-048.htm, consulté le 20 juillet 2021

[W5] <http://www.pouzzolane-dugour.com>, consulté le 21 juillet 2021

[W6] [klouky.free.fr/Histoire/les volcans](http://klouky.free.fr/Histoire/les_volcans), consulté le 21 juillet 2021

ANNEXES

ANNEXE 1 : Plantes utilisées à la fois comme agents de floculation et comme traitement, en médecine traditionnelle, des maladies transmises par l'eau

Espèces	Symptômes	Préparation	Pays
<i>Acacia catechu</i>	Diarrhée	Extrait résineux du bois	Inde
<i>Acacia scorpioides</i>	Dysentérie	Ecorce bouillie	Sénégal
<i>Blepharis persica</i>	Maux d'estomac	Infusion de la plante dans sa totalité	Soudan
<i>Boscia</i>	Désordres intestinaux	Feuilles séchées dans lait caillé, racines, écorce	Sénégal
	Schistosomiase	Ecorce moulue dans soupe de farine de mil	Niger
<i>Faba vulgaris</i> (<i>Vicia faba</i>)	Désordres gastriques	Fèves grillées	Maroc
	Dysentérie	Farine de fèves	Grèce antique
<i>Moringa oleifera</i>	Désordres gastro-intestinaux	Infusion de graines moulues avec du café abyssinien	Soudan
		Infusion de graines	Niger
	Diarrhée	Graines moulues dans lait caillé	Tchad
<i>Pongamia glabra</i>	Parasitoses intestinales et cutanées	Graines	Inde
<i>Strychnos potatorum</i>	Diarrhée chronique	Broyer une graine ou demi-graine, l'incorporer à du beurre	Inde
	Infections des yeux, furoncles	Graines moulues dans du miel	

**ANNEXE 2 : Mode opératoire d'analyse des paramètres utilisant la méthode
Colorimétrique**

Paramètres analysés	Mode opératoire
Nitrates	<ul style="list-style-type: none"> - Prélever 50mL d'une eau à analyser à l'aide d'une éprouvette graduée, le verser dans un bécher - A l'aide d'une pipette, ajouter une goutte de NaOH 3N et 1,25mL de tampon concentré - Virage rose de la solution - Lecture au spectrophotomètre Nat2 - Résultat : $\text{NO}_3^- = (\text{Nat-Nit}) \times 4,43$
Nitrites	<ul style="list-style-type: none"> - La prise de l'eau à analyser est de 50mL - Ajouter une goutte de H_3PO_4 et 1mL de réactif coloré conservé à 4°C à l'aide d'une pipette - Virage rose de la solution - Lecture au spectrophotomètre Ni12 - Résultat : $\text{NO}_2^- = \text{Nit} \times 3,29$
Ammonium	<ul style="list-style-type: none"> - Rincer le bécher à l'aide d'une solution HCl diluée deux fois et de l'eau distillée - Prendre 25mL de l'échantillon - Préparer une solution de tri-sodium citrate et de l'eau de javel dont 10mL de tri-sodium citrate correspond à 2,5mL d'eau de javel. Prend 2,5mL de cette solution - Ajouter 1mL de phénol et 1mL de nitroprusside - Reposer la solution pendant 1 h - Virage bleu de la solution - Lecture directe au spectrophotomètre
Sulfates	<ul style="list-style-type: none"> - Prélever 20mL de l'échantillon - Ajouter 0,5mL de HCl 10% et 2,5mL de chlorure de baryum - Présence d'un précipité blanc - Lecture directe au spectrophotomètre Su12
Fer	<ul style="list-style-type: none"> - Verser 100mL de l'eau à analyser - Ajouter une pincée de diphonie de sodium, 2mL d'ammoniac 10% - Virage au rose de la solution - Lecture directe avec un comparateur hydrocuté 0,06 à 1 mg/L

**ANNEXE 3 : Mode opératoire d'analyse des paramètres utilisant la méthode
Volumétrique**

Paramètres à analyser	Mode opératoire
Dureté totale (TH)	<ul style="list-style-type: none"> - La prise de l'eau à analyser est de 100mL - Ajout de 2mL de tampon TH et quatre gouttes de NET - Coloration rouge vineuse - Dosage de la solution par l'EDTA jusqu'au virage bleu vert - Calcul : TH en mg/L CaCO₃ = ml de EDTA x 1000 x F_d/ml d'échantillon
Dureté calcique (TH_{Ca})	<ul style="list-style-type: none"> - La prise de l'eau à analyser est de 100mL - Ajout de 2mL de NaOH 3N et une pincée de Patton reeder - On dose la solution par l'EDTA jusqu'au virage bleu - Calcul : TH_{Ca} en mg/L = ml de EDTA x 1000 x F_c/ml d'échantillon
Titre alcalimétrique (TA) et Titre alcalimétrique complet (TAC)	<ul style="list-style-type: none"> - Prendre 100mL de l'eau à analyser - Verser quelques gouttes de phénophtaléine - Si la solution reste incolore (elle ne vire pas), TA=0 - Si la solution vire au rose, elle contient de TA, titrer avec l'H₂SO₄ jusqu'au virage incolore - Pour déterminer le TAC, verser 1 à 2 gouttes d'hélianthine - Coloration jaune - Sans remise à zéro de la solution titrant H₂SO₄, continuer le titrage jusqu'au virage jaune orangé - TAC en méq = ml de H₂SO₄ x 5
Matières organiques	<ul style="list-style-type: none"> - Prélever 100mL de l'échantillon - Ajouter 5mL de bicarbonate de soude NaHCO₃ - Chauffer jusqu'à ébullition, puis ajouter 10mL de KMnO₄ N/80. Attendre 15minutes - Après 15minutes, enlever la solution, attendre jusqu'à ce qu'elle soit tiède - Ajout de 5mL de H₂SO₄ N/2 (coloration en rose violacée) et 10mL de sel de Mohr (décoloration en blanc) - Titration avec du KMnO₄ N/80 jusqu'au virage rose de la solution - Résultat final : moins 1,4
Chlorures	<ul style="list-style-type: none"> - Prendre 100mL de l'échantillon. - Verser cinq gouttes de dichromate de potassium - Coloration jaune - Titration avec du AgNO₃ jusqu'au virage rouge brique

- Lecture du résultat : volume versé d'AgNO₃ x 35,5

ANNEXE 4 : Norme de potabilité de l'eau selon l'OMS

DESIGNATIONS DES PARAMETRES		LIMITES	UNITES
Paramètres microbiologiques	Coliformes totaux	0	N/100ml
	Entérocoques	-	N/100ml
	Streptocoques fécaux	Pas de valeur	N/100ml
	Organismes pathogènes	Pas de valeur	variable
	Coliformes thermotolérants	0	N/100ml
	E. coli	0	N/100ml
	Clostridium sulfito-réducteur	Pas de valeur	N/20ml
Paramètres d'esthétiques	Couleur	<15	mg.L ⁻¹
	Turbidité	<5	NTU
	Température	-	°C
	pH	6.5 à 8.5	-
	Odeur	Absence	-
Paramètres inorganiques	Chlorures	<250	mg.L ⁻¹
	Sulfates	<250	mg.L ⁻¹
	Magnésium	-	mg.L ⁻¹
	Sodium	<200	mg.L ⁻¹
	Calcium	<400	mg.L ⁻¹
	Potassium	-	mg.L ⁻¹
	Aluminium	<0.2	mg.L ⁻¹
	Nitrates	44	mg.L ⁻¹
	Nitrites	-	mg.L ⁻¹
	Ammoniums	-	mg.L ⁻¹
Paramètres organiques	Monochlorobenzene	300	µg.L ⁻¹
	Trichlorobenzene	20	µg.L ⁻¹
	Dichlorométhane	20	µg.L ⁻¹
	Chlorure de vinyle	5	µg.L ⁻¹
	Acrylamide	0.5	µg.L ⁻¹
	Styrène	20	µg.L ⁻¹
Paramètres Radioactifs	Alpha global	0.1	Becquerel.L ⁻¹

	Radium 226/228	-	picoCurie. L ⁻¹
	Uranium	-	picoCurie. L ⁻¹
	Radon	-	µg.L ⁻¹

ANNEXE 5 : Norme de potabilité selon l'état Malagasy

L'Etat Malgache a regroupé les normes de référence applicables à l'eau de consommation en six catégories promulguées le 20 janvier 1999 suivant la loi n°98-029. En général, les différents paramètres auxquels doivent satisfaire l'eau alimentaire sont :

- * Les paramètres organoleptiques,
- * Les paramètres physico-chimiques, concernant les substances indésirables et les substances toxiques,
- * Les paramètres biologiques,
- * Les paramètres bactériologiques.

Le tableau ci-après montre les normes de potabilité des eaux à Madagascar.

PARAMETRES		UNITES	NORMES		
PHYSIQUES	TEMPERATURE	°C	<25		
	TURBIDITE	NTU	<5		
	CONDUCTIVITE	µS/cm	<3000		
	pH		6.5 – 9		
			MINIMA	MAXIMA	
CHIMIQUES	ELEMENTS NORMAUX	CALCIUM	mg/L	200	
		MAGNESIUM	mg/L	50	
		CHLORURE	mg/L	250	
		SULFATE	mg/L	250	
		OXYGENE DISSOUT	%	75	
		DURETE TH	mg/L en CaCO ₃		500
	ELEMENTS INDESIRABLES	MATIERES ORGANIQUES	mg/L		2 (milieu alcalin) 5 (milieu basique)
		AMONIUM	mg/L		0.5
		NITRITE	mg/L		0.1
		AZOTE TOTAL	mg/L		2
		MANGANESE	mg/L		0.05
		FER TOTAL	mg/L		0.5
		PHOSPHORE	mg/L		5
		ZINC	mg/L		5
		ARGENT	mg/L		0.01
		CUIVRE	mg/L		1
		ALUMINIUM	mg/L		0.2
		NITRATE	mg/L		50
		FLUOR	mg/L		1.5
		BARYUM	mg/L		1
	ELEMENTS TOXIQUES	ARSENIC	mg/L		0.05
		CHROME TOTAL	mg/L		0.05
		CYANURE	mg/L		0.05
		PLOMB	mg/L		0
		NICKEL	mg/L		0.05
		Polychlorobiphényle	mg/L		0.01
	ORGANOLEPTIQUES	SAVEUR		ABSCENCE	
COULEUR			INCOLORE		
Odeur désagréable			ABSCENCE		
BIOLOGIQUES	DCO	mg/L	150		
	DBO	mg/L	50		
BACTERIOLOGIQUES	CT	ml	0/100		
	EI	ml	0/100		
	<i>E. coli</i>	ml	0/100		
	CSR	ml	<20/100		

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	ii
GLOSSAIRE	iii
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES UNITES ET ABREVIATIONS	vi
INTRODUCTION	1
Partie I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	2
Chapitre I : LES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DE L'EAU A DOMICILE.....	3
I.1 LA TECHNIQUE DE FILTRATION [1]	3
I.1.1 Généralité de la filtration membranaire [2] [3].....	3
I.1.2 Modes de Fonctionnement [4] [5]	5
I.1.3 Les différents procédés de filtration membranaires [6]	7
I.1.4 La membrane [7] [8].....	7
I.2 AUTRES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DE L'EAU A DOMICILE	17
I.2.1 Les techniques de sédimentation [14], [15], [16].....	17
I.2.2 Les techniques de désinfection [16][17]	18
I.3 CONCLUSION PARTIELLE	20
Chapitre II : GENERALITES SUR L'ARGILE, LA SCIURE DE BOIS ET LA POUZZOLANE	21
II.1. L'ARGILE [18]	21
II.1.1 Définition	21
II.1.2 Classifications de minéraux argileux.....	21
II.1.3 Les argiles du nom du minéral argileux	23
II.1.4 Gisements de l'argile à Madagascar.....	24
II.1.5 Les argiles de Madagascar.....	24
II.1.6 L'application de l'argile dans le traitement des eaux	24
II.2. LA POUZZOLANE [19], [20]	26
II.2.1 Définitions.....	26
II.2.2 Mode de formation	27
II.2.3 Types de pouzzolanes.....	28
II.2.4 Activités pouzzolaniques.....	30
II.2.5 Effets de la température sur les pouzzolanes naturelles et artificielles	31

II.2.6	Caractéristiques des pouzzolanes	31
II.2.7	La pouzzolane dans le domaine de filtration	33
II.3	LA SCIURE DE BOIS [21]	33
II.3.1	Définitions [22].....	33
II.3.2	Caractéristiques de sciure de bois.....	33
II.3.3	Les différentes familles de bois	34
II.3.4	Composition élémentaire de bois.....	34
II.3.5	Structure moléculaire de bois.	34
Chapitre III	: GENERALITES SUR L'EAU DE PUIITS.....	37
III.1	DEFINITION D'UN PUIITS	37
III.2	TYPES DE PUIITS [W3].....	37
II.2.1	Le puits de surface [W1], [W2], [W3]	37
II.2.2	Le puits profond [W1], [W3], [W4]	38
III.3	QUALITE DE L'EAU DE PUIITS	38
III.3.1	Les paramètres physico-chimiques [31], [32], [33].....	38
III.3.2	Les paramètres microbiologiques [34], [35], [36].....	42
III.4	LES FACTEURS DE CONTAMINATION DE L'EAU DE PUIITS.....	43
III.4.1	Nature du sol et du sous-sol [32], [37].....	43
III.4.2	Influence de l'aspect social [32], [37].....	45
III.4.3	Effet de l'aménagement du puits [32]	46
III.5	LES EFFETS DES DIFFERENTS PARAMETRES SPECIFIQUES DANS L'EAU DE PUIITS SUR LA SANTE	46
III.5.1	La conductivité [37].....	48
III.5.2	Le pH [33]	48
III.5.3	La turbidité [33], [37].....	48
III.5.4	Le Fluor [33], [37].....	49
III.5.5	L'arsenic [33], [37]	49
III.5.6	Le nitrate [33], [37].....	49
III.5.7	Le nitrite [33], [37].....	50
III.5.8	Le baryum [37]	50
III.5.9	Le fer [37].....	50
III.5.10	Le Manganèse [33], [37].....	51
III.5.11	Les coliformes fécaux [33]	51
III.6	REPARTITION ET QUALITE DES RESSOURCES EN EAU A MADAGASCAR 52	
III.6.1	Dans la zone des hauts plateaux [28]	52
III.6.2	Dans les bassins sédimentaires [28]	53

III.7 TAUX D'ACCES A L'EAU POTABLE A MADAGASCAR [27], [28], [W3]	54
Partie II: MATERIELS ET METHODES.....	56
Chapitre IV : MATERIELS ET MATIERES PREMIERES POUR LA CONCEPTION DU FILTRE.....	57
IV.1 MATIERES PREMIERES POUR LA CONCEPTION DU FILTRE	57
IV.1.1 Argile.....	57
IV.1.2 Pouzzolane naturelle.....	58
IV.1.3 Sciure de bois.....	58
IV.1.4 Eau utilisée pour la conception du filtre	59
IV.2 MOULE ET PRESSE A MOULE	59
IV.3 MATERIELS DE LABORATOIRE	59
IV.4 EAUX A FILTRER : EAUX DE PUIITS	60
Chapitre V METHODE DE CONCEPTION DU FILTRE.....	62
V.1 ETAPES DE FABRICATION DU FILTRE	62
V.1.1 Prétraitement des matières premières	62
V.1.2 Processus de fabrication du filtre	62
V.2 TEST D'EFFICACITE DU FILTRE	66
V.2.1 Mesure du débit	66
V.2.2 Analyse physico-chimique et analyse microbiologique.....	66
Partie III : RESULTATS ET DISCUSSION.....	73
Chapitre VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	74
VI.1 PRESENTATION DES COMPOSITIONS DU FILTRE	74
VI.2 DEBIT DE FILTRATION	74
VI.2.1 Premiers essais de filtration.....	74
VI.2.2 Deuxièmes essais de filtration.....	75
VI.3 RESULTATS D'ANALYSE DE L'EAU BRUTE	76
VI.3.1 Les paramètres physico-chimiques	76
VI.3.2 Les paramètres bactériologiques	78
VI.4 RESULTATS D'ANALYSE DES EAUX FILTRES	79
VI.4.1 Les paramètres organoleptiques.....	79
VI.4.2 Les paramètres physico-chimiques	80
VI.4.3 Les paramètres microbiologiques	84
Chapitre VII : DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS.....	86
VII.1 DISCUSSION	86
VII.1.1 Débits des filtres	86
VII.1.2 L'efficacité du filtre sur l'élimination microbienne	87

VII.1.3 Efficacité du filtre sur les paramètres physico-chimiques.....	90
VII.1.4 Méthode de conception des filtres.....	90
VII.2 RECOMMANDATIONS	91
MODE D'EMPLOI DU FILTRE.....	92
Chapitre VIII : APPROCHES SOCIO-ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX	93
VIII.1 IMPACTS POSITIFS POTENTIELS	93
VIII.2 IMPACTS NEGATIFS	93
CONCLUSION	95
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	96
REFERENCES WEBOGRAPHIQUES	99
ANNEXES	a
TABLE DES MATIERES	h

Auteur : RAMBELOSON Anjaraniaina Mickaya

Titre du mémoire :

**« CONCEPTION DE FILTRE A EAU DOMESTIQUE, EN
CERAMIQUE AVEC DE L'ARGILE, DE LA SCIURE DE
BOIS ET DE LA POUZZOLANE »**



Nombre de pages : 99

Nombre de tableaux : 19

Nombre de figures : 20

RESUME :

Actuellement, le taux d'accès en eau potable à Madagascar est inférieur à 50%. Nous sommes encore parmi les derniers dans l'Afrique subsaharienne. Dans les milieux ruraux malgaches, beaucoup de familles utilisent directement l'eau de puits, l'eau de sources, l'eau de rivière pour la consommation sans traitement au préalable, au détriment de leur santé. L'objectif de l'Etat malgache est de « garantir l'accès de tous à l'eau, à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau », avec un taux d'accès à l'eau potable de 70% pour la population Malagasy en 2023. Notre projet contribue à cet objectif en mettant au point une méthode durable de filtration de l'eau : fabrication de filtre à eau céramique à usage familial, à partir de l'argile, de la sciure de bois et de la pouzzolane. Notre méthode comprend l'étude des matières premières, la recherche des bonnes méthodes de fabrication du filtre, les essais de filtration et l'analyse des eaux filtrées obtenues et l'étude d'impact socio-économique de ce produit. Les différents essais menés et les analyses au laboratoire ont montré que notre filtre à eau domestique permet d'obtenir de l'eau filtrée qui respecte les normes de potabilité de l'eau. Son procédé de fabrication est simple mais efficace. L'étude de marché menée a montré qu'il sera à la portée du pouvoir d'achat des familles malgaches. C'est un produit écoresponsable car il permet aussi la valorisation des déchets de sciure de bois, utilisée comme matière première.

Mots clés : filtre en céramique, eau de puits, pouzzolane, argile, sciure de bois

ABSTRACT:

Currently, the rate of access to drinking water in Madagascar is less than 50%. We are still among the last in sub-Saharan Africa. In rural Malagasy areas, many families directly use well water, spring water, river water for consumption without prior treatment, to the detriment of their health. The objective of the Malagasy State is to "guarantee access for all to water and sanitation and ensure sustainable management of water resources", with a rate of access to drinking water of 70 % for the Malagasy population in 2023. Our project contributes to this objective by developing a sustainable method of water filtration: manufacture of ceramic water filter for family use, from clay, sawdust and pozzolana. Our method includes the study of raw materials, the search for the correct manufacturing methods of the filter, the filtration tests and the analysis of the filtered water obtained and the socio-economic impact study of this product. The various tests carried out and laboratory analyzes have shown that our domestic water filter makes it possible to obtain filtered water that meets the standards for drinking water. Its manufacturing process is simple but effective. The market research carried out has shown that it will be within the reach of the purchasing power of Malagasy families. It is an eco-responsible product because it also allows the recovery of sawdust waste, used as a raw material.

Keywords: ceramic filter, well water, pozzolana, clay, sawdust

Encadreur : Docteur RATSIMBA Marie Hanitriniaina, Enseignant chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechniques d'Antananarivo
Adresse de l'auteur : Mahaziana Antsirabe
Tel : 034 48 244 81
E-mail : mickayanjaraniaina@gmail.com