

253 930T

Institut Interafricain d'Etudes Hydrauliques
(I.E.H.)

LE TRAITEMENT DE LA GRAINE DE MORINGA

ESSAIS DE FLOCCULATION AU LABORATOIRE

EN GRANDEUR

par ANTOINETTE RABY et ALFRED BOU

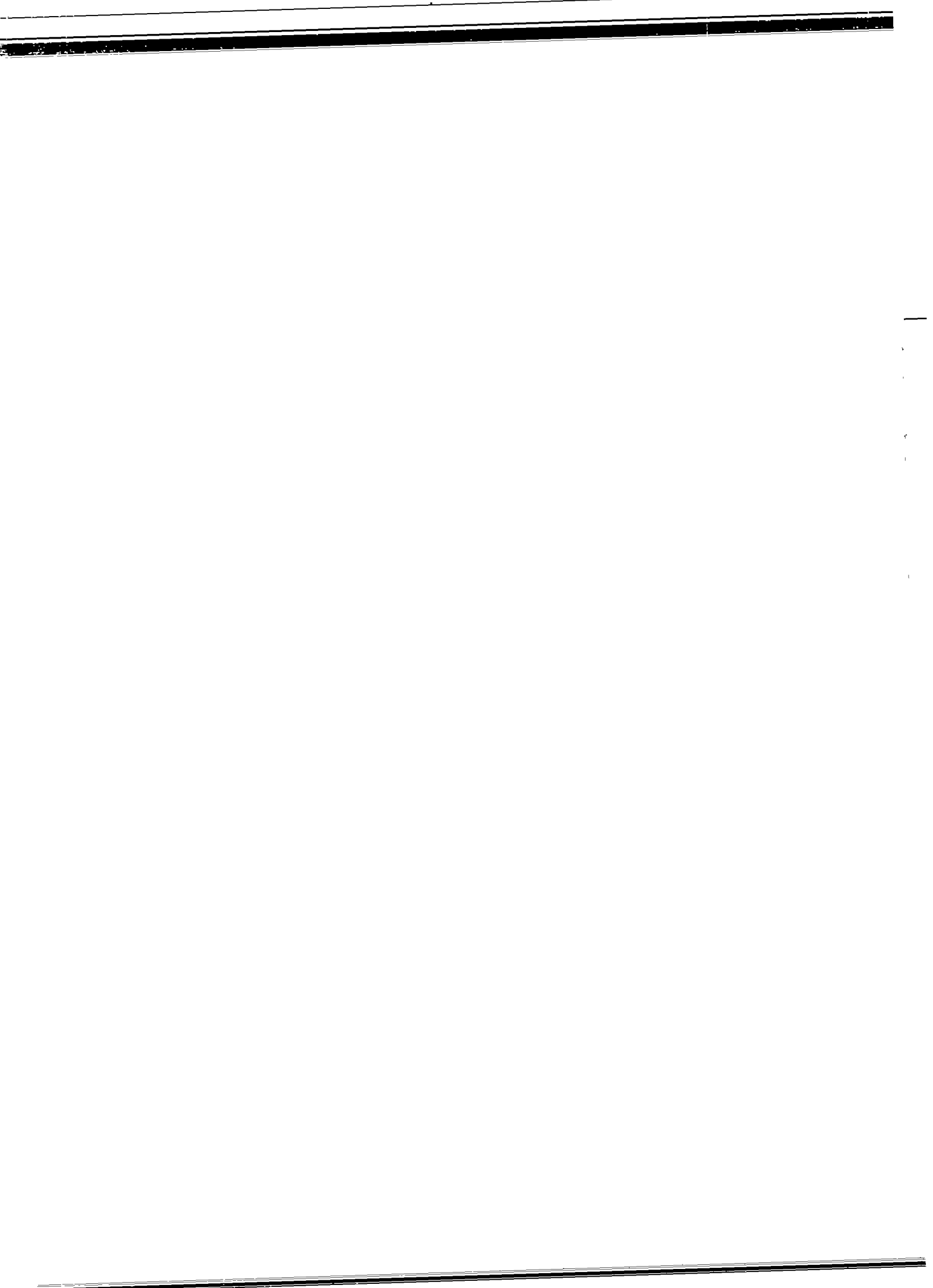


Financé par le Fonds d'Aide et de Coopération

de la République Française

1993

253-12692



Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH)

LIBRARY
INTERNATIONAL REFERENCE CENTRE
FOR COMMUNITY WATER SUPPLY AND
SANITATION (IRC)

UTILISATION DE LA GRAINE DE MORINGA ESSAIS DE FLOCCULATION AU LABORATOIRE ET EN VRAIE GRANDEUR



LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY
AND SANITATION (IRC)

AOÛT 1993

PO BOX 2509 AD The Hague
Tel. (070) 814911 ext 141/142

RW 12692
LO: 253 93UT



FABY Jean Antoine

ELELI Alain Alfred

AVANT PROPOS

Depuis 1984, le CIEH s'est proposé d'utiliser les graines du Moringa (Moringa oleifera) pour leur pouvoir flocculant dans l'espoir que ces graines locales pourraient remplacer le sulfate d'alumine importé par nos Etats membres dans le traitement de l'eau dans les stations d'épuration d'eau potable.

C'est ainsi que, sur financement de la Compagnie Générale des Eaux et du Syndicat des Eaux d'Ile de France, a été publiée une "Etude du pouvoir flocculant des graines de Moringacées" par A. CAVE, R. HOCQUEMILLER et D. TADIC, Université de Paris-Sud 1990.

Depuis cette époque et pour diverses raisons, le dossier du Moringa avait été plus ou moins mis en sommeil au niveau du CIEH. Ce n'est qu'en fin 1992 que le CIEH a décidé de reprendre les études sur le Moringa.

En début 1993, Mme WOLFROM NIGG, consultante du CIEH, a rédigé une synthèse : "Le Moringa oleifera, Etat des connaissances, Programme d'investigations complémentaires".

A la suite de cette étude, sur financement du Ministère Français de la Coopération et du Développement, le CIEH a confié à l'Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural, EIER, la réalisation d'essais de floculation par la graine de Moringa au laboratoire de l'Ecole et, en vraie grandeur, dans la station de traitement de la ville de Poura gérée par l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement, ONEA, du Burkina Faso.

Les essais ont été réalisés par le laboratoire de génie sanitaire de l'EIER et M. ELELI Alain Alfred, élève de 3ème année de l'EIER dans le cadre de son mémoire de fin d'études. Celui-ci a été encadré par M. FABY Jean-Antoine, professeur au département Génie Sanitaire de l'Ecole.

Le présent rapport rédigé par ce département est une version révisée et largement complétée du rapport de fin d'études de M. ELELI ce qui explique sa forme qui n'est pas toujours conforme aux documents habituels publiés par le CIEH. Nous avons cependant décidé de le publier tel quel en raison de l'intérêt qu'attachent nos Etats membres et la communauté internationale à l'utilisation des produits locaux pour renforcer l'économie locale et diminuer les importations coûteuses en devises.

S O M M A I R E

	Pages
I. <u>INTRODUCTION AUX DEMARCHES EXPERIMENTALES</u>	1
PHASE I : Récoltes des graines - Préparation - Conditionnement	1
PHASE II : Essais en Laboratoire à petite échelle	1
PHASE III : Essais en station de traitement à l'échelle opérationnelle	4
II. <u>DEROULEMENT DE LA RECOLTE ET PHASES PREPARATOIRES AU TRAITEMENT</u>	7
2.1. Production et récolte de graines de Moringa sur le Burkina Faso	7
2.1.1. Sites de production choisis	7
2.1.2. Données sur la cueillette et observations ...	8
2.1.3. Données sur les graines	12
2.1.4. Bilan des récoltes	12
2.2. Préparations au traitement	12
2.2.1. Dégoussage - Décorticage	12
2.2.2. Mise en poudre	13
2.2.2.1. Méthode artisanale	13
2.2.2.2. Méthode au moulin électrique.....	13
2.2.2.3. Méthode sélectionnée	14
2.2.3. Caractérisation de la poudre prête à l'emploi.	14
2.2.4. Conditions de stockage	16
2.3. Préparations des solutions mères de Moringa	16
2.3.1. Au laboratoire	16
2.3.2. En station	17
III. <u>ESSAIS DE CLARIFICATION D'EAUX BRUTES AU LABORATOIRE</u> ...	19
3.1. Principaux points d'approvisionnement en eaux brutes sur le Burkina Faso	19
3.1.1. Sélection des sites	19
3.1.2. Stations de traitement sur ces sites : filiale classique	20
3.1.3. Qualité des eaux brutes recueillies	22
3.1.3.1. Eaux de retenue	22
3.1.3.2. Eau des rivières à sec	23
3.1.3.3. Eau de la rivière Mouhoun	23
3.2. Essais au Jar-Test	24
3.2.1. Protocole expérimental	24
3.2.2. Résultats et interprétations	25

	Pages
3.2.2.1. Résultats des Jar-Tests	25
3.2.2.2. Qualités physicochimiques et bactériologiques des eaux traitées	33
3.2.2.3. Comparaison avec le sulfate d'alumine	33
3.3. Essais de cohésion des boues	36
3.3.1. Protocole expérimental	37
3.3.2. Résultats et conclusions	37
3.4. Essai sur pilote : Rendement de la décantation d'eau flocculée par le Moringa	39
3.4.1. Protocole expérimental	40
3.4.2. Résultats	42
3.4.3. Interprétations : Données pratiques de dimensionnement	43
3.4.3.1. Cas de Loumbila	43
3.4.3.2. Cas des eaux du barrage n°3 de Ouagadougou et des eaux brutes de Poura	46
IV. <u>ESSAIS DE TRAITEMENT D'EAUX BRUTES POUR LA POTABILISATION EN STATION</u>	48
4.1. Présentation des objectifs	48
4.2. Station choisie pour l'essai : Station de Poura	48
4.2.1. Fiche technique et caractéristiques de la station	49
4.2.2. Particularités d'exploitation	53
4.3. Présentation de l'essai : Méthodologie	54
4.3.1. Définitions des différents postes d'observation, de prélèvement et de mesure ..	55
4.3.2. Moyens mis en place lors de l'essai	57
4.3.2.1. Mini-laboratoire	57
4.3.2.2. Suivi analytique et conservation en flaconnages	57
4.4. Situation d'exploitation en station et en réseau au début de l'essai (t = 0)	58
4.5. Réalisation effective de l'essai	59
4.6. Résultats	59
4.7. Discussion générale préalable sur le phénomène observé dans la zone de décantation	60
4.8. Interprétation des résultats	64
4.8.1. Evolution de la turbidité et des matières sèches totales le long de la filière	64

	Pages
4.8.1.1. Après décantation	64
4.8.1.2. Après filtration	66
4.8.1.3. Evolution des matières sèches totales pendant le traitement	68
4.8.2. Evolution de la qualité bactériologique de l'eau	68
4.8.3. Evolution de la concentration du lait de Moringa (solution mère en fût)	69
4.8.4. Evolution de la qualité physicochimique des eaux traitées par Moringa le long de la filière de traitement : cas de l'ammonium, des sulfates et du pH en particulier	69
4.8.5. Evolution du chlore résiduel de l'eau de la bâche de traitement	70
4.8.6. Qualités organoleptiques de l'eau traitée non chlorée et chlorée.....	71
4.8.7. Observations réalisées dans la semaine suivant l'essai	72
4.9. Principales conclusions et recommandations	72
V. <u>CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DES PHENOMENES DE CLARIFICATION PAR LE MORINGA ; THEORIES ET REALITES</u>	74
5.1. Observations générales sur le pouvoir floculant du Moringa et sur ses caractéristiques en décantation ..	74
5.2. Essais de modélisation des phénomènes	76
5.2.1. Cinétique d'adsorption	76
5.2.2. Phénomènes de floculation	78
5.2.3. Cinétique de décantation	79
5.2.3.1. Notions théoriques	79
5.2.3.2. Décantation "dynamique"	80
5.2.3.3. Applications	81
5.2.4. Dispersion des suspensions de Moringa dans le décanteur	82
VI. <u>RECHERCHES COMPLEMENTAIRES : CONTRIBUTION A UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU POUVOIR FLOCCULANT DU MORINGA</u>	83
6.1. Complémentarité du sulfate d'alumine et du Moringa .	83
6.1.1. Position du problème	83
6.1.2. Méthodologie	83
6.1.2.1. Recherche d'un rapport de mélange ...	83
6.1.2.2. Essai de traitement combiné et essai confirmatif	85
6.1.3. Résultats et interprétations	85
6.1.4. Discussion sur l'essai de cohésion de boue ..	89

	Pages
6.2. Action du chlore sur une eau traitée par Moringa ...	89
6.2.1. Objectifs	89
6.2.2. Méthodologie	89
6.2.3. Résultats et interprétations	89
6.3. Pouvoir désinfectant du Moringa au laboratoire	91
6.3.1. Objectifs	91
6.3.2. Méthodologie	92
6.3.3. Résultats et interprétations	92
6.4. Pouvoir adsorbant de Moringa ; Essai avec de l'ac- tapulgite activée	93
6.4.1. Méthodologie	94
6.4.2. Résultats et interpétations	94
6.5. Essais au Jar-Test avec des graines d'âges différents	95
6.6. Cinétique de biodégradation de solution mère de Moringa	97
<u>VII. CONCLUSIONS GENERALES</u>	97
<u>ANNEXES</u>	100

I. INTRODUCTION AUX DEMARCHES EXPERIMENTALES

PHASE I : Récolte des graines - Préparation - Conditionnement

Notre approche expérimentale concerne aussi bien les phases préparatoires au traitement que le traitement de l'eau lui-même.

Aucune information précise n'est accessible à ce jour sur les rendements en graines des arbres Moringa au Burkina Faso, entre autres les sites où on les rencontre et leur utilisation. Lors de notre récolte, il était donc nécessaire de prêter la plus grande attention à la description des sites et à la définition des indices descriptifs de notre récolte, par exemple avec le nombre de kilos de gousses, de graines non décortiquées et décortiquées par unité de temps consacré.

La préparation du réactif coagulant proprement dit à savoir la mise en poudre des graines décortiquées, constitue aussi une étape importante avant le traitement, qu'il y a lieu de suivre méthodiquement.

Différentes techniques de broyage seront expérimentées et commentées, la qualité du produit obtenu, en l'occurrence la poudre, sera discutée avec analyses à l'appui. Dans ce domaine, il est clair qu'une utilisation industrielle du Moringa pour la coagulation en station impliquera une technique de broyage rapide et adaptée. Nos modes de broyage fourniront des connaissances de base à approfondir.

Le conditionnement de la poudre avant la mise en disposition en solution mère est une phase critique qu'il ne faut pas sous-estimer. Même si la production de ce coagulant naturel est locale, il reste que les problèmes de stockage du produit prêt à l'emploi se poseront et nécessiteront des soins précis.

A ce niveau, nous nous contenterons de choisir une méthode sans être à même à ce jour de pouvoir trancher sur "le juste choix". Les quantités de graines dont il faudrait disposer pour en arriver là dépassent celles que nous obtiendrons.

La préparation de la solution mère relève du traiteur d'eau et ne fait pas partie à proprement parler des tâches du fournisseur du réactif coagulant. Nous l'aborderons donc dans la phase II.

PHASE II : Essais au laboratoire à petite échelle

Tous les coagulants utilisés à travers le monde font l'objet d'études bien définies aussi bien par les autorités sanitaires qui évaluent la possibilité d'utiliser ce produit à des fins alimentaires, et sa toxicité en particulier, que par le fabricant qui se doit d'indiquer tous les éléments présents dans le réactif, y compris les traces de métaux indésirables s'il y a

lieu, et enfin que par le traicteur d'eau à qui s'offre une gamme importante de coagulants qu'il choisira en fonction de la qualité et de la température de son eau brute, de sa nature chimique, du type de matières colloïdales à éliminer, entre autres critères.

Comme l'a retracé Mme NIGG dans sa synthèse bibliographique, le Moringa a été étudié sur les eaux soudanaises mais les connaissances sur ses pouvoirs clarifiants en Afrique de l'Ouest sont quasi inconnues. Notre approche sera donc globale.

1. Les essais de coagulation-floculation devront en premier lieu être réalisés sur différents types d'eaux brutes utilisées communément au Burkina Faso par le producteur d'eau ONEA (Office National des Eaux et de l'Assainissement), qui est aussi le distributeur national d'eau potable).

Le Burkina Faso dispose d'une dizaine de stations de traitement d'eaux de surface (retenues et rivières) et une première campagne consistera à prélever des eaux brutes représentatives des principales sources d'approvisionnement et aussi variées que possible à travers le pays.

2. Les essais au Jar-test universellement connus comme référence pour déterminer les doses optimales d'un coagulant donné pour obtenir la meilleure clarification d'une eau brute, seront entrepris de façon systématique. Ces essais consistent simplement à réaliser en bécber l'ensemble des phases classiques de coagulation-floculation-décantation en ajustant l'agitation de l'eau brute traitée puis en laissant sédimenter les matières floculées sur une durée de une heure en général. La représentativité de cet essai est reconnue même si elle doit être ajustée pratiquement et constitue encore aujourd'hui la meilleure méthode pour une bonne appréciation de la dose de coagulant à choisir pour une eau brute donnée.

Dans un premier temps, notre démarche sera standardisée, c'est-à-dire que nous nous conformerons au protocole expérimental type pour tester le Moringa sans chercher à modifier un des critères : par exemple, la vitesse et le temps d'agitation rapide et lente seront fidèles à la méthodologie classique. Il est clair qu'étant donné les caractéristiques toutes particulières du Moringa, on peut penser que cette méthodologie pourrait légèrement évoluer pour mieux s'adapter à notre floculant naturel, nous pensons en particulier à la durée de l'agitation lente et au temps de décantation.

Les analyses complètes réalisées avant essai sur l'eau brute et après essai sur l'eau traitée surnageant la boue décantée constitueront les résultats fondamentaux de cette phase 2. En effet, elles nous permettront de répondre à des questions prioritaires :

a) La poudre de Moringa est-elle un coagulant adapté à tout type d'eau brute sur le Burkina Faso ? Si oui, les doses à introduire en masse de produit par litre d'eau sont-elles raisonnables ?

b) Quel est l'abattement de la turbidité de l'eau traitée, paramètre le plus indicatif d'une bonne floculation-décantation ?

c) Le Moringa a-t-il un pouvoir désinfectant ?

d) Le Moringa a-t-il un pouvoir de réduction quelconque sur des paramètres tels que la concentration d'ammoniaque, de fer, etc...?

e) Le Moringa modifie-t-il la composition chimique et les qualités organoleptiques de l'eau ? Le Moringa n'est-il pas à l'origine d'une "pollution" induite ?

Une sixième question auquel nous ne tenterons pas de répondre ici par manque de temps mais aussi de moyens et par le simple fait qu'elle ne constitue pas une question primordiale : Quel est l'effet du Moringa sur l'élimination des produits organiques toxiques ou non (molécules organiques de synthèse en particulier) et des métaux lourds ? Ces deux derniers pouvoirs qui sont, en général et de façon partielle, propriété de bon nombre de floculants ne seront donc pas étudiés dans ce document.

3. Les essais de floculation-décantation à une échelle intermédiaire constitueront des expérimentations confirmatives des essais au Jar-Test. Ils consisteront à réaliser une agitation en fût de 200 litres, rapide dans un premier temps, puis lente, en mélangeant l'eau coagulée à l'aide d'un agitateur à pales de bois comme on le rencontre dans certaines stations européennes. L'eau ainsi floculée sera introduite dans une colonne de décantation équipée de robinets à différentes profondeurs. L'objectif sera alors de déterminer le rendement de la décantation en fonction du temps, paramètre essentiel, et, si possible, de déterminer les caractéristiques de dimensionnement d'un décanteur statique adapté à ce floculant. Il y aura lieu, bien sûr, de les comparer aux caractéristiques techniques des décanteurs statiques couramment rencontrés.

Cette phase expérimentale a ceci de complémentaire au Jar-Test qu'elle permettra plus précisément de définir les temps de décantation convenables après traitement par le Moringa pour obtenir une eau décantée de bonne qualité.

4. Des essais complémentaires seront conduits parallèlement en fonction des disponibilités du laboratoire et du temps dont on pourra disposer. Ils sont relatifs à :

a. La propriété des boues de Moringa obtenues après décantation : risqueront-elles de fermenter, de s'alléger et, après remontées de contrarier le fonctionnement d'un décanteur ? Sont-elles biodégradables ?

b. La cohésion des boues en suspension : les décanteurs à voiles de boues sont assez fréquents en Afrique de l'Ouest. Comment se comportera un voile de boue de Moringa ? Quelle vitesse ascensionnelle faudra-t-il choisir pour obtenir un rendement convenable ?

c. Y-a-t-il un effet synergique avec le sulfate d'alumine qui permettrait de diminuer les doses de sulfate d'alumine et de poudre de Moringa introduites concomitamment, tout en produisant une eau décantée de qualité constante, voire meilleure ?

d. Comment se comporte une eau décantée traitée par le Moringa après chloration ? Le résiduel de chlore combiné n'est-il pas prépondérant par rapport au chlore libre, auquel cas l'effet désinfectant du chlore serait forcément contrarié.

e. Comment "vieillit" la solution mère de Moringa, la poudre de Moringa, et les graines de Moringa récoltées ?

f. Quelles sont les capacités adsorbantes de Moringa ?

Ces six questions qui ne sont pas cependant prioritaires trouveront déjà des réponses en réalisant respectivement des tests de biodégradation en flacons au laboratoire (mesure de la demande biologique en oxygène), de la cohésion des boues par essais en éprouvettes à vitesse ascensionnelle constante, essais au Jar-Test après double injection de sulfate d'alumine et poudre de Moringa à doses réduites, essais de chloration jusqu'au point de rupture et au-delà (Break-point), tests après vieillissement des graines au Jar-Test, Tests d'adsorption sur Actapulгите activée.

A cette problématique un laboratoire correctement équipé a les moyens de fournir des éléments de réponse satisfaisants et fiables. Au premier abord, la multitude des objectifs fixés peut paraître trop large, voire déroutante. Pourtant, seule une approche généraliste à large spectre permettra de répondre à la question de base que tout le monde se pose sans oser jusqu'ici y répondre : "Le Moringa est-il un coagulant de choix pour les producteurs d'eau ?".

PHASE III : Essais en station de traitement à l'échelle opérationnelle

L'originalité de ce travail expérimental sera de piloter un essai en grandeur nature, in situ, dans une station de traitement d'eau potable en pays sahélien ; cette entreprise déjà réalisée au Malawi mais sans conclusions précises à la clef est donc

quasiment inédite puisque, pour la première fois, les eaux produites en station après injection d'une solution mère coagulante que nous appellerons "lait de Moringa" seront observées de près grâce à un suivi analytique précis et méthodologiquement préparé.

La démarche consiste à utiliser telle que une station de traitement d'eau potable, sans changer d'aucune façon les processus de traitement mais simplement en substituant la poudre de Moringa au sulfate d'alumine, le plus souvent utilisé sur les eaux faiblement minéralisées et moyennement turbides. Il est clair que si l'on désire vulgariser l'utilisation du Moringa au niveau industriel, il est important de modifier le moins possible les techniques de traitement, leur ordonnancement, en bref les habitudes déjà prises.

Les difficultés rencontrées en pays sahéliens dans l'exploitation de telles stations (problèmes de maintenance entre autres) suffisent pour ne pas compliquer davantage la tâche du producteur d'eau avec un coagulant qui bouleverserait ses manières de faire et ses connaissances.

Néanmoins, le choix de cette station doit s'avérer judicieux et satisfaire différentes contraintes :

. En effet, en période de sécheresse, au mois de mai au Sahel, l'eau vient à manquer et est de plus en plus un bien précieux. Il était donc hors de question de détourner le fonctionnement normal d'une station comme celle de Ouagadougou pour un essai avec le Moringa.

. En second lieu, les quantités de graines de Moringa récoltées ne permettront de traiter qu'un volume d'eau limité. Cette quantité récoltée sera donc déterminante.

. L'essai en station se déroulera sur une période d'au moins deux fois le temps de séjour de l'eau dans le décanteur statique.

. Le matériel d'injection du coagulant est constitué, la plupart du temps, d'une ou plusieurs pompes doseuses en parallèle; pourtant, dans un premier temps nous choisirons d'utiliser une technique rustique d'injection à partir d'un fût à charge constante en solution mère de façon à ne pas être confronté à un dysfonctionnement d'une pompe doseuse. La solution mère de Moringa, quasiment constituée d'éléments en suspension insolubles, risque en effet de comporter encore des particules grossières qui pourraient nuire au bon fonctionnement des pompes doseuses à membrane. Bien que cet aspect soit important à étudier puisque les pompes doseuses utilisées pour l'injection de sulfate d'alumine devront satisfaire aussi à l'injection de Moringa, nous ne l'aborderons pas dans ce document (aucune pompe n'a été mise à notre disposition).

. La phase de coagulation-floculation, réalisée par différents moyens plus ou moins coûteux en énergie, devra se dérouler de façon satisfaisante dans la station. En ce sens, on constate que lors de la réalisation d'un certain nombre de stations, l'accent n'a pas été suffisamment mis sur l'importance de cette phase. Nous retiendrons donc une station conçue avec des ouvrages propres à ces différentes phases de traitement et correctement dimensionnées de façon à ne pas entacher nos résultats avec des dysfonctionnements liés à une mauvaise conception du coagulateur-floculateur.

. Le decanteur sera statique et, si possible, disposera d'un répartiteur d'eau floculée à l'entrée qui fonctionne bien de façon à ce que l'eau se répartisse correctement dans toute la section transversale de l'ouvrage.

. Aucune contrainte particulière n'est nécessaire pour la filtration ou pour la bache d'eau traitée, si ce n'est, par mesure de sécurité, de faire en sorte qu'un filtre reste en secours au cas où l'un d'entre eux viendrait à se boucher. Il paraît enfin plus satisfaisant d'utiliser des filtres ouverts plutôt que sous pression de manière que le sable encrassé soit accessible facilement si besoin est.

. Au niveau de l'exploitation du réseau, les coupures d'eau seront limitées au minimum pendant l'expérimentation en station. La capacité de stockage en réseau au début de l'intervention sera donc à son maximum et permettra une autonomie aussi longue que possible. En effet, l'eau traitée par le Moringa ne sera pas injectée dans le réseau par mesure de précaution.

. Tous les ouvrages seront nettoyés avant les essais.

Voici donc énoncés les différents critères qui orienteront notre choix pour la station de traitement.

Conjointement, notre démarche analytique consistera à :

. Travailler avec un débit d'eau brute à traiter pendant un temps de séjour suffisant dans le decanteur statique.

. Suivre à intervalles de temps fixes, l'évolution de la qualité de l'eau brute, floculée, decantée, filtrée, chlorée, l'évolution éventuelle de la concentration de la solution mère qui n'est pas forcément homogène, la constance du débit d'injection.

. Choisir un ou plusieurs traceurs significatifs d'une eau traitée au sulfate d'alumine et d'une eau traitée par le Moringa. Dans cette optique, nous envisageons au départ d'entamer l'expérimentation avec des ouvrages vides. Mais dans un second temps, nous avons plutôt choisi de débuter nos expériences avec le decanteur quasiment plein, de façon à pouvoir produire de l'eau traitée par le Moringa dans les meilleurs délais. A cet

égard, la compatibilité entre une eau traitée au sulfate d'alumine et par le Moringa sera étudiée de plus près ce qui est tout aussi intéressant.

. La bache d'eau traitée, d'eau claire chlorée comme il est dit dans le jargon du traiteur d'eau, sera vidée au début de l'essai.

. Au cas où la qualité de l'eau décantée viendrait à se détériorer, nous nous donnerons la possibilité d'influer soit sur le débit d'injection de solution mère de Moringa, soit sur le débit d'eau brute à traiter dans la limite d'une durée d'observation au moins égale au temps de séjour de l'eau dans le décanteur statique.

. Enfin, le comportement de la station juste après traitement par le Moringa, aussi bien pour ce qui est de la qualité de l'eau immédiatement produite par le sulfate d'alumine, que de l'évolution des boues de Moringa décantées, sera examinée sur une durée convenable.

Le respect de ces différentes phases développées dans les chapitres suivants est une condition sine qua non d'une démarche logique, cohérente, et aussi représentative que possible des réalités sur le terrain.

II. DEROULEMENT DE LA RECOLTE ET PHASES PREPARATOIRES AU TRAITEMENT

2.1. Production et récolte de graines de Moringa sur le Burkina Faso

2.1.1. Sites de production choisis

En préambule, nous voudrions indiquer qu'il ne nous est pas possible, dans le cadre de nos expériences, d'étudier séparément chaque classe de graines récoltées dans des zones distinctes. Le but est de rassembler une quantité de graines donc de poudre suffisante pour un essai en station ; la totalité des récoltes d'origine diverse sera donc mélangée à dessein.

La difficulté de réunir une quantité de graines décortiquées dépassant en poids 20 kilogrammes est réelle. Elle a été néanmoins surmontée au prix d'efforts conséquents. La période d'essai choisie nous facilite néanmoins la tâche puisque pendant les mois de mars à avril-mai, les gousses arrivent à maturité et sont prêtes pour la cueillette.

Nos ressources ont donc été les suivantes :

- Sur la région de Ouagadougou :

. Une plantation de 6 arbres d'ornement à la faculté des sciences de Ouagadougou, très fournie en gousses mûres soit 5 kg de graines non décortiquées.

. Quelques arbres parsemés sur des zones maraichères ou de culture d'arachide autour du barrage n°3 de Ouagadougou soit 4 kg de graines non décortiquées.

. Quelques arbres disposés dans des cours privées à des fins de consommation des feuilles (très utilisées pour la préparation des sauces), soit près de 1,7 kg de graines non décortiquées. Cette petite récolte a été favorisée par l'ONG EAST.

Pour mémoire, la zone de Gonsé où l'IRBET a effectué des plantations expérimentales n'a pas fait l'objet de récolte.

Sur la région de Bobo-Dioulasso, beaucoup plus fournie en Moringacées :

- La plantation de l'IRBET à Dindéresso : plantation expérimentale pour étudier la possibilité d'utiliser ces arbres en haies autour des potagers ou des zones de culture contre l'intrusion d'animaux divaguants : cueillette de 7,4 kg de graines non décortiquées qui seront, remarquons-le tout de suite, peu denses en matière directement utilisable pour la poudre.
- Les arbres parsemant les zones de culture d'arachide autour de Torosso, à 40 km à l'Ouest de Bobo dans une zone très vallonnée. Ces arbres, notons le, étaient très fournis en gousses : cueillette de 8 kg de graines non décortiquées.
- Les arbres des cours privées de Toukoro, sur une dizaine de concessions, à 30 km à l'Ouest de Bobo : cueillette de 4 kg de graines non décortiquées.

Notons que le village de Bouendé, encore un peu plus éloigné de Bobo, dispose d'une quantité importante de ces arbres mais n'a pas été atteint faute de temps.

Les deux kilos de graines achetées par le CIEH au Burkina Faso voici près d'un an et demi n'ont pas été mélangés au reste de façon à pouvoir étudier distinctement l'effet du vieillissement des graines et d'une longue conservation sur le pouvoir flocculant du Moringa.

2.1.2. Données sur la cueillette et observations

Nous présentons ci-joint dans le tableau récapitulatif 2.1 le déroulement des cueillettes quand les informations nous sont parvenues.

Par ailleurs, 5 derniers kilo cueillis autour de Ouagadougou ont permis de réaliser les essais complémentaires présentés au chapitre VI.

Au vu des 2 tableaux 2.1 et 2.2 ci-joints, les principales constatations sont les suivantes :

- L'indice kg de graines recueillies par homme et par heure se situe entre 0,1 et 0,3 suivant la densité des graines mais aussi l'éloignement entre chaque arbre. La récolte à l'ISN/IDR a été très rapide étant donné la proximité des arbres (de l'ordre de 10 à 20 mètres).
- La zone expérimentale B1 est très peu représentative d'un arbre en pleine maturité. Ces arbres ont en effet été taillés à des hauteurs comprises entre 0,5 et 2 mètres ce qui limite leur croissance et nuit à leur développement. Un bon nombre de graines s'avérait par ailleurs creuses.
- Le prix fixé de 1.000 FCFA par kg de graines a été respecté sur les zones 01, 02, 03 et accepté par les "cueilleurs".

Pour les zones B1, B2 et B3, la base du prix a été fixée à 1.000 F/cueilleur et par jour.

Dans la zone B2 très éloignée de la piste carrossable, il a fallu 2 charrettes pour transporter les graines depuis les zones de cueillette jusqu'à la route au prix de 6.000 FCFA (pour 1 aller-retour, 8 kg transportés et environ cinq kilomètres pour un aller).

Le dégoussage a été réalisé sur place dans tous les cas sauf pour la zone 01 où l'IRBET nous imposait une étude statistique de la taille des gousses et du nombre de graines par type de champ expérimental.

Tableau 2.1

Zone de cueillette	Periodes	Types d'arbres observations	Durée de la cueillette en heures	Nombre d'hommes	Kg de graines	Indice kg/homme /heure	Kg de poudre resultante	Kg de poudre/Kg de graine
Zone 01 LSN/IDR Ouagadougou	8/04	. arbres d'au moins 7 ans d'age . 5 à 6 metres de haut . gaulage	5	3	5	0,3	3,5 kg	0,70
Zone 02 Zones maraicheres Ouagadougou	1/03 au 31/03		-	-	4	-	2,5 kg	0,63
Zone 03 Zone couverte par EAST Ouagadougou	1/04 au 25/04	. arbres isoies de tailles variables	-	-	1,7	-	1,0 kg	0,59
Zone B1 Dinderesso (IRBEF) plantations experimentales	30/03	. arbres en haies de taille differente et espace-ment different . taille inférieure à 2 m	10	7	7,4	0,1	2,5 kg	0,34
Zone B2 Torosso (culture d'arachides en "montagne")	2/04	. 5 a 10 ans d'age . gaulage et cueillette sur tronc	4	7	8	0,3	5,5 kg	0,69
Zone B3 Toukoro	1/04	. arbres dans cours privées	4	7	4	0,15	2 kg	0,50

Tableau 2.2

	Taille des gousses	Nbre de graines par gousse	Nbre d'arbres récoltés	rappel kg de graines produites	Indice kg/arbre
Zone 01	30 à 35 cm	15 à 25	6	5	0,83
Zone B1 *	20 à 30 cm	10 à 20	400 à 500	7,4	non indicatif
Zone B3	-	-	10 à 15	4	0,4 env.

(*) . Beaucoup de gousses n'ont pas été cueillies car non mûres.
. Beaucoup d'arbres sans gousses.

2.1.3. Données sur les graines

Une étude statistique rapide sur des graines de bonne qualité (site 01 en exemple) montre qu'une graine non décortiquée a une masse de 333 mg en moyenne (sur un échantillon de 20 graines), et de 258 mg décortiquée avec une variance de 30 à 35 mg.

La teneur en eau de la graine est de 5% (méthode d'étuvage à 105°C).

La teneur en matières grasses (extraction au soxlet) obtenue sur une prise d'essai de 5 grammes est de 46 à 47%.

Le volume apparent d'une graine décortiquée est de l'ordre de 0,8 à 1,3 cm³, ce qui montre la faible densité d'une graine nue pour un poids de 333 mg.

2.1.4. Bilan des récoltes

Sur les 17 kg environ de graines décortiquées, 300 grammes seront utilisés pour les expérimentations en laboratoire et 16,7 kg pour l'essai en station. L'âge des graines est situé entre 1 et 2 mois.

Environ 1 kg de poudre de graines de 1 an et demi d'âge (graines achetées par le CIEH en 1992 en provenance du Burkina Faso) sera utilisé pour des tests de vieillissement.

Il reste environ 4 kg de poudre, issue de graines parvenues au laboratoire après le 15 mai, date de l'essai en station, qui seront utilisées lors d'essais au laboratoire en juin (voir chapitre VI).

2.2. Préparations au traitement

2.2.1. Dégoussage et décorticage

Quelques remarques sur ces deux étapes que nous avons volontairement fondues dans notre tableau récapitulatif II :

- Lors du gaulage, une grande quantité de gousses éclate sur le sol au moment de la chute et les graines se trouvent ainsi éparpillées sur le sol (cas tout particulier de la zone 01). Ce phénomène dépend bien sûr de la hauteur de chute et du degré de maturation de la gousse.
- Dans le cas contraire, le dégoussage est une action réalisée très rapidement surtout si la gousse est bien mûre. On peut penser qu'un battage suffirait à faire éclater ces gousses. Notre conclusion est que cette étape n'est pas consommatrice de main d'oeuvre.

- Pour ce qui est du décortiquage qui consiste à ôter les trois ailettes de la graine et son tégument, cette opération est effectuée à la main. Une famille de Ouagadougou de l'ordre de 5 personnes a été amenée à décortiquer de l'ordre de 30 kg de graines en 1 jour cumulé. Il est bien sûr difficile de savoir exactement quelle a été la valeur de l'indice kg de graine décortiquée/ jour/personne mais nous le situons autour de 800 à 1200 g/heure/personne en grammes de graines non décortiquées soit autour de 500 à 700 g/jour/personne en grammes de graines décortiquées (avec 1 journée = 6 heures de travail effectif).

Le montant des dépenses pour le décortiquage est de 1.000 F/kg de graines décortiquées, soit 17.000 FCFA.

Les graines décortiquées ont été stockées en sachets plastiques et conservées au frais avant broyage, ce qui ne constitue peut-être pas la meilleure solution.

2.2.2. Mise en poudre

Cette opération est fondamentale car le lait de Moringa pourrait s'avérer d'autant plus efficace que la granulométrie de la poudre est plus fine ; en d'autres termes, on peut penser que plus la taille effective de la poudre c'est-à-dire le d_{10} suivant la nomenclature utilisée pour caractériser un sable fin est petit et le coefficient d'uniformité (d_{60}/d_{10}) proche de 1,5, plus la poudre sera opérante.

2.2.2.1. Méthode artisanale

La méthode de pilage au pilon domestique classiquement utilisé dans les foyers africains ne donne pas de bons résultats. Des morceaux de graines non broyés subsistent avec des tailles de l'ordre de 1 millimètre, ce qui n'est pas convenable. Au moment de l'impact du pilon les plus gros morceaux fument sur le pourtour et l'on doit attentivement les remettre au centre de l'impact pour avoir des bonnes chances de les détruire. Cette technique a été abandonnée pour piler nos 17 kg de poudre.

2.2.2.2. Méthode au moulin électrique

La farine de mil, de maïs ou la pâte d'arachide sont communément obtenues au moulin électrique dans les grandes villes du Burkina Faso et même désormais au village. Un essai de broyage par cet outil paraissait aller de soi.

L'essai réalisé sur une cinquantaine de grammes de graines a montré que l'on obtenait une pâte molle constituée de morceaux épais de tailles diverses. L'opération débouche pratiquement sur une agglomération du produit plutôt que sur un pilage. L'humidité

de la graine (pourtant faible), voire son taux de matières grasses, ne permet sans doute pas de résultats satisfaisants avec cet outil.

2.2.2.3. Méthode sélectionnée

Le laboratoire d'écologie de l'Université de Ouagadougou est équipé d'un broyeur CYCLOTEC 1093 sample mill de TECATOR, de 0,6 KW, spécialement conçu pour broyer des graines, des aliments de bétail, des feuilles etc

Le principe de son fonctionnement est particulier : l'échantillon est amené sur une turbine qui tourne à très grande vitesse, ce qui brise l'échantillon en morceaux et le projette sur la paroi abrasive où il est réduit en poudre fine.

La turbine agit également comme ventilateur, de telle sorte que lorsque les particules ont la taille requise, elles sont transportées par le flux d'air au travers de la grille puis séparées dans le cyclone.

La granulométrie est ainsi bien contrôlée : la mouture est fixée et est assez uniforme (voir courbe granulométrique Fig. 2.1), puisque 90% des particules de mouture ont une taille inférieure à 0,1 mm.

A la mise en oeuvre, notons que l'opérateur devait introduire les graines une par une de façon à ne pas bloquer la turbine, le caractère assez gras de la graine ne facilite pas en effet le broyage et peut conduire à un bourrage si la quantité de graines présentes dans la turbine est trop importante.

Le temps de broyage par cette technique a été estimé à 1 kg/heure, soit un débit de broyage de 0,3 g environ par seconde et facturé par le laboratoire d'écologie à 1.000 F/kg.

2.2.3. Caractérisations de la poudre prête à l'emploi

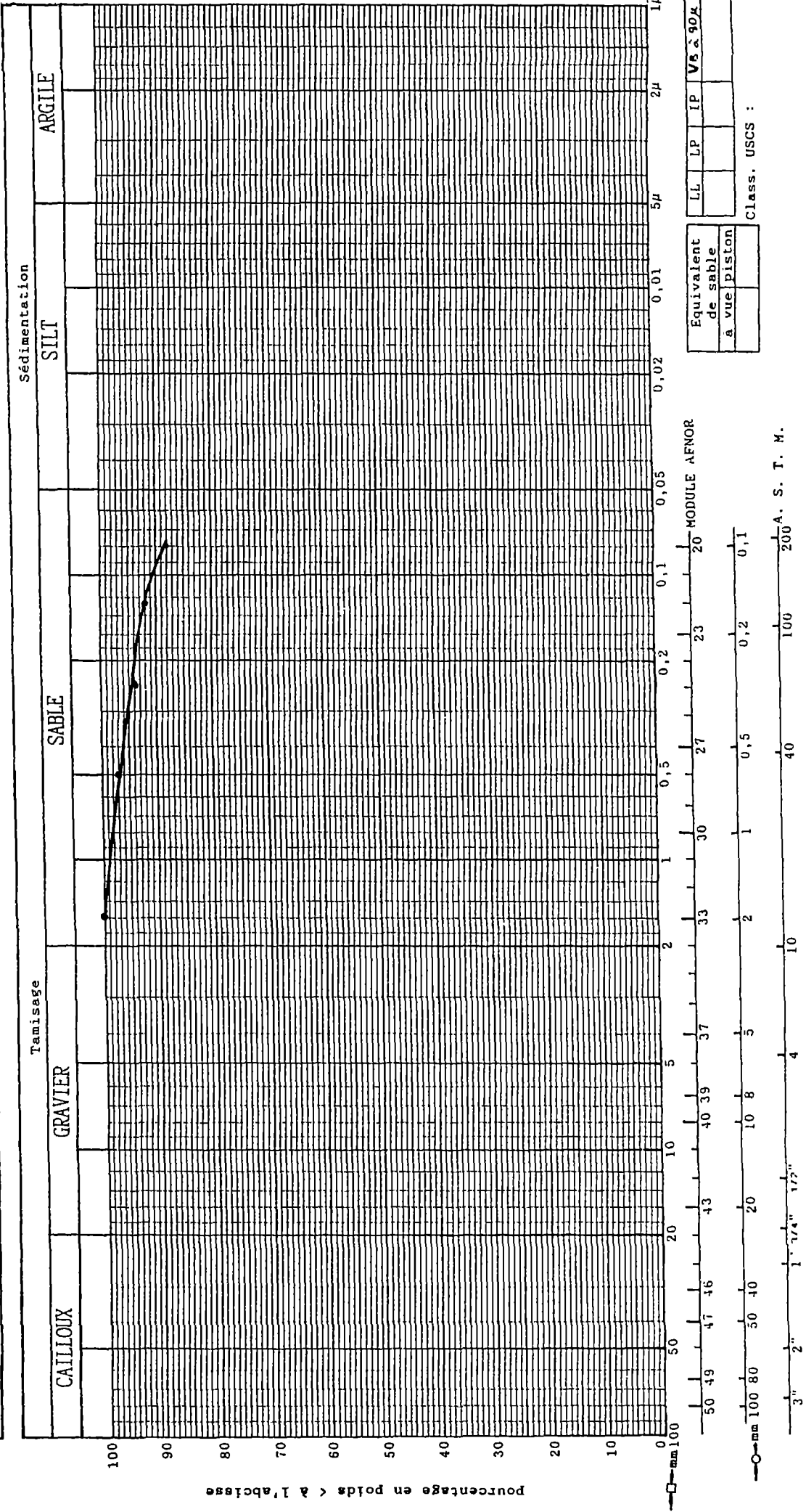
La poudre brute est tamisée à sec au laboratoire (tableau 2.3) et à l'eau.

Les résultats de ces deux techniques de tamisage sont bien différents par le simple fait que des grumeaux se forment rapidement à sec. C'est essentiellement le caractère gras de la poudre qui est à l'origine de cette agrégation. Avec le temps, ces mêmes grumeaux deviennent beaucoup plus volumineux (supérieurs au centimètre).

Le tamisage à l'eau fournit des informations plus satisfaisantes puisqu'il représente vraiment la taille des particules dans l'eau après délayage des grumeaux.

Figure 2.1

E. I. E. R. O U A G A D O U G O U	Dossier : <u>MORINGA</u>
ANALYSE GRANULOMETRIQUE	
Provenance : <u>LABO GENIE SANITAIRE</u>	Echantillon : <u>MORINGA</u>
Operateur : <u>DRABO</u>	Date : <u>11-06-93</u>



On constate que 2 à 3% des éléments fins constituant la poudre ont une taille supérieure à 0,5 mm, 3% compris entre 0,5 et 0,2 mm, 3 à 4% entre 0,2 et 0,1 mm, et 90% inférieurs à 0,1 mm. La sédimentométrie n'a pas pu être réalisée sur les particules de taille inférieure à 0,1 mm ; nous n'avons donc pas d'informations plus précises sur ce groupe de particules.

2.2.4. Conditions de stockage

La poudre est stockée en sac plastique en paquets de 1 à 3 kg, à une température de l'ordre de 8 à 12°C en frigidaire. A ce niveau, on a pu constater à posteriori que, dans certains paquets, la poudre était trop tassée et avait tendance ainsi à former des grumeaux.

En fait, plus le paquet est de grande contenance, plus la poudre paraît s'agglomérer et être difficile à délayer, on le soulignera plus loin.

Cette solution de facilité en stockant au frigidaire n'est sans doute pas des plus rationnelles par rapport à l'objectif à viser à savoir obtenir une poudre aussi délayable et souple que possible. Un étalement au soleil sur une bâche aurait sans doute été plus judicieux mais beaucoup plus difficile à réaliser (éviter l'introduction de poussières, l'exposition au vent, etc...).

La poudre est restée stockée entre 15 et 30 jours dans ces conditions avant l'essai en station.

2.3. Préparations des solutions mères de Moringa

2.3.1. Au laboratoire

La solution mère de Moringa que nous avons précédemment appelé lait de Moringa est constituée de suspensions de poudre de Moringa dans l'eau. A première vue, il semble que la plus grande partie des matières en suspensions reste insoluble. Il apparaît nettement une multitude de petites particules qui se dispersent dans le milieu aqueux et une coloration blanchâtre de la solution qui peut être liée à la mise en solution de certaines molécules organiques. Ce dernier aspect serait néanmoins à confirmer en filtrant par exemple la solution mère à 3 microns et en observant la couleur résultante (ceci n'a pas été réalisé).

Le terme lait de Moringa tout comme on le dit pour le lait de chaux nous paraît bien adapté tant il est significatif des matières insolubles dispersées dans le milieu.

Sa préparation consiste à peser une certaine quantité de poudre et à l'introduire dans un certain volume d'eau distillée. La concentration de cette solution mère préconisée par Mme JAHN est de 2%. Nous avons néanmoins voulu mener notre propre expérience à ce sujet, en préparant successivement une solution à

2 g/l, 20 g/l et 100 g/l. Chacune des solutions est soigneusement mélangée avec un agitateur magnétique dans une fiole de 1 l pendant près de 30 minutes. La poudre utilisée pour les essais de Jar Test sur l'ensemble des eaux brutes récoltées est issue plus particulièrement des sites 01 (site de l'ISN/IDR).

Un constat évident est que toute solution mère décante lentement si le mélange n'a plus lieu. Il paraît clair qu'une décantation prolongée conduirait à obtenir une solution avec un gradient de densité en matière de suspension décroissante du fond de la fiole vers la surface libre, et donc une concentration hétérogène autour de la valeur initiale choisie en g/l (voir tableau 2.4).

Cet aspect n'est pas du tout à négliger lors de l'essai en station et nous amènera à un contrôle précis de la concentration de la solution mère utilisée à différents moments.

Au laboratoire l'expérience montre (tableau 4.3) que l'incertitude sur la concentration de la solution mère mesurée sur différents échantillons de 50 ml prélevés sur 1 litre est de quelques g/l ce qui est assez considérable. Des études statistiques plus précises pourraient être menées ultérieurement.

Ces constatations au laboratoire impliqueront des mesures toutes spécifiques au moment des expérimentations sur le terrain.

Le choix de la concentration de cette solution mère vers lequel nous nous sommes orientés est de 20 g/l.

Précisons que la méthode utilisée pour doser la solution mère après préparation consiste simplement à effectuer le résidu sec total à 105°C sans filtration (méthode Afnor). Le résidu subsistant au fond de la coupelle ne peut être constitué que des résidus organiques de Moringa puisque l'eau utilisée pour la préparation est distillée.

Sur une solution mère à 20 g/l, nous avons poussé la calcination jusqu'à 550°C pour obtenir les matières volatiles sèches du résidu. Il s'avère que ces matières constituent 95% à 97% de la masse du lait de Moringa, la part des matières minérales est donc très faible (tableau 4.3).

2.3.2. En station

Toutes les observations précédentes nous préparent à la plus grande prudence lors de l'essai en station.

Nos difficultés seront de deux ordres :

1. Préparer une solution mère homogène avec une répartition aussi bonne que possible de la masse de poudre dans la solution aqueuse qui, de surcroît, ne sera pas distillée mais sera tout simplement une eau de réseau (à ce niveau, si cette eau est

claire, et faiblement ou de préférence pas du tout chlorée, il ne risque pas d'y avoir d'incidence défavorable particulière sur la solution).

2. Faire en sorte qu'à tout moment de l'injection, la concentration soit aussi proche que possible de la concentration moyenne choisie égale aux kgs de poudre introduite par litre d'eau présente dans la cuve d'injection à l'instant initial.

Cette quantité de 16,7 kg de poudre pour 730 litres d'eau nous donnera une concentration de 22,88 g/l pour le lait de Moringa originel.

Nos modalités de stockage de la poudre n'ont pas facilité le premier point. Il a été nécessaire d'écraser consciencieusement tous les grumeaux, petits et gros de 0,5 à 2 voire 3 cm, formés lors du conditionnement en sac plastique.

Cette opération effectuée la veille du traitement, le 14 mai au soir, a nécessité le travail de 6 personnes sur une durée de 2 heures pour une mise en solution adéquate.

Notre démarche était simple : il suffisait de prélever l'ensemble de la poudre mise en sac et de la distribuer entre chacun des "manipulateurs". Chacun d'entre eux dans un récipient approprié plein d'eau, malaxait son quota de poudre jusqu'à ne plus sentir au toucher la moindre matière grossière solide dans le milieu aqueux.

Cette expérience a montré que, lentement, les grumeaux mis dans l'eau s'imprègnent d'eau et sont de plus en plus faciles à désagréger lorsqu'ils sont très imbibés. Un effort mécanique (pression contre les parois du récipient, ou entre les mains) est néanmoins nécessaire pour disloquer complètement le grumeau.

Cette opération particulièrement fastidieuse, mais menée en équipe, peut être limitée, selon nos observations, à 2 à 3 kg délayés/heure/personne pour une mise en solution correcte, certains des manipulateurs semblant, au fil de la préparation, adopter une méthode plus performante.

Cette préparation manuelle artisanale doit pouvoir être améliorée car elle présente effectivement un réel obstacle à l'utilisation industrielle.

Les solutions individuellement préparées ont été versées dans le fût d'une capacité de 1.000 l préalablement vidé de son sulfate d'alumine. Nous avons ensuite complété à 730 litres d'eau.

Lors de l'essai en station deux prélèvements de solution mère auront lieu à 8h05 et 11h40.

III. ESSAIS DE CLARIFICATION D'EAUX BRUTES AU LABORATOIRE

3.1. Principaux points d'approvisionnement en eaux brutes sur le Burkina Faso

3.1.1. Selection des sites

Cette sélection est assez simple à mener étant donné le nombre limite de sites pour l'approvisionnement en eau brute à cette période de l'année (fin de la saison sèche) et la faible densité du réseau hydrographique notamment.

Pour les rivières, nous avons bien sûr choisi respectivement le Nazinon, le Nakambé, et le Mouhoun, toutes trois anciennes Volta rouge, blanche et noire. Seule la dernière d'entre elles coulait en ce mois d'avril 93. Les autres ne sont que des bras morts où l'eau stagne.

Pour les retenues, quatre ont été sélectionnées : la retenue de Ouagadougou n°3 (dite barrage n°3), la retenue de Loumbila, la retenue d'Itenga, et enfin celle de Boulmigou.

Les points de prélèvements sont situés de façon à être les plus représentatifs possible de l'eau prélevée par les stations de production d'eau potable puisant ces différentes eaux brutes. Le tableau suivant représente successivement les stations concernées.

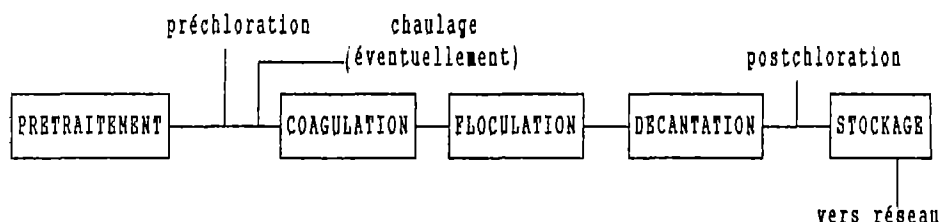
POINT D'EAU	STATIONS	VOLUME PRELEVE/AN en m3	MASSE DE SULFATE/AN en t pour les 2 eaux	OBSERVATIONS
BARRAGE OUAGA * N° 3	OUAGADOUGOU	1991 1.706.000 1992 2.638.470	1991 422	En cette saison, la station ne puise presque plus d'eau dans le barrage n°3.
BARRAGE DE LOUMBILA *	OUAGADOUGOU	1991 8.647.300 1992 8.131.830	1992 470	Les essais réalisés au laboratoire sur colonne sont effectués avec une eau conduite directement sur notre parcelle expérimentale.
BARRAGE D'ITENGA *	POUYTENGA/ KOUPELA	400.000 **	30 **	Station récente mise en service en septembre 92.
BARRAGE DE BOULMIGOU	néant	-		Point d'eau pour le maraichage et l'abreuvement du bétail.
NAKANBE	néant	-		Principal affluent du barrage de BAGRE.
NAZINON	néant	-		Point d'eau pour des villages de brousse et pour le bétail.
MOUHOUN * à Tenado	KOUDOUGOU/ REO	650.000 à 820.000	33 (92) à 72 (93)	La station de Koudougou est située à près de 60 km de la prise d'eau. Le Mouhoun est régulé à une centaine de km sur l'amont au niveau du Haut-Sourou.
MOUHOUN à Poura . Dans la bache de stockage d'eau brute. . Au point d'amenée en tête de traitement.	POURA	180.000	12 (92)	Notons que Poura est situé un peu plus au sud et est plus exposé aux pluies déjà en cette saison. Seul Poura dispose d'une bache d'eau brute de sécurité en tête de station.

* Prélèvement au droit de la station de pompage

** Estimation.

3.1.2. Stations de traitement en place sur ces sites : Filières classiques

Sans nous attarder sur cet aspect, notons que chacune des stations est dotée de filières classiques de traitement d'eaux de surface à savoir :



Le prétraitement se limite le plus souvent au dégrillage. A Tenado (alimentation de Koudougou), soulignons la présence d'un microtamisage. Chaque station dispose d'une préchloration de 3 à 5 mg/l qui est censée améliorer la floculation et donner un résiduel de chlore à l'eau pendant la décantation de façon à éviter une croissance algale.

La coagulation s'opère par agitation mécanique (Ouagadougou) ou par écoulement turbulent dans tous les autres cas. La floculation est réalisée en décanteur-floculateur (Ouagadougou), en chambre de coalescence (Koudougou), en floculateur à chicanes à écoulement horizontal (Pouytenga et Poura).

La coagulation est toujours réalisée par le sulfate d'alumine à des doses variables de 30 mg/l à 100 mg/l de la saison sèche à la saison des pluies.

L'ajustement à un pH d'équilibre par la chaux se révèle nécessaire surtout pendant les mois d'hivernage où le pH des eaux brutes chute aux alentours de 6.

Néanmoins aussi bien les stations de Ouagadougou que Koudougou chaulent en permanence de façon à régénérer le TAC consommé par l'introduction de sulfate d'alumine acidifiant le milieu.

La décantation s'opère dans la plupart des cas statiquement dans des décanteurs à fond incliné de vitesse de surverse de 0,5 à 1 m/h. Seul Ouagadougou est équipé de système pulsator ou accélérateur à voiles de boues (décanteur-floculateur mécanique-Brevet Degremont). La postchloration s'effectue autour de 2 voire 3 mg/l en chlore libre, ce qui pourra paraître excessif pour un traiteur d'eau européen. Ce résiduel est cependant le plus souvent nécessaire pour obtenir un résiduel de chlore non nul en bout de réseau. Le stockage d'une durée d'au moins 1 heure dans les différents cas est fondamental pour assurer un temps de contact satisfaisant pour la désinfection de l'eau.

La distribution vers le réseau est dans un bon nombre de cas un refoulement distributif (cas de Poura, de Koupela, de Koudougou notamment).

Hormis pour la station de Banfora beaucoup plus au sud du pays, tous les points d'approvisionnement en eau des stations de traitement d'eau de surfaces sont ici prélevés. Les stations de Bobo, Dédougou, Kaya prélèvent pour leur part des eaux souterraines et sont donc hors sujet ici.

3.1.3. Qualité des eaux brutes recueillies

Un bilan physico-chimique complet et bactériologique sur chacune des eaux prélevées se traduit par le tableau 3.1.

3.1.3.1. Eaux de retenue

3.1.3.1.1. Eau du barrage de Ouagadougou

Situés au sein même de Ouagadougou, donc très exposés à la pollution d'origine domestique en particulier, les barrages n°2 et n°3 sont en communication, le barrage n°2 se vidant par trop plein dans le barrage n°3. Ces barrages sont alimentés par des eaux de ruissellement provenant d'un bassin versant de plusieurs centaines de km².

Ces eaux à facies plutôt bicarbonaté sodique-potassique sont moyennement conductives, faiblement troubles pour OUAGA 2 (9,4 NTU) et très troubles pour OUAGA 3 (195 NTU) qui fait office de décanteur.

Les concentrations en chlorure sont assez importantes (de l'ordre de 40 à 74 mg/l) ainsi qu'en ammonium (près de 1 mg/l pour OUAGA 3) ce qui laisse présager une pollution par des rejets domestiques, confirmée d'ailleurs par une pollution bactérienne abondante. L'odeur de l'eau provenant du barrage n°3 est d'ailleurs presque nauséabonde. Il aurait été intéressant d'y adjoindre une mesure d'oxydabilité au permanganate ou un test de DCO (demande chimique en oxygène).

3.1.3.1.2. Eau du barrage de Boulmigou

Située à la sortie de Ouagadougou sur la route de Bobo-Dioulasso, cette eau est utilisée pour l'approvisionnement des bêtes et le maraîchage. Sa qualité se rapproche de celle des eaux prélevées sur les barrages n°2 et 3 de Ouagadougou ; elle paraît cependant moins minéralisée et, par là même, elle est en effet moins exposée à la pollution urbaine. La concentration en ammoniac reste non négligeable et sa turbidité encore très importante (395 NTU). A cette époque de l'année il faut dire que le barrage de Boulmigou est au plus bas. Notons son pH assez bas à 5,6 est peut-être significatif d'une macération organique.

3.1.3.1.3. Eau du barrage de Saponé

Située à environ une quarantaine de km au sud de Ouagadougou, en zone rurale, elle est proche en qualité du site de Boulmigou avec un taux de chlorures encore plus conséquent et

curieusement une absence de streptocoques fécaux souvent indicatifs d'une pollution fécale par le bétail. L'ammoniac est également absent.

3.1.3.1.4. Eau du barrage de Loumbila

Cette retenue d'une capacité de 40 millions de m³, située à une vingtaine de km au nord de Ouagadougou, est entourée de zones maraîchères. La turbidité de son eau est de l'ordre de 2,3 NTU à l'état brut en fin de saison sèche. Le développement algal y est très faible ; c'est un milieu plutôt oligotrophe, peu riche en matières nutritives. La pollution fécale mise en évidence est étonnante à une telle concentration (> 100 coliformes fécaux/100 ml) encore que les rejets domestiques peuvent y être diffus, mais surtout localisés le long des rives. Les troupeaux par contre s'abreuvent abondamment à Loumbila surtout en zone amont, assez éloignée pourtant de notre point de prélèvement.

Cette retenue est alimentée par le grand marigot de Massili qui s'écoule en quasi permanence jusqu'au mois de février-mars.

3.1.3.1.5. Eau du barrage d'Itenga

Très isolé sur le plateau mossi entre Pouytenga et Koupela, le barrage d'Itenga alimentait à l'origine une zone maraîchère en contrebas. Son eau paraît un peu moins polluée encore que chargée (99 NTU) et actuellement aussi en période d'étiage. La retenue est essentiellement alimentée par son bassin versant en période d'hivernage. Notons que la station de traitement qui s'approvisionne sur cette retenue pour alimenter Pouytenga et Koupela a une configuration quasi identique à la station de Poura, à ceci près qu'elle dispose d'un bassin de séchage des boues décantées (nouvelles normes OMS qui incitent à concentrer les boues des stations de traitement d'eau potable pour éviter de disperser de l'aluminium dans l'environnement naturel).

3.1.3.2. Eau des rivières à sec

C'est le cas du Nakambé et du Nazinon, qui, au moment du prélèvement, ne sont plus constitués que de bras morts, des grandes mares en quelque sorte où les troupeaux viennent s'alimenter et où les enfants viennent s'ébattre. Ces eaux sont tout aussi polluées, la présence des chlorures le dénote encore. Ces deux rivières, notons le, sont désormais en eau depuis les deux premières pluies de début Juin (50 à 60 mm en tout sur Ouagadougou). Leur couleur chocolat est sans doute due à la présence de matières argileuses.

3.1.3.3. Eau de la rivière Mouhoun

Les eaux sont prélevées en deux sites éloignés d'une centaine de kilomètres : à Tenado, en amont, station de pompage qui alimente la station de traitement de Koudougou-Réo et à

Poura, plus en aval. Le régime de cette rivière est régulé dans la région du Sourou par un système de vannage. Sans entrer dans les détails, cette régulation peut être à l'origine de lâchers plus ou moins brutaux responsables d'une variation de la qualité de l'eau de cette rivière (observations des exploitants ONEA). En basses eaux, son débit est de l'ordre de 2 à 3 m³/s. C'est la rivière majeure du Burkina Faso.

A Poura, les prélèvements ont été effectués dans la bache d'eau brute et à l'exutoire du relevage d'eau brute en tête de flocculateur (c'est-à-dire point référencé P2 lors des essais en station).

La différence de qualité entre les deux eaux (la turbidité en particulier) est naturellement liée à une décantation effective dans le bassin d'eau brute, surtout si l'on opère le prélèvement en surface ce qui est ici le cas.

De Tenado à Poura, la variation de qualité est légère sans être très significative, ce qui est normal puisqu'il n'y a pas d'affluent notable entre les deux points. La minéralisation augmente légèrement et la turbidité s'accroît significativement.

On le verra, les eaux d'une turbidité de 10 à 15 NTU sont idéales pour réaliser une floculation avec Moringa à doses convenables (autour de 100 mg/l). Remarquons que le jour de l'essai à la station de Poura le 15 mai, la qualité de l'eau a évolué par rapport au 15 avril. Cette évolution de la turbidité est due à quelques courtes pluies éparses qui ont eu lieu depuis début mai dans cette région beaucoup plus arrosée que la région de Ouagadougou. La qualité physicochimique de l'eau n'a par contre quasiment pas changé si ce n'est une augmentation de la concentration en ammoniac entre le 15.04 et le 15.05.

3.2. Essais au Jar-test

3.2.1. Protocole expérimental

L'essai au Jar-Test est la méthode la plus répandue et la plus simple pour reproduire à toute petite échelle l'ensemble des processus de coagulation et de coalescence des flocons.

Une série de récipients cylindriques est remplie de l'eau à tester après avoir été disposée sur un banc d'agitation à palettes rotatives. La vitesse de rotation des palettes peut être ajustée automatiquement. On ajoute dans les récipients le réactif coagulant dont on cherche à mettre en évidence les mérites ou les inconvénients ainsi que la dose d'emploi optimale.

L'introduction du coagulant se fait pendant une phase d'agitation rapide de 1 mn à 2 mn à 100 à 150 tours/minute, suivie d'une phase d'agitation modérée d'une vingtaine de minutes à 20 à 40 tours/minute. Dans nos essais, nous choisirons au labo 130 tr/mn et 40 tr/mn pour chacune des phases respectives.

Ces deux phases d'agitation représentatives de la coagulation (flash mixing en anglais) et de la floculation sont suivies d'une période de repos où les flocons formés décantent (pendant 1 heure pour nos essais dans la majorité des cas).

Le contrôle de la qualité se fait :

- visuellement : délai d'apparition des flocons, vitesse de sédimentation pour chaque dose de coagulant ;
- analytiquement : mesure de turbidité, en particulier coloration, taux de matières organiques, dureté éventuellement.

Ces dernières mesures sont effectuées sur des parties aliquotes prélevées à la partie supérieure du récipient (zone surnageante).

La dose optimale de coagulant (en mg/l) est déterminée par une qualité de l'eau surnageante satisfaisante, en particulier pour ce qui est de sa turbidité (turbidité minimale) et de sa coloration (transparence si possible).

Dans notre cas, lorsque la dose optimale n'est pas atteinte, nous considérerons qu'une dose correspondant à une turbidité de l'eau surnageante de l'ordre de 5 NTU est satisfaisante.

Ce choix est arbitraire puisqu'aucune norme n'est fixée au traicteur d'eau pour la qualité de l'eau décantée produite ; il permet néanmoins de limiter l'utilisation de concentrations excessives en Moringa si l'amélioration de la qualité qui en résulte n'est pas sensible.

Pour les coagulants chimiques, il est parfois nécessaire d'ajuster le pH de l'eau pour obtenir des flocs de taille satisfaisante (solubilité minimale des sels ou polymères métalliques formés). Pour le Moringa nous considérerons dans un premier temps que le pH n'influence pas le phénomène de coagulation-floculation.

3.2.2. Résultats et interprétations

Les essais sont réalisés avec une solution mère (un lait) non filtrée de façon générale.

3.2.2.1. Résultats des Jar-Tests (Tableaux 3.3 à 3.6)

- . Poura (1) = en tête du flocculateur, après relevage
- . Poura (2) = dans le réservoir d'eau brute.

Pour Poura (1), deux essais parallèles ont été menés avec une solution mère à 20 g/l non filtrée et une autre filtrée sur une gaze classique utilisée en pharmacie. Les résultats montrent nettement que la filtration appauvrit la solution mère en ce sens

qu'il en faut beaucoup plus pour obtenir une eau d'égale qualité : 5 NTU environ avec 200 mg/l d'une solution mère non filtrée et 300 mg/l de cette même solution filtrée (équivalent de 300 mg/l mais que signifie alors cette concentration puisqu'une bonne partie des suspensions a été retenue dans la gaze ?) (Fig. 3.1).

Une dose satisfaisante pour obtenir une turbidité inférieure à 5 NTU est donc supérieure à 200 mg/l pour une turbidité initiale de l'eau brute de 15,8 NTU avant l'analyse (Jar-Test).

Pour Poura (2) (Fig. 3.2.), la dose à appliquer est beaucoup plus faible; à partir de 20 mg/l, on obtient déjà une turbidité convenable à 3,5 NTU. On peut penser que la nature des matières colloïdales ou en suspension est bien différente entre l'eau relevée et non relevée, donc mieux décantée en surface de la bache d'eau brute. Rappelons que la turbidité initiale de Poura (2) était aussi plus faible : 10,9 NTU.

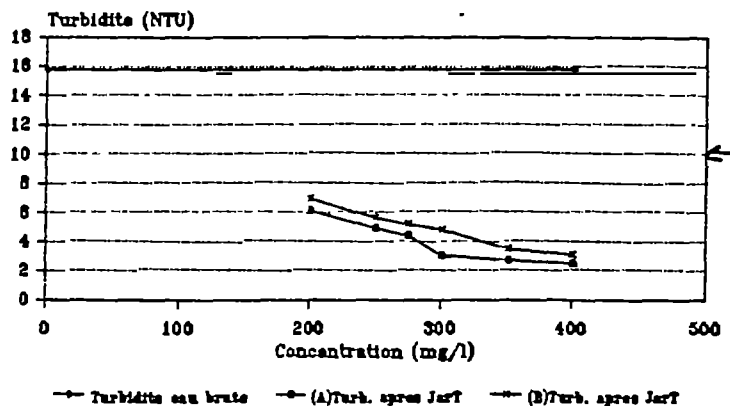
Lors des essais en station, le Jar-Test fournira encore des résultats un peu différents ; avec une turbidité de l'eau brute de 36 NTU, la dose minimale à introduire pour obtenir une turbidité de l'eau surnageante inférieure à 5 NTU est d'au moins 200 mg/l (voir Fig. 3.3).

Au début de la saison des pluies (12/06/93), la qualité de l'eau brute se détériore et la dose de Moringa à injecter pour obtenir une eau décantée convenable après jar test est de 1000 mg/l au moins (Fig. 3.4).

En conclusion, un accroissement de la turbidité de l'eau brute de 16 NTU environ à 36 NTU n'a pas modifié notablement la dose de Moringa à injecter (du 15/04/93 au 14/05/93, la saison des pluies n'a toujours pas commencé) ; par contre en saison des pluies, la turbidité quintuple et la dose de Moringa doit quintupler de la même façon pour produire une eau de bonne qualité dans le cas précis de Poura.

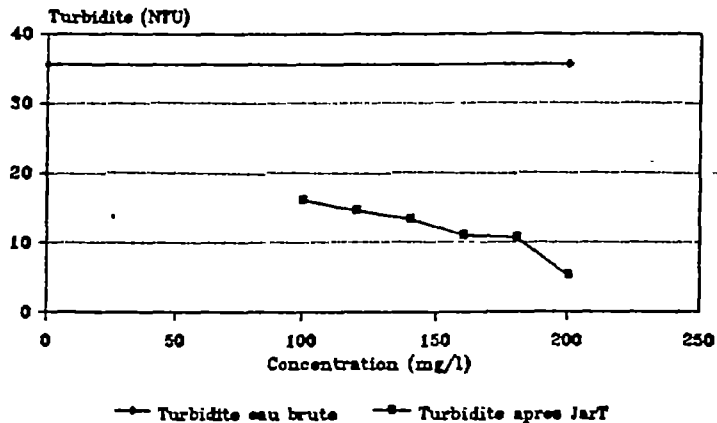
COMPARAISON DE TRAITEMENT PAR
MORINGA A DIFFERENTES DATES

Prise de Poura
(en tete du floculateur : 15/04/93)
fig. 3.1

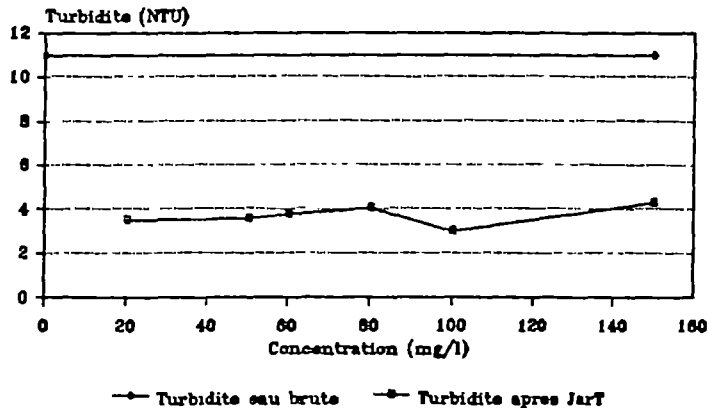


(A) Solution mere non filtrée
(B) Solution mere filtrée

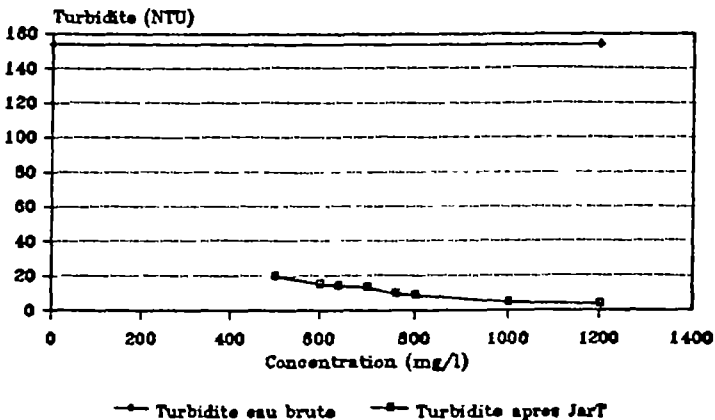
Prise de Poura
(en tete du floculateur : 14/05/93)
fig. 3.3



Prise de Poura
(dans le reservoir d'eau brute:15/04/93)
fig. 3.2



Prise de Poura
(en tete du floculateur : 12/06/93)
fig. 3.4



Pour les eaux de barrage ou les eaux de mare (eaux stagnantes de rivière à sec pour quelques cas) nous avons étudié les eaux suivantes :

- . Ouagadougou n°2 (Turbidité de l'eau brute = 9,4 NTU) (Fig. 3.6)

Une dose de 200 à 250 mg/l est satisfaisante.

- . Ouagadougou n°3 (Turbidité de l'eau brute = 195 NTU) (Fig. 3.5).

La dose à introduire est importante : 800 à 1000 mg/l. On remarque que la turbidité de l'eau traitée n'évolue pas de façon linéaire, loin de là, avec la concentration en coagulant. Les phénomènes de floculation sont suffisamment complexes pour ne pas pouvoir expliquer clairement ce genre de phénomène.

De 200 à 300 mg/l,	le gain est de 5 NTU
De 300 à 450 mg/l,	" " " " "
De 400 à 600 mg/l,	" " " " 2,5 NTU
De 600 à 700 mg/l,	" " " " 0,1 NTU
De 700 à 800 mg/l,	" " " " 5 NTU.

La nette différence de turbidité entre les eaux des barrages n°2 et n°3 de Ouagadougou n'a pas pu être expliquée dans le cadre de ce travail.

- . Loumbila (Turbidité de l'eau brute = 2,3 NTU) (Fig. 3.7)

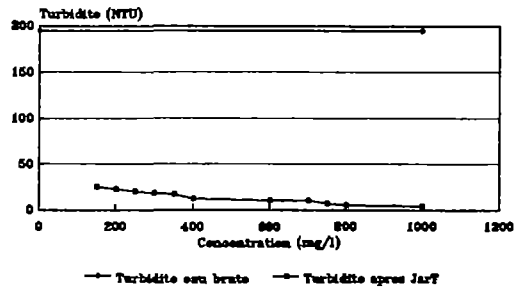
Comme on le constate souvent en traitement des eaux, les eaux faiblement turbides sont difficiles à flocculer : c'est encore ce que l'on met en évidence ici puisque après introduction du flocculant, la turbidité ne fait que croître. Nous noterons que lors des essais de floculation sur fût et décantation sur colonne (tableau 3.7), il faut attendre près de 3 heures après la décantation pour atteindre une turbidité inférieure à 2 NTU (à la dose choisie de 200 mg/l).

- . Itenga (Turbidité de l'eau brute = 99,2 NTU) (Fig. 3.8)

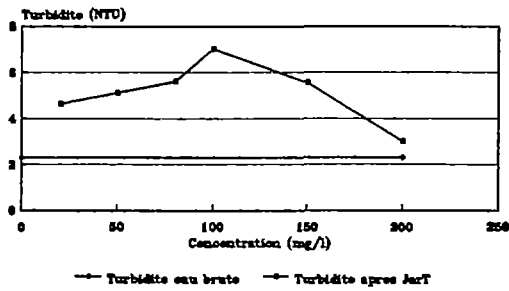
Ce barrage situé à une centaine de kilomètres à l'est de Ouagadougou, toujours sur le plateau mossi, alimente les villes de Pouytenga et Koupela ; curieusement, on obtient une eau traitée d'assez bonne qualité avec Moringa pour une dose supérieure à 500 mg/l et ceci de façon brutale. De 200 à 450 mg/l, le gain de qualité est médiocre voire nul alors que, en général, l'accroissement de qualité est souvent significatif pour une augmentation notable de la dose de Moringa introduite (cas de Ouaga 2, 3, Boulmigou, Saponé, ...).

**ESSAI DE TRAITEMENT MORINGA
SUR DIFFERENTS TYPES D'EAU BRUTE**

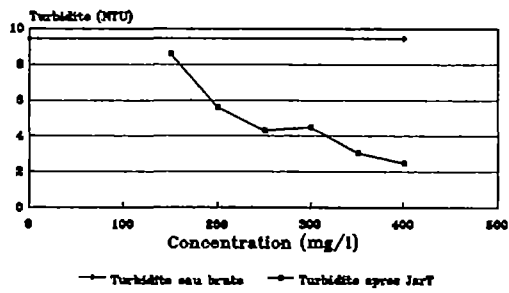
Barrage Ouaga 3
fig. 3.5



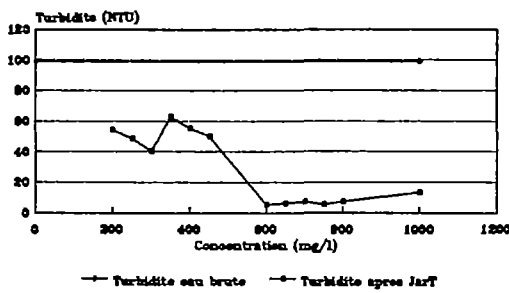
Barrage de Loumbila
fig. 3.7



Barrage Ouaga 2
fig. 3.6



Barrage Itenga
fig. 3.8



Au titre indicatif des essais réalisés sur l'eau du Mouhoun prélevée à environ cent kilomètres de distance donnent des résultats différents (Fig. 3.9 et 3.10). L'eau prélevée à Tenado (5,5 NTU) n'est pas suffisamment turbide pour que le résultat soit conséquent.

. Boulmigou (395 NTU), Nazinon (260 NTU), Saponé (410 NTU), Nakambé (570 NTU) (Fig. 3.11 à 3.14).

Les doses de lait de Moringa à injecter pour satisfaire à notre principe de choix (< 5 NTU) ne sont jamais atteintes.

Nous avons interrompu nos essais à 1500, voire 3000 mg/l ce qui est excessif pour choisir le Moringa comme coagulant.

Nous remarquerons ici encore que la variation de la turbidité de l'eau traitée évolue de façon différente suivant le type d'eau à des accroissements de quelques centaines de mg/l. Le cas du Nakambé est flagrant puisque sur cette eau, l'effet du Moringa semble quasiment nul.

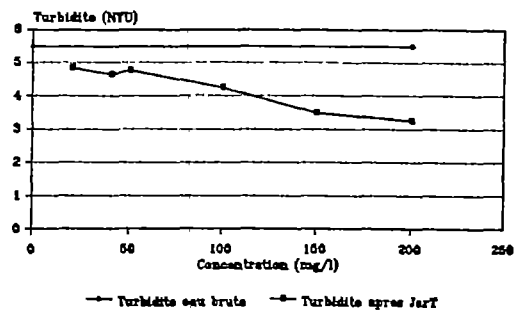
En conclusion, le lait de Moringa a un effet flocculant satisfaisant pour des eaux ne dépassant pas 200 NTU. La nature des éléments à flocculer peut influencer défavorablement sur l'effet flocculant.

Pour les eaux de rivières courantes (Mouhoun uniquement mais il y aura lieu de répéter ces séances de Jar-Test en période d'hivernage) les doses à appliquer sont de l'ordre de 150 à 300 mg/l, voire moins si la turbidité est de l'ordre de 10 NTU.

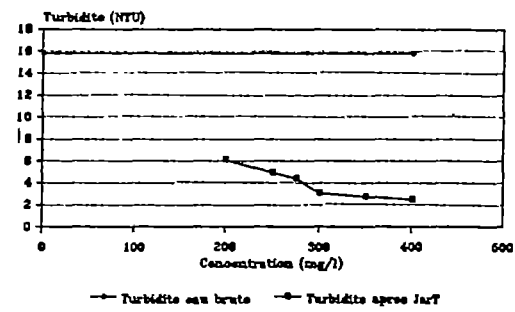
Les eaux faiblement turbides (< 5 NTU) sont difficilement flocculables par Moringa.

COMPARAISON PRISE SUR LE MOUHOUN

Prise de Tenado
(Mouhoun : 15/04/93)
fig. 3.9

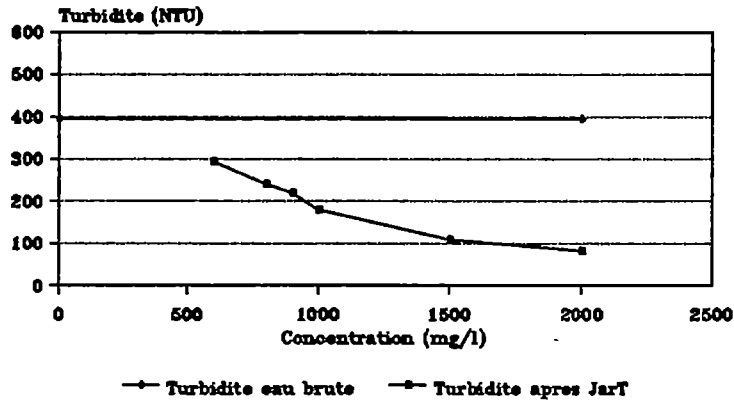


Prise de Poura
(Mouhoun : 15/04/93)
fig. 3.10

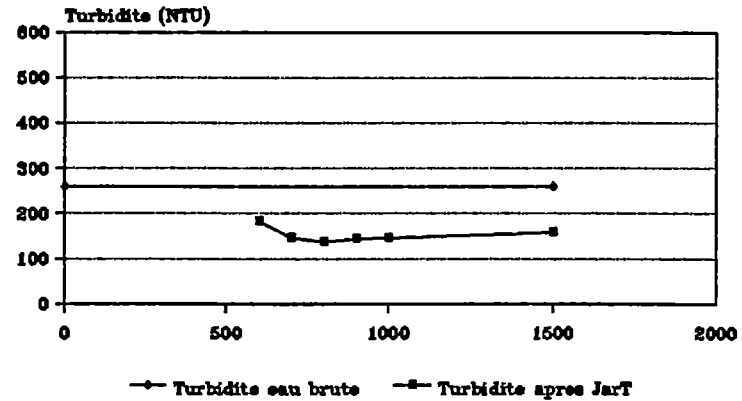


ESSAI DE TRAITEMENT MORINGA SUR DIFFERENTS TYPES D'EAU BRUTE

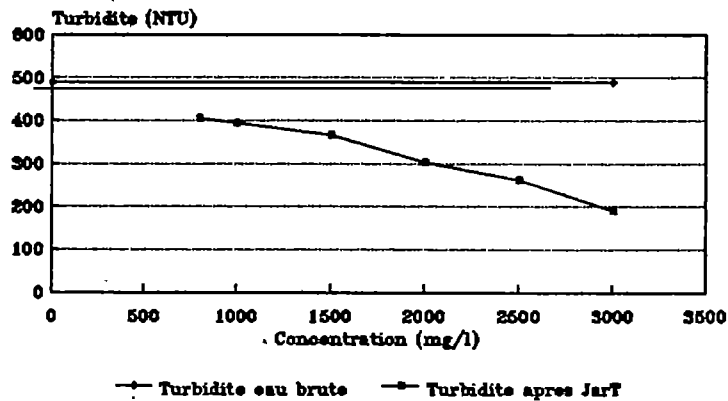
Barrage de Boulmigou
fig. 3.11



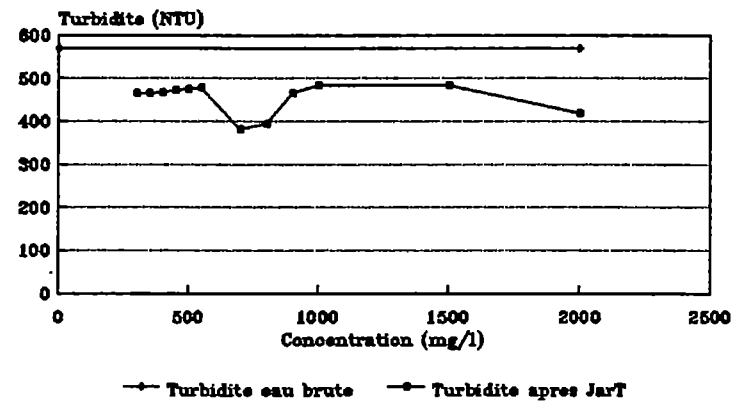
Riviere Nazinon (ã sec)
fig. 3.13



Barrage de Sapone
fig 3.12



Riviere Nakambe (ã sec)
fig. 3.14



3.2.2.2. Qualités physicochimiques et bactériologiques des eaux traitées

Les eaux brutes traitées par le Moringa ont une composition chimique qui évolue peu, si ce n'est pas du tout, après l'introduction de Moringa.

Il suffit en premier lieu de comparer les conductivités avant et après traitement pour s'en assurer.

Seule la concentration en bicarbonates semble un peu diminuée, de quelques unités de mg/l à quelques dizaines de mg/l, sans que l'on puisse vraiment l'expliquer.

Le pH reste quasiment constant.

Les résultats bactériologiques obtenus sont beaucoup plus troublants : la totalité des eaux traitées voit sa qualité bactériologique s'améliorer ; les coliformes totaux et fécaux ne sont parfois mêmes plus identifiés après traitement et dans tous les cas diminuent notablement. Il en est de même pour les streptocoques fécaux. Ces conclusions semblent confirmer les résultats cités par Mme JAHN. Notons que l'analyse bactériologique a été réalisée conjointement et dans le même temps sur les eaux brutes et les eaux traitées et que le contact suspensions de Moringa - Eaux traitées a eu lieu durant 2 heures environ avant l'analyse (durée du jar-test).

Nous compléterons ces résultats un peu plus loin en tentant de dégager un pourcentage d'abattement un peu plus précis.

On peut cependant penser que le temps de contact joue un rôle prépondérant comme pour tout désinfectant classique.

3.2.2.3. Comparaison avec le sulfate d'alumine

Comparons simplement dans un premier temps des doses optimales de sulfate d'alumine obtenues par Jar-Test sur différentes eaux brutes y compris la qualité de l'eau décantée produite par ce traitement, et les doses choisies pour le traitement par Moringa, ainsi que la qualité de l'eau produite (Fig. 3.15 à 3.18).

Figure 3.15

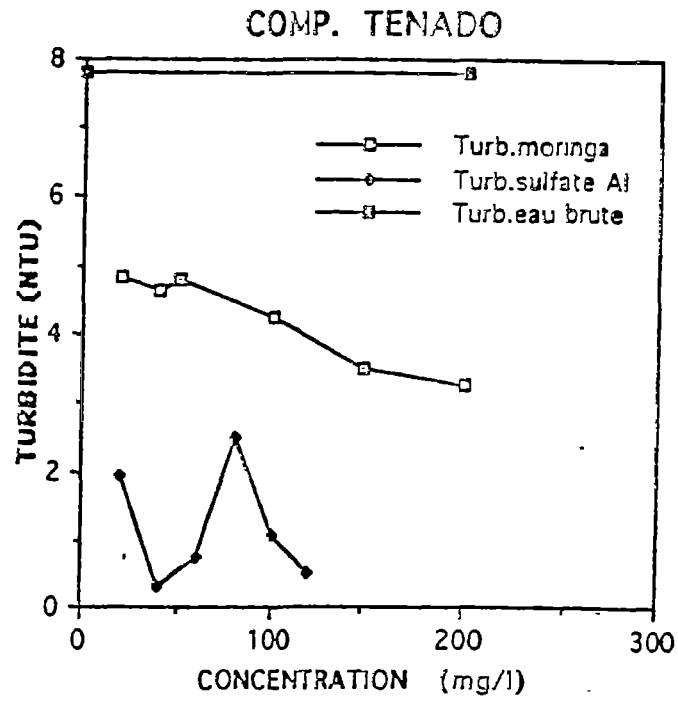


Figure 3.17

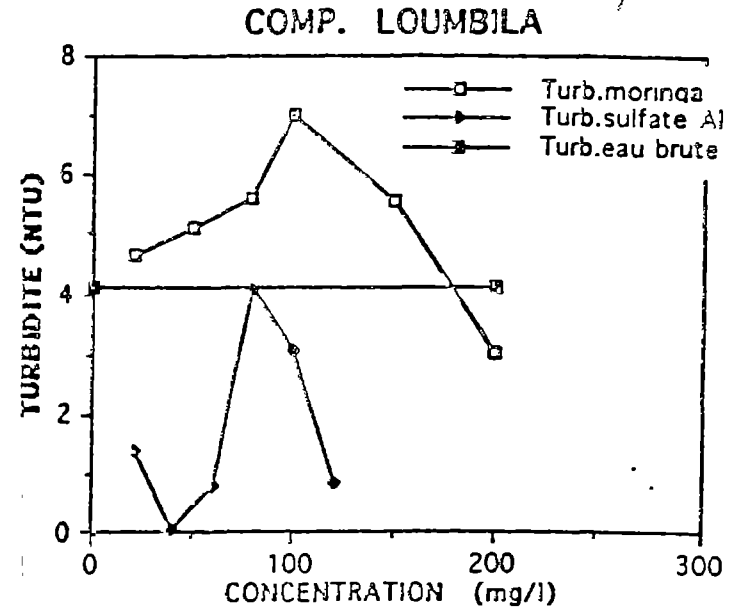


Figure 3.16

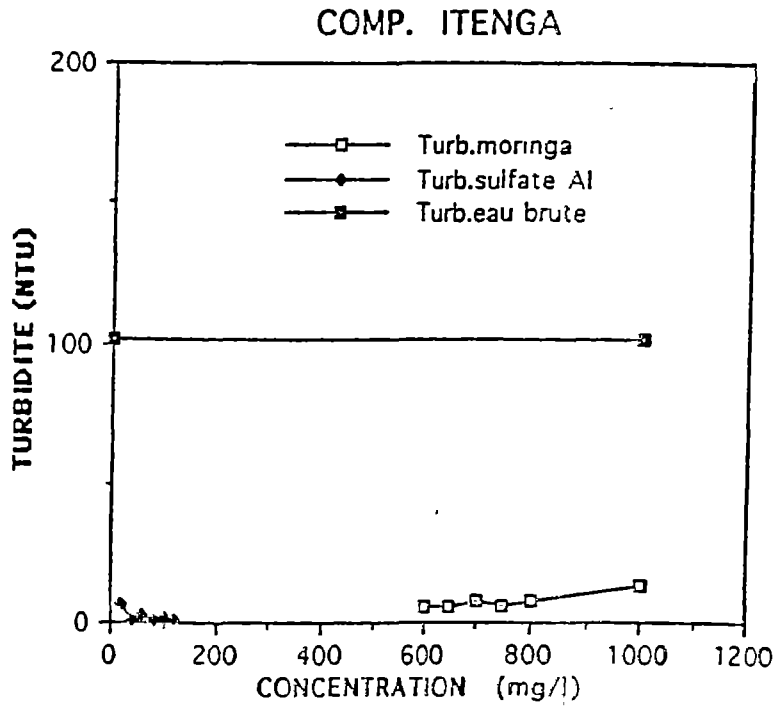
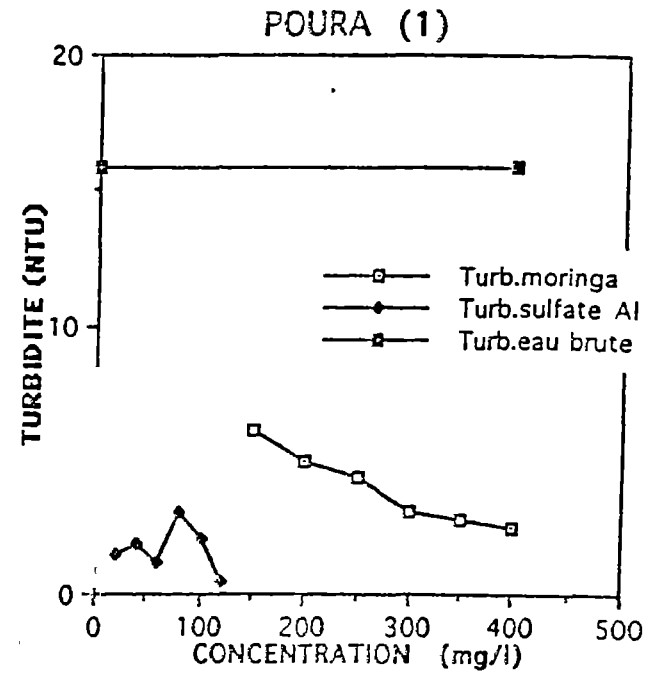


Figure 3.18



Site	Turbidité initiale en NTU	Dose optimale de sulfate en mg/l	Turbidité atteinte en NTU	Dose choisie de Moringa en mg/l	Turbidité atteinte en NTU
TENADO (Avril)	7,8	40	0,3	150 20	3,5 4,9
LOUMBILA (Avril)	4,1	40	0,5	200	3
ITENGA (Avril)	102	120	3,9	600	5,4
POURA (Avril)	15,8	20	1,5	150	6,1
OUAGADOUGOU BARRAGE 3 (en date du 7/06/93)	75,5	100	2,5	600	4,8
POURA (date de l'essai en station - Mai)	33	40	1,5	200	5,5

Quelques résultats obtenus au Jar-Test figurent dans le tableau ci-dessus.

Dans la majeure partie des cas, nous constatons que :

- La dose de Moringa est toujours de l'ordre de 5 à plus de 10 fois supérieure à la dose de sulfate d'alumine pour produire une eau décantée en général de moins bonne qualité.
- Pour les eaux faiblement turbides, le sulfate d'alumine à faible dose produit une floculation et diminue la turbidité ce qui n'est pas le cas de Moringa.
- Nos résultats sont assez différents de ceux obtenus par Mme JAHN puisque dans certains cas, elle faisait remarquer que les doses optimales de Moringa et de sulfate à introduire étaient proches pour néanmoins une qualité d'eau produite toujours un peu moins bonne avec le Moringa (cas du Nil Bleu par exemple en juin 82).

Dans d'autres cas de figures, les doses optimales que Mme JAHN dégageait étaient de l'ordre de 2 à 3 fois plus importantes pour le Moringa que pour l'alun (cas du Nil Blanc en décembre 81). Enfin elle avance que, en particulier en saison sèche, les eaux brutes ne sont pas floculables ce qui semble se confirmer pour nous sur les rivières à sec.

La divergence partielle de nos conclusions, en particulier d'un point de vue quantitatif, est sans doute très liée à la qualité des matières colloïdales présentes dans les eaux brutes du Burkina par rapport aux eaux soudanaises : la nature des argiles notamment influe sur la floculation. Les déterminations minéralogiques des argiles au diffractomètre auraient un intérêt majeur pour conforter cet argument. La composition ionique des eaux a aussi probablement son rôle à jouer. Pour finir, le pouvoir floculant de nos graines est peut être moindre que celles récoltées par Mme JAHN : on le verra plus loin, l'âge des graines influe sur leurs caractéristiques floculantes ; on peut penser dans le même sens que suivant l'origine des arbres Moringa, le pouvoir clarifiant des graines peut varier (type de culture, type de sol, etc ...).

3.3. Essais de cohésion des boues

Ces essais sont importants comme nous l'avons déjà écrit puisque les décanteurs en service au Burkina Faso sont pour quelques uns des décanteurs à voile de boues pulsator et accélérateur.

Un paramètre très important pour l'exploitation de ces ouvrages est le coefficient de cohésion de la boue formant la voile.

Rappelons brièvement le principe de fonctionnement de ces ouvrages. Ils comportent généralement une zone centrale de floculation et une zone annulaire de décantation en communication hydraulique. La boue épaisse en décantation est recyclée en floculation sous l'action du mouvement de la masse liquide créé par une hélice.

Dans ces systèmes, l'eau circule de bas en haut dans la zone de décantation. En remontant à travers la voile de boue que le traiteur d'eau a constitué en ajustant la circulation de l'eau à une vitesse ascensionnelle convenable, l'eau est clarifiée car la voile de boue joue le rôle de "filtre" ou de "tamis" pour les particules floculées de l'eau traitée.

Le principal problème consiste à éviter la formation de chemins préférentiels à travers la voile de boue. Une alimentation pulsée (cas du Pulsator) satisfait cette condition.

Dans tous les cas, il faut se préoccuper de la vitesse ascensionnelle de l'eau par rapport au volume de la voile de boue ou du lit de boue.

Si v est la vitesse ascensionnelle de l'eau, V_0 le volume du lit de boue lorsque l'eau n'y pénètre pas, ce volume devient V lorsque l'eau circulant de bas en haut provoque son expansion. L'objectif de l'expérimentation au laboratoire est de relier v à

V/Vo. De cette corrélation résultera la mesure du coefficient de la boue. Cette technique n'est, bien sûr, exploitable que si la boue décante bien.

3.3.1. Protocole expérimental

On place dans une éprouvette de 250 à 500 cm³ un mélange boueux. Il doit se tasser pour donner au bout d'une dizaine de minutes 50 à 80 cm³ de boues délimitées par une ligne de partage nette avec les eaux claires surnageantes.

On va expanser cette boue qui a tendance à se tasser à un certain volume en introduisant des fractions de 10 cm³ d'eau flocculée. Il est alors nécessaire de mesurer le temps nécessaire pour ajouter 100 cm³ en tout d'eau flocculée en maintenant un niveau d'expansion H1 constant dans l'éprouvette.

On modifie ensuite cette hauteur d'expansion en augmentant la quantité d'eau introduite par unité de temps.

Les résultats obtenus permettront de tracer la vitesse ascensionnelle de l'eau (fonction directe du débit introduit et de la section transversale de l'éprouvette) en fonction de la hauteur d'expansion. Cette expansion est généralement une fonction linéaire de la vitesse de l'eau et fournit un coefficient K caractéristique de la boue. K est située généralement entre 0,8 et 1,2 m/h pour les boues de sulfate d'alumine.

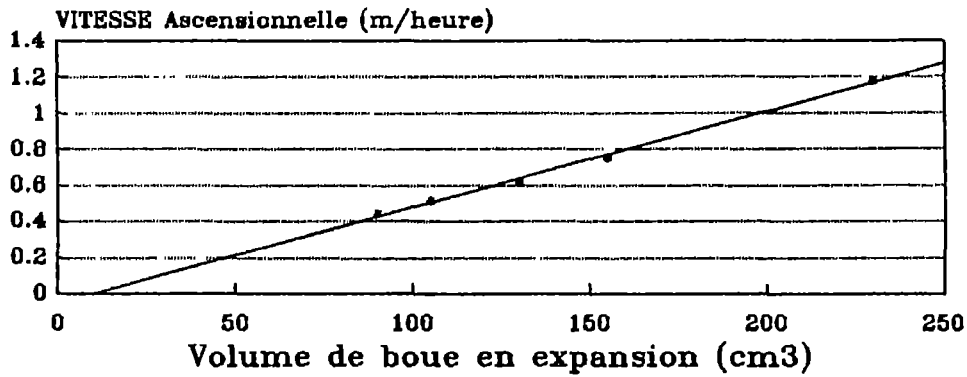
3.3.2. Résultats et conclusions

Les essais de cohésion ont été réalisés sur la boue récoltée dans les béchers de Jar-Test de l'eau de Ouaga 3 en date du 7/6/93 d'une turbidité de 75 NTU, traitée à une dose de 400 mg/l de Moringa.

Ces essais ont été menés avec le plus grand soin, en introduisant en particulier un répartiteur de débit évasé en fond d'éprouvette pour que le flux d'eau ascensionnelle soit homogène dans toute la section transversale de l'éprouvette.

ESSAI DE COHESION DE BOUE TRAITEMENT AU MORINGA

fig. 3.19 : boue Moringa

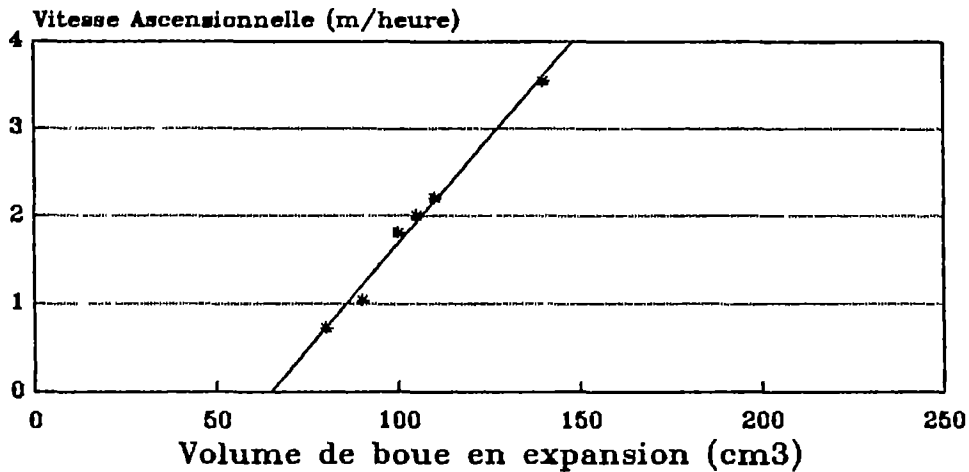


* traitement au MORINGA —+ Droite de corrélation

*Boues produites par le traitement de
l'eau du barrage n 3 de OUAGA (7/6/93)
par 400 mg/l de MORINGA

TRAITEMENT AU MORINGA ET AU S.A.

fig. 3.20 : boue Moringa + S.A



* Traitem. au MORINGA —+ Dte de corrélation

* Boues produites par le traitement de
l'eau du Barrage N 3 de Ouaga par
15mg/l de SA et 60mg/l de Moringa

Les mesures sont cohérentes (Fig. 3.19) et donnent une droite du type $v = K \left(\frac{V}{V_0} - 1 \right)$ où V_0 vaut le volume de la boue

tassée correspondant à une vitesse nulle mesurée sur le graphique et V le volume apparent de la boue en expansion.

Le coefficient K déterminé donne environ 0,1 à 0,2 m/h, ce qui prouve que cette boue est légère, constituée d'un flocculant fragile et certainement difficilement utilisable dans un décanteur-flocculateur à contact de boue.

Des essais complémentaires menés avec une solution combinée de sulfate d'alumine et de Moringa fournissent des résultats beaucoup plus satisfaisants (Fig. 3.20). Nous commenterons ces essais au chapitre VI.

3.4. Essai sur pilote : Rendement de la décantation d'eau flocculée par le Moringa

La décantation d'une eau flocculée est souvent assimilée par les traiteurs d'eaux à une décantation diffuse (appelée encore freinée ou entravée). Ce type de décantation concerne une solution faiblement concentrée dont les particules ont tendance à s'agglomérer et à flocculer ensemble quand elles se rencontrent. Ceci a alors pour effet d'augmenter la vitesse de chute.

Cette décantation s'applique bien pour les floccs formés d'hydroxyde d'aluminium polymérisé qui, lorsqu'ils se rencontrent, réalisent des pontages et s'enchevêtrent assez facilement les uns avec les autres. Les floccs grossissent donc et sédimentent plus vite. Ce phénomène conduira le traiteur d'eau à limiter la dimension de ses ouvrages puisque le temps de séjour nécessaire pour atteindre une bonne décantation s'en trouve diminué d'autant.

Notons que cette coalescence pendant la sédimentation est d'autant plus effective que la vitesse de chute des floccs n'est pas uniforme. Une hétérogénéité des vitesses de chute conduit donc à une probabilité de rencontre entre les particules plus importante. Le gradient de vitesse d'écoulement dans le liquide accroît aussi cette coalescence.

L'approche expérimentale de ce phénomène n'est pas si simple et le traiteur d'eau préfère souvent l'approche en laboratoire décrite en 3.4.1, plutôt que de tenter de représenter le phénomène analytiquement.

Comment se comporte une eau flocculée par le Moringa ? Tout dépend à l'origine de la qualité de l'eau brute flocculée. L'eau de Loumbila, peu turbide, floccule très mal. On obtient après la phase de coagulation des suspensions de Moringa qui ne s'agglomèrent quasiment pas entre elles. La flocculation proprement dite n'a donc pas lieu. L'eau du barrage de Ouagadougou n°3 ou l'eau de Poura, flocculée par le Moringa à une dose supérieure puisque beaucoup plus chargée (75 NTU et 32 NTU respectivement), fournit des floccs visibles mêmes s'ils restent petits, d'une dimension de 0,1 à 0,3 mm. Ces floccs sont très sensibles à toute agitation et donc à toute force de cisaillement. Ils se brisent aisément. On peut penser que la taille qu'ils adoptent est optimale. Au-delà, leur consistance ne serait pas suffisante et tout accroissement complémentaire en volume conduirait à leur dislocation. Il reste que, lors de la décantation, des particules à peine visibles, résidus de Moringa de très faible taille, subsisteront en suspension et ne décanteront pas (elles sont sans doute à l'origine de la turbidité résiduelle limite obtenue après un temps de décantation de 24 heures).

La décantation d'une eau flocculée par le Moringa est donc :

- libre si le flocc ne s'est pas formé,
- diffuse si les floccs sont visibles mais toujours associée à une décantation libre pour une part des suspensions de Moringa de très faibles tailles non solidaires d'un flocc.

3.4.1. Protocole expérimental

L'eau brute est flocculée avec une dose de coagulant choisie par Jar-Test en réalisant une agitation rapide et une agitation plus lente dans un second temps. Cette opération s'effectue dans un fût cylindrique de 300 l de contenance. Après injection d'une quantité adéquate de lait de Moringa correspondant à la dose optimale, l'agitation rapide est menée avec un agitateur à barreaux répartis sur toute la hauteur du fût avec une vitesse de rotation de près de 130 tours/minute. Cette phase est prolongée par une phase d'agitation lente avec un agitateur adapté à pales de bois. L'espacement des pales répond au critère classique de dimensionnement des agitateurs à pales tournantes utilisés dans les grandes stations de traitement, à savoir :

- une surface globale de pales dans les chambres de flocculation ne dépassant pas 15 à 20% de la section d'écoulement ;
- une vitesse périphérique de l'agitateur mécanique située entre 1 m/s et 0,2 m/s (en général ces vitesses sont décroissantes dans les chambres de flocculation successives d'amont en aval).

Après 20 minutes d'agitation lente à 20 tours/minute pour respecter la fourchette de vitesse linéaire indiquée ci-dessus, on remplit lentement de façon à ne pas briser les floccs une colonne de décantation avec l'eau ainsi flocculée. Des essais statiques de décantation sont alors réalisés.

Nous prélevons à différentes cotes (tous les 40 cm) des échantillons d'eau décantée et ceci à intervalles de temps donnés de 30 minutes à 3 heures en général.

La hauteur de colonne est de l'ordre de 2 mètres (profondeur minimale pour la zone de décantation d'un décanteur statique).

Les échantillons prélevés sont analysés. On recherche en général la quantité de matières flocculées par unité de volume en ayant bien sûr préalablement pris le soin d'avoir déterminé cette quantité à $t = 0$ avant décantation.

La diminution de la concentration particulaire nous permet de connaître en chaque point, le rendement de la décantation. On peut alors aisément intégrer ce rendement sur toute la hauteur et en fonction du temps, en traçant des courbes d'iso-rendement fonction de t (temps de décantation) et de z (profondeur).

Différentes techniques de calcul numérique permettent d'apprécier un rendement global à un moment donné. On accroît la précision de la mesure du rendement en diminuant l'écartement entre chaque point de prélèvement et le temps entre chaque échantillonnage.

Cette méthode a pour objectif principal de calculer pour une eau flocculée donnée, le temps de séjour nécessaire pour aboutir à un rendement fixé. De là, la vitesse de surverse V est calculée par :

$$V = \frac{\text{débit traité}}{\text{surface horizontale de décantation}}$$

Directement dépendante de ce temps de séjour et de la profondeur de l'ouvrage de décantation, elle sera calculée pour un débit de traitement fixé par le traiteur d'eau qui a des objectifs de production connus.

Graphiquement, on estimera donc, pour un rendement donné, le temps de séjour adéquat et donc la vitesse de surverse correspondante, ou, pour un accroissement de débit, la connaissance du temps de séjour nous permettra d'extrapoler sur le graphe le rendement qu'on est censé obtenir.

Il est d'usage cependant, de façon à prendre en compte les courts circuits, les phénomènes de turbulence à l'entrée et en sortie de décanteur, les problèmes de courants induits par de

léger gradient de température dans la masse d'eau, d'appliquer des coefficients de sécurité de 1,5 à 1,75 pour le temps de séjour, et de 0,65 à 0,85 pour les débits.

Pour le Moringa, les exploitations de ce test nous conduiront à répondre à la question : "Quel temps de séjour est-il raisonnable de prendre en compte pour la décantation satisfaisante d'une eau brute flocculée par le Moringa ?".

N.B. : Attention, il ne faut pas perdre de vue que ce temps de séjour sera fonction de la qualité de la floculation et du type d'eau brute.

3.4.2. Résultats (Voir tableaux 3.7)

Trois essais de floculation et décantation ont été tentés :

- sur l'eau de Loumbila (3,5 NTU) dans un premier temps qui est disponible directement sur notre parcelle expérimentale mais qui présente une faible turbidité pour une eau brute ;
- sur l'eau du barrage n°3 de Ouagadougou prélevée le 7/06/93 après quelques jours de pluies (turbidité = 75,5 NTU) ;
- sur l'eau du Mouhoun à Poura prélevée le 12/06/93 en début de saison d'hivernage (turbidité = 154 NTU).

La méthodologie a été suivie scrupuleusement à l'exception de la détermination des matières en suspension dans chaque échantillon. Nous avons préféré déterminer le résidu sec total de chaque échantillon à 105°C. Il suffit alors de déduire le résidu sec minéral de l'eau à la même température pour déduire la masse de matières colloïdales ou en suspension par litre d'eau.

La qualité physico-chimique de l'eau n'évoluant pas, cette variante est directement utilisable.

On a pris bien soin préalablement de déterminer la concentration en matières à $t = 0$. Celle-ci doit se rapprocher nécessairement de la somme du résidu sec minéral de l'eau brute et de la dose de moringa introduite en mg/l, à savoir 150 mg/l déterminés pour Loumbila, 500 mg/l pour le barrage n°3, 1000 mg/l pour Poura.

Les courbes iso-rendements et le graphe conjugué figurent ci-joint pour l'essai de Loumbila (Fig.3.21 et 3.22). Il aurait été tout aussi intéressant de présenter ainsi les résultats sur le barrage n°3 mais le temps nous a manqué.

Dans tous les cas, l'évolution de la turbidité en fonction du temps et de la profondeur a été suivie précisément.

Enfin pour l'eau flocculée du barrage n°3 et de Poura, on a constaté visuellement une nette différence de qualité entre l'eau décantée dans la colonne et l'eau décantée dans le fût de préparation.

3.4.3. Interprétations : Données pratiques de dimensionnement

3.4.3.1. Cas de Loumbila

Pour l'eau de Loumbila, la floculation est quasi inexistante et on peut penser que le pilote de décantation apprécie surtout la sédimentation des suspensions de Moringa plutôt que celle des floccs formés.

A la lumière de ces résultats, les conclusions les plus évidentes sont :

- La relative linéarité des courbes d'iso-rendement par rapport à celle classiquement obtenue avec les flocculants chimiques. Ceci tendrait à démontrer que les particules de Moringa décantent essentiellement suivant une décantation libre à vitesse de chute quasi-constante. Globalement leur vitesse de chute s'échelonne entre 5 cm/heure et 1 m/heure pour les particules les plus lourdes. Au laboratoire, il apparaissait tout aussi clairement qu'après un temps de 1 heure, les premiers centimètres d'eau superficiels étaient d'une grande transparence. En dessous de cette zone, de fines particules de Moringa étaient encore présentes. A titre de comparaison, nous sommes assez loin des vitesses de chute couramment rencontrées pour les floccs d'aluminium (1,8 à 5,4 m/heure).
- Il faut atteindre 3 heures avant d'atteindre une turbidité satisfaisante inférieure à 2 NTU. Une masse de l'ordre de 20 mg/l en suspension de Moringa laisse apparaître une turbidité de 1,6 NTU, visible à l'oeil nu. A cette turbidité il faut bien comprendre que l'échantillon est constitué d'eau très bien clarifiée dans laquelle subsistent des particules fines paraissant presque en équilibre à l'oeil nu, à une concentration particulière de quelques dizaines par cm³, voire moins.

Figure 3.21

COURBE 1

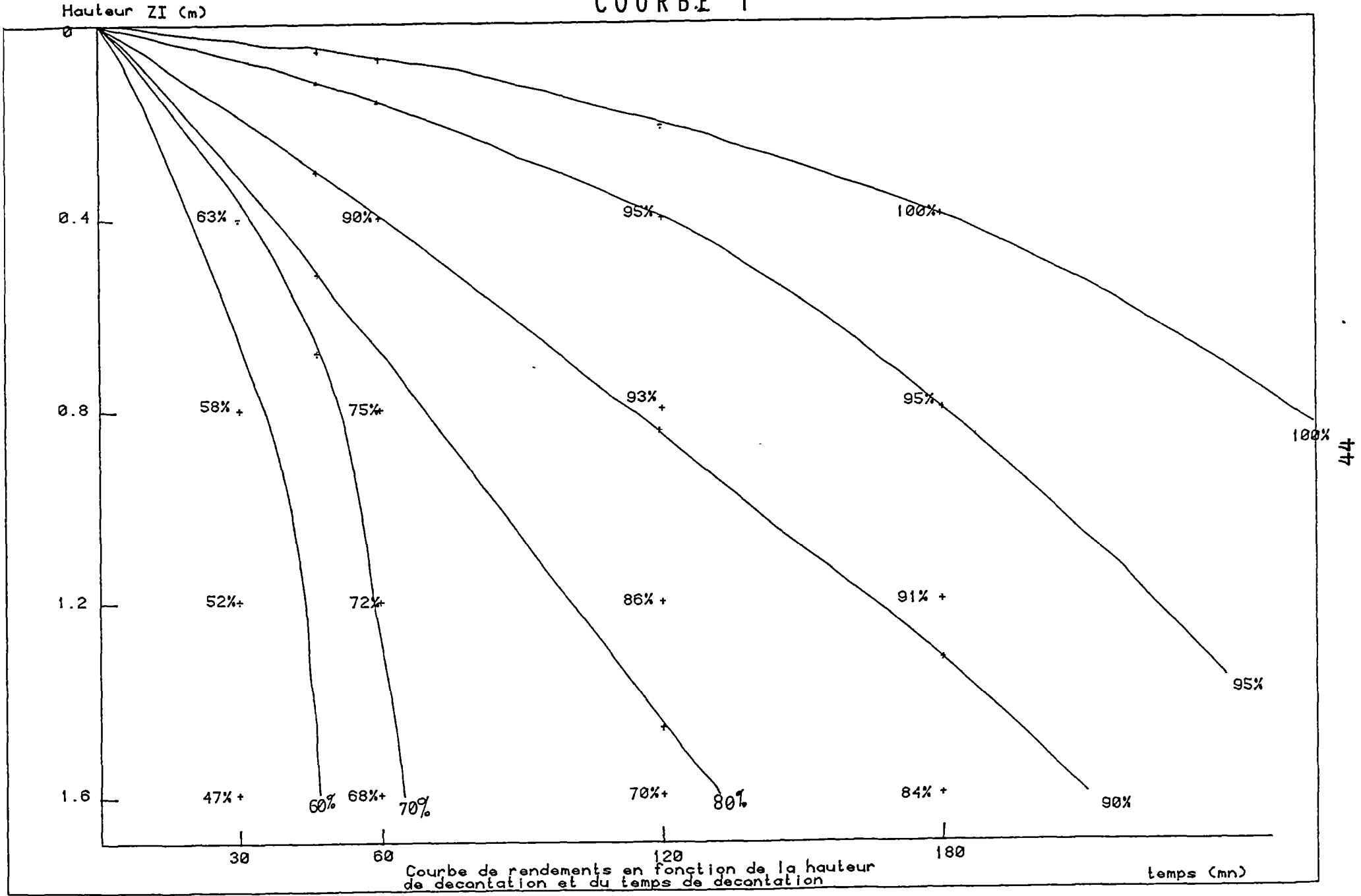
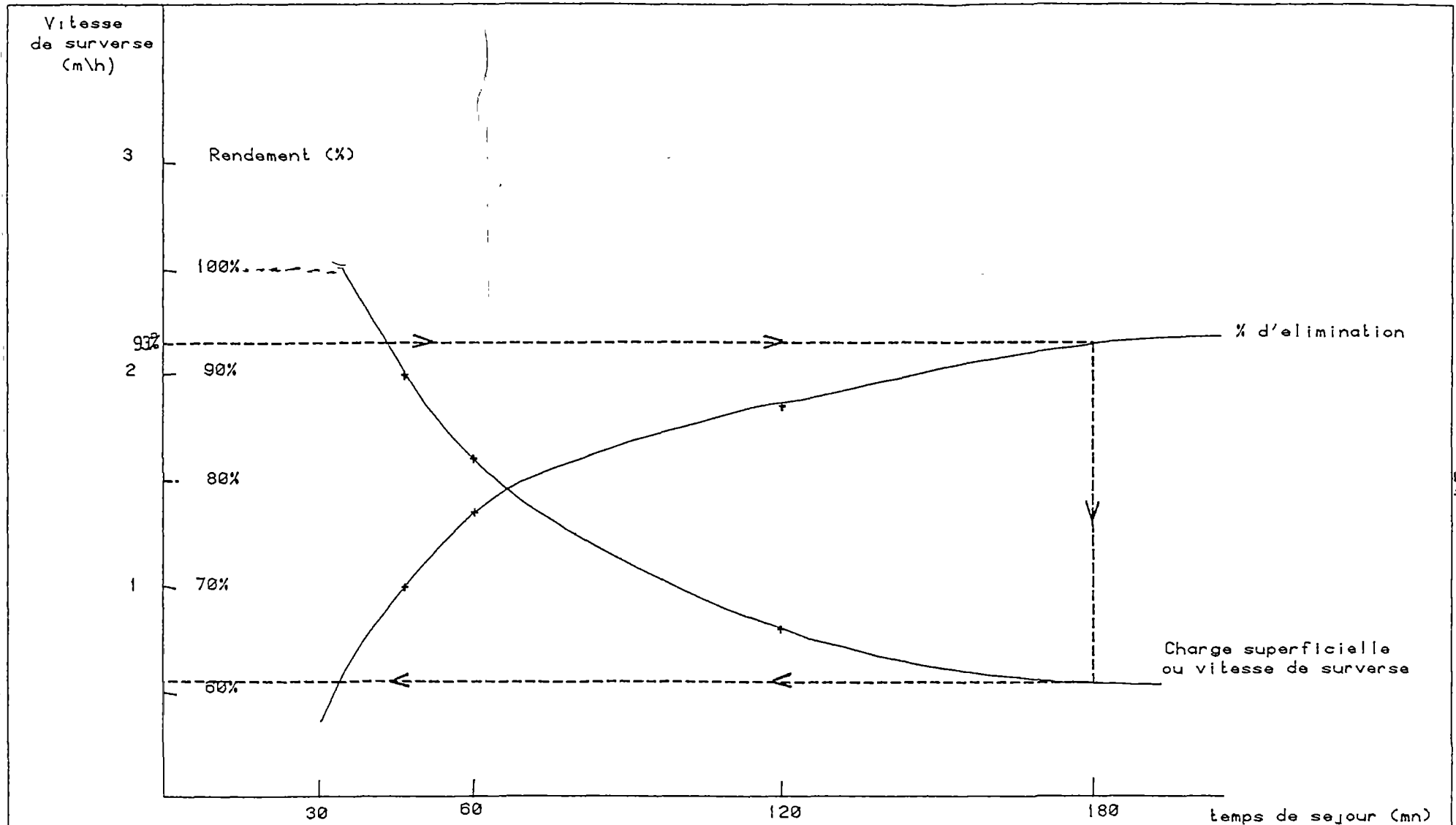


Figure 3.22

COURBE 2



Courbe donnant la vitesse de surverse et le temps de séjour correspondant connaissant le rendement

Pour un temps de deux heures de décantation statique, l'élimination des particules de Moringa en suspension (plus que les floccs proprement dit) est satisfaisante puisqu'on atteint de l'ordre de 95%. Ce temps de séjour correspond à une vitesse de surverse non corrigée de 0,5 à 0,75 m/h. En décantation dynamique une vitesse réduite de 0,35 à 0,5 m/h serait nécessaire après prise en compte des coefficients classiques de sécurité, ce qui finalement se rencontre assez rarement sur les décanteurs statiques construits (Vitesse de surverse toujours supérieure à 0,5 m/h). Il sera donc probablement nécessaire de diminuer le débit de traitement pour décanter l'eau flocculée par le Moringa sur un décanteur classique.

3.4.3.2. Cas des eaux du barrage n°3 de Ouagadougou et des eaux brutes de Poura

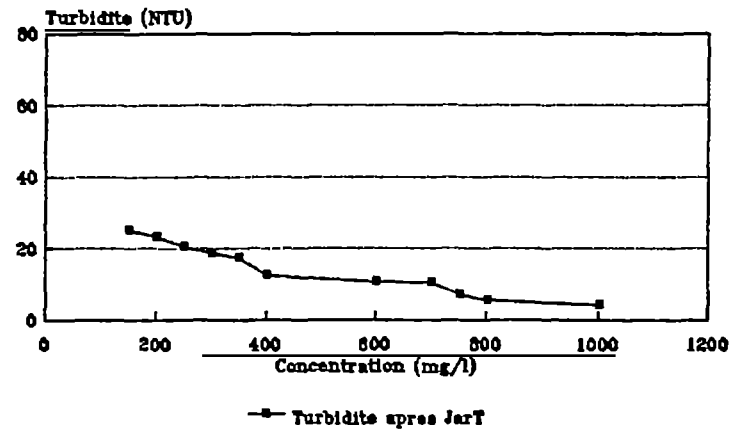
Le pilote de floculation et de décantation doit être utilisé en testant des eaux d'une certaine turbidité, au moins supérieure à 20 NTU pour pouvoir observer des floccs. L'eau de Loumbila ne permettait pas d'obtenir un flocc visible à l'oeil nu ; des volumes de 200 litres d'eaux brutes ont ainsi été prélevés sur le barrage de Ouagadougou n°3, le 7/06/93 (turbidité 75,3 NTU), et à la station de Poura le 12/06/93 (turbidité 154 NTU) après le début de la saison des pluies. Transvasés dans le pilote de floculation, elles ont été traitées à des doses de Moringa déterminées par Jar-Test au laboratoire, à savoir 500 mg/l et 1000 mg/l respectivement, pour atteindre la turbidité de l'ordre de 5 NTU obtenue au laboratoire après une heure de décantation. (Fig. 3.24 pour OUAGADOUGOU et Fig. 3.4 pour POURA déjà présentée page 27).

Les mesures effectuées (tableaux 3.7) sur la colonne de décantation et dans le fût de floculation prouvent clairement que :

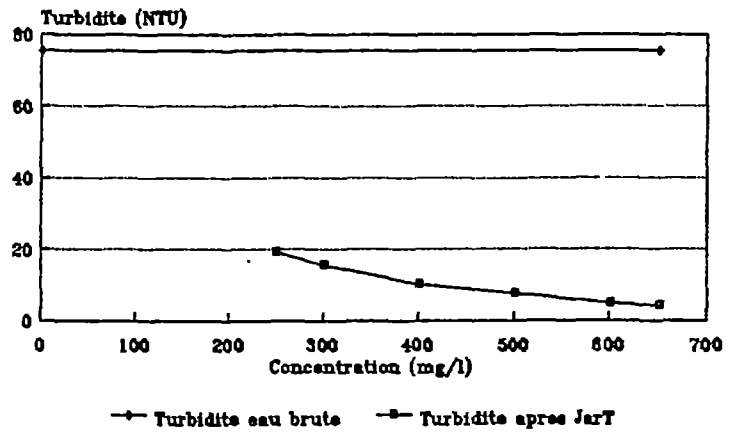
- Un temps de décantation d'au moins 2 à 3 heures en décantation statique est nécessaire pour atteindre un rendement tout juste suffisant de 80%, et un abattement de la turbidité de l'ordre de 70 à 75%.
- La décantation dans le fût s'opère beaucoup mieux que dans la colonne ; deux explications peuvent être avancées à cet égard :
 - . la fragilité des floccs formés qui se brisent au moment du transvasement vers la colonne ;
 - . la phase de floculation à faible agitation par simple inertie se poursuit encore dans le fût de floculation après le transvasement, et les floccs sont de meilleur calibre après encore quelques minutes.

COMPARAISON DU TRAITEMENT PAR MORINGA
EN FIN DE SAISON SECHE ET DEBUT SAISON DES PLUIES

Barrage 3 Ouagadougou
Turb. eau brute = 195 NTU (14/04/93)
fig. 3.23



Barrage 3 Ouagadougou
07/06/93
fig. 3.24



Parallèlement, le temps de séjour de l'eau dans le décanteur est évalué à 2 heures en première approximation (nous verrons que "la réalité est un peu différente"). Le critère de produire une eau pendant au moins deux fois le temps de séjour de l'eau dans l'ouvrage de décantation est donc respecté.

Par ailleurs, le réseau dispose d'un réservoir de 150 m³ qui pourra assurer l'alimentation de la population pendant au moins 6 heures, de préférence en week end, jours où les consommations sont moindres car la mine d'or, principale consommatrice, travaille à rythme ralenti.

L'injection du flocculant est réalisée par un système rudimentaire mais efficace.

La station est équipée d'un flocculateur à chicanes. Cet ouvrage permettra un bon mélange de la solution flocculante et un temps de contact suffisant pour flocculer.

L'ONEA, enfin, est prête à mettre à notre disposition sa station à titre expérimental pour une durée au moins égale à 10 heures. Une équipe d'agents nous épaulera durant toute l'expérience en des points clefs de la station.

4.2.1. Fiche technique et caractéristiques de la station

A. Capacité

moyenne journalière	:	600 m ³ /jour
maximale	"	: 750 m ³ /jour
annuelle		: 180.000 m ³

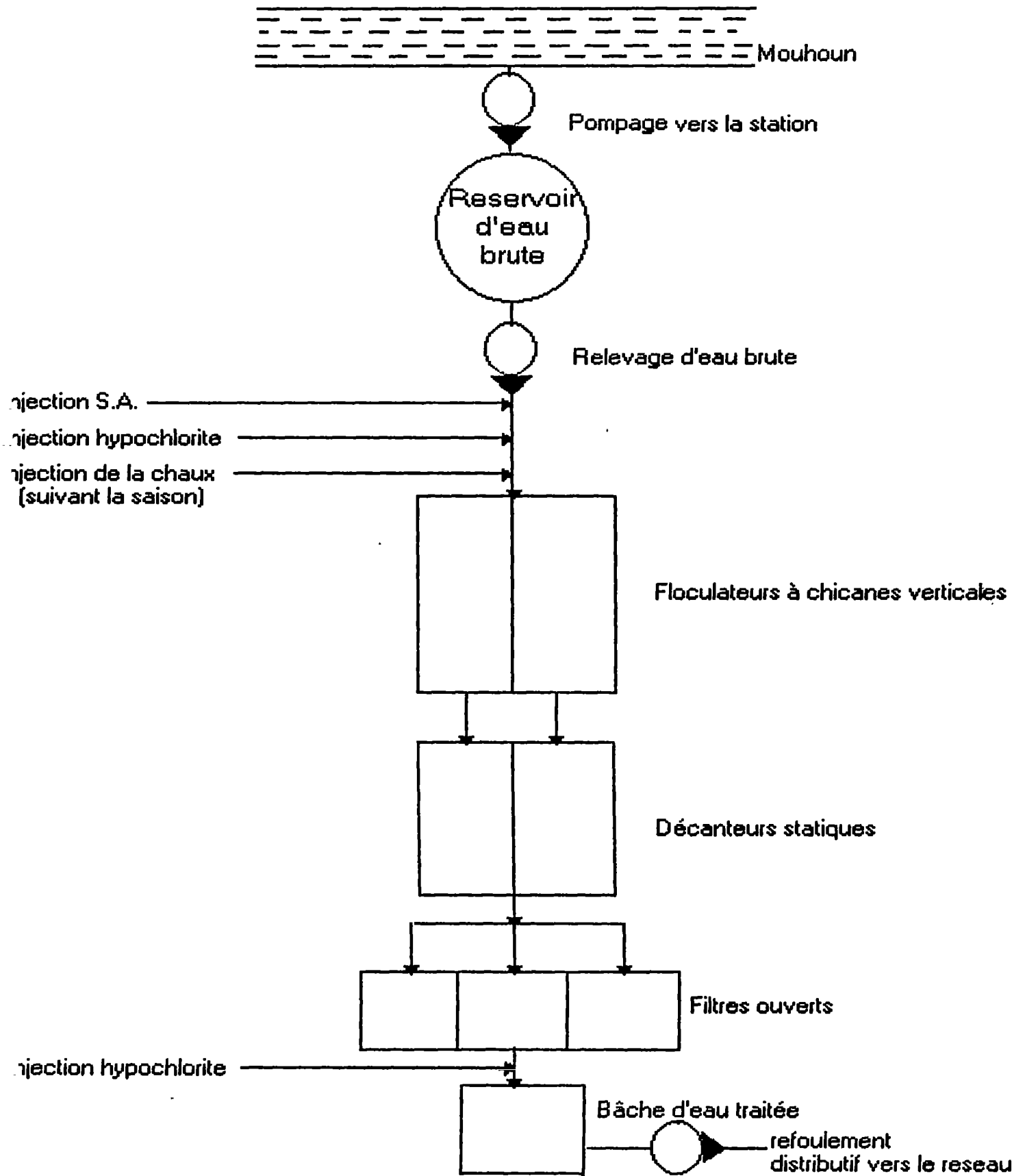
B. Ouvrage

- 1 - Bâche d'eau brute : capacité de 150 m³
- 2 - Coagulateur : chute d'eau d'environ 2 mètres
- 3 - Flocculateurs à chicanes :

- . Deux en parallèle
- . 3 compartiments comportant en tout 13 couloirs de chicanes
- . Parcours moyen = 156 m.
- . Profondeurs respectives 30 cm, 34 cm et 58 cm avec un décrochement de pente sur le dernier compartiment.
- . Longueur d'une chicane = 60 cm
- . Largeur d'une chicane = 15 cm.
- . Vitesse d'écoulement au débit nominal : entre 0,1 et 0,2 m/s.

fig. 4.1

SCHEMA GENERAL DE FONCTIONNEMENT DE LA STATION



4 - Décanteurs statiques

- . Deux en parallèle
- . Contenance totale = environ 70 m³
- . Pente du fond = 7 %
- . Trous circulaires de répartition de l'eau flocculée de 10 cm de diamètre espacés de 13 cm horizontalement sur toute la largeur, et de 8 cm verticalement sur une hauteur de 177 cm

- . Profondeur de l'ouvrage = 2,65 m à l'entrée
1,96 m à la sortie
- . Largeur : 2,80 m
- . Longueur : 9,85 m
- . Une rigole centrale de réception des boues
- . Faible inclinaison transversale vers la rigole
- . Récupération des eaux décantées par surverse.

- . Débit nominal par le décanteur : 18 m³/h
- . Vitesse de surverse = 0,65 m/h
- . Vitesse d'écoulement moyenne estimée = 2,7 m/h
- . Temps de séjour théorique estimé de l'ordre de 4 heures.

N.B. : Le temps de séjour pratique est en fait inférieur à 2 heures.

5 - Filtres ouverts

- . Trois en parallèle,
- . Fonctionnement à charge variable de 0,2 m jusqu'à une hauteur de 2 mètres,
- . Granulométrie : de 1 à 2 mm
- . Epaisseur : 1 m environ
- . Surface de filtration : 2,80 m² soit 7,4 m² au total
- . Vitesse de filtration : 4 m à 6 m/h.
- . Lavage à l'eau
- . Particularités : difficultés pour ôter la totalité des matières colmatantes.

6 - Bâche d'eau claire traitée

- . Capacité de 150 m³
- . Chicanée avec un seul départ en ϕ 150.

C. Traitement

1 - Coagulation au sulfate d'alumine

- . Dose de 30 à 50 mg/l en saison sèche
- . Jusqu'à 100 mg/l en saison des pluies
- . Solution mère de 45 à 50 g/l de Al₂(SO₄)₃, 18H₂O

- . Injection par système de double fûts à charge constante pour injecter de l'ordre de 30 à 50 l/h.
- 2 - Préchloration à l'hypochlorite de calcium
 - . Dose de 3 à 4 mg/l
 - . Solution mère de 5 à 10 g/l de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ de 25 % à 50 %
(La perte en titre de l'hypochlorite est souvent importante)
 - . Injection par simple fût à charge variable, pour injecter de l'ordre de 10 à 20 l/h.
- 3 - Neutralisation à la chaux
 - . Saturation en fût
 - . Injection manuelle en lait de chaux à 12,5 g/l (soit 8 fois la saturation)
 - . Dose de 15 à 30 mg/l de chaux sous forme CaO à 80%.
- 4 - Postchloration à l'hypochlorite de calcium
 - . Dose de 2 à 3 mg/l
 - . Même préparation et pratique d'injection que pour la préchloration
 - . Injection directement à l'entrée de la bâche.

D. Pompage

- 1 - Prise en rivière
 - . Pompes Flygt : 2 x 80 m³/h et 2 x 120 m³/h
 - . Commande manuelle.
- 2 - Relevage de l'eau brute vers le flocculateur
 - . 3 pompes de 16 à 18 m³/h dont 2 fonctionnent en même temps en production normale.
- 3 - Refoulement vers le réseau
 - . 3 pompes de 25 m³/h dont 2 en fonctionnement
- 4 - Lavage des filtres
 - . débit de 130 m³/h, durée du lavage environ 30 minutes.

E. Réseau

- . Nombre d'abonnés : 11 (dont 90 % de consommation par la mine d'or de Poura)
- . km de conduite : 20
- . Nombre de bornes fontaines : 21
- . Réservoir de 150 m³
- . Rappel de la consommation journalière moyenne = 600 m³

4.2.2. Particularités d'exploitation

La Station de Poura date de 1985. Elle fonctionne environ 18 heures par jour en moyenne avec la présence de 2 agents en permanence sur le site. Comme nous l'avons souligné précédemment, la particularité de l'installation réside dans l'injection rudimentaire des réactifs de traitement et la nécessité d'ajuster le débit injecté avec un simple robinet à pointeau.

En général les flocculateurs fonctionnent toujours ensemble mais les deux filières parallèles peuvent être isolées complètement l'une de l'autre s'il y a lieu.

La communication entre les flocculateurs et les décanteurs statiques est réalisée par deux chambres de répartition d'environ un mètre de large sur trois mètres de long et 2,36 m de profondeur. A ce niveau, nous devons noter que l'introduction de l'eau flocculée dans la chambre de répartition se fait latéralement (Fig. 42 page 59) et qu'en ce sens, la pénétration de l'eau flocculée dans le décanteur à travers les trous d'amenée est réalisée préférentiellement à l'entrée de la chambre. On constate aussi que l'eau flocculée se répartit mal dans toute la profondeur de la chambre de répartition et par conséquent transite sans doute faiblement par les rangées de trous inférieurs.

Ces configurations conduisent de façon évidente à un court-circuit à l'intérieur de chaque décanteur statique en favorisant un cheminement préférentiel de l'eau sur une section transversale de l'ordre de 2 à 3 m². Ces observations sont aisément réalisables car une trainée d'eau flocculée plus dense apparaît de façon quasi permanente sur la première moitié de chaque décanteur.

Il est clair que ce dysfonctionnement nuit au bon rendement du décanteur même si les coefficients de sécurité pris en compte lors du dimensionnement doivent pallier ce genre de défaillance. En bref, localement, la vitesse de surverse sur cette zone d'écoulement provisoire doit se situer autour de 0,8 à 1m/h avec des temps de séjour diminués sur cette zone atteignant 1h30 à 2h00 ce qui sera confirmé lors des expérimentations avec le Moringa.

L'eau décantée est évacuée vers les filtres par une rigole à écoulement rapide. En général, la turbidité mesurée en fonctionnement normal après traitement au sulfate d'alumine se situe autour de 1 à 3 NTU. La répartition de l'eau flocculée vers les trois filtres est effectuée par trois tuyaux débouchant directement 50 cm au dessus des filtres, sans brise charge, ce qui crée ponctuellement des légers affouillements, visibles à l'oeil nu lorsque la hauteur d'eau au dessus des filtres est inférieure à 50 cm.

Comme nous l'avons remarqué, les boues colmatantes dans les filtres sont mal évacuées lors du lavage qui ne s'opère qu'à l'eau et il est nécessaire de descendre au niveau du filtre pour évacuer à la main les résidus de boues subsistant en surface (un fond de seau par filtre après lavage). Les filtres sont nettoyés une fois tous les quinze jours environ pendant une demi-heure à un débit de 130 m³/heure. Fonctionnant à charge variable sans régulation, ils ont l'avantage de pouvoir travailler longtemps sans entretien (Nous ignorons néanmoins le temps au bout duquel la crevaison est atteinte ...). La hauteur d'eau minimale de filtration lorsque le filtre vient d'être lavé est d'environ 20 à 25 cm pour un débit de 12 m³/h environ soit une vitesse de 4m/h puisque chaque filtre a une section transversale de 2,80 m².

L'eau filtrée est évacuée par un plancher à buselures vers la bache d'eau traitée. Chaque fond de filtre est en communication au niveau de la conduite collectant l'eau filtrée. Un manomètre y indique en fonctionnement normal une pression de l'ordre de 0,1 bar. L'eau filtrée débouche à gueule bée dans la bache. L'eau de chlore est injectée dans cette turbulence.

La perte de charge totale sur les filtres évolue donc de 0,2 m/m à 2 m/m en fin de cycle de filtration, ce qui, eu égard aux abaques classiques utilisées en filtration rapide, est cohérent pour un filtre propre de $d_{10} = 1$ mm. Notons que la perte de charge linéaire de 2 m/m n'est de manière courante jamais atteinte sur les filtres utilisés à charge constante (cas de Ouagadougou), au risque d'atteindre une embolie gazeuse et une crevaison brutale du filtre.

4.3. Présentation de l'essai ; Méthodologie

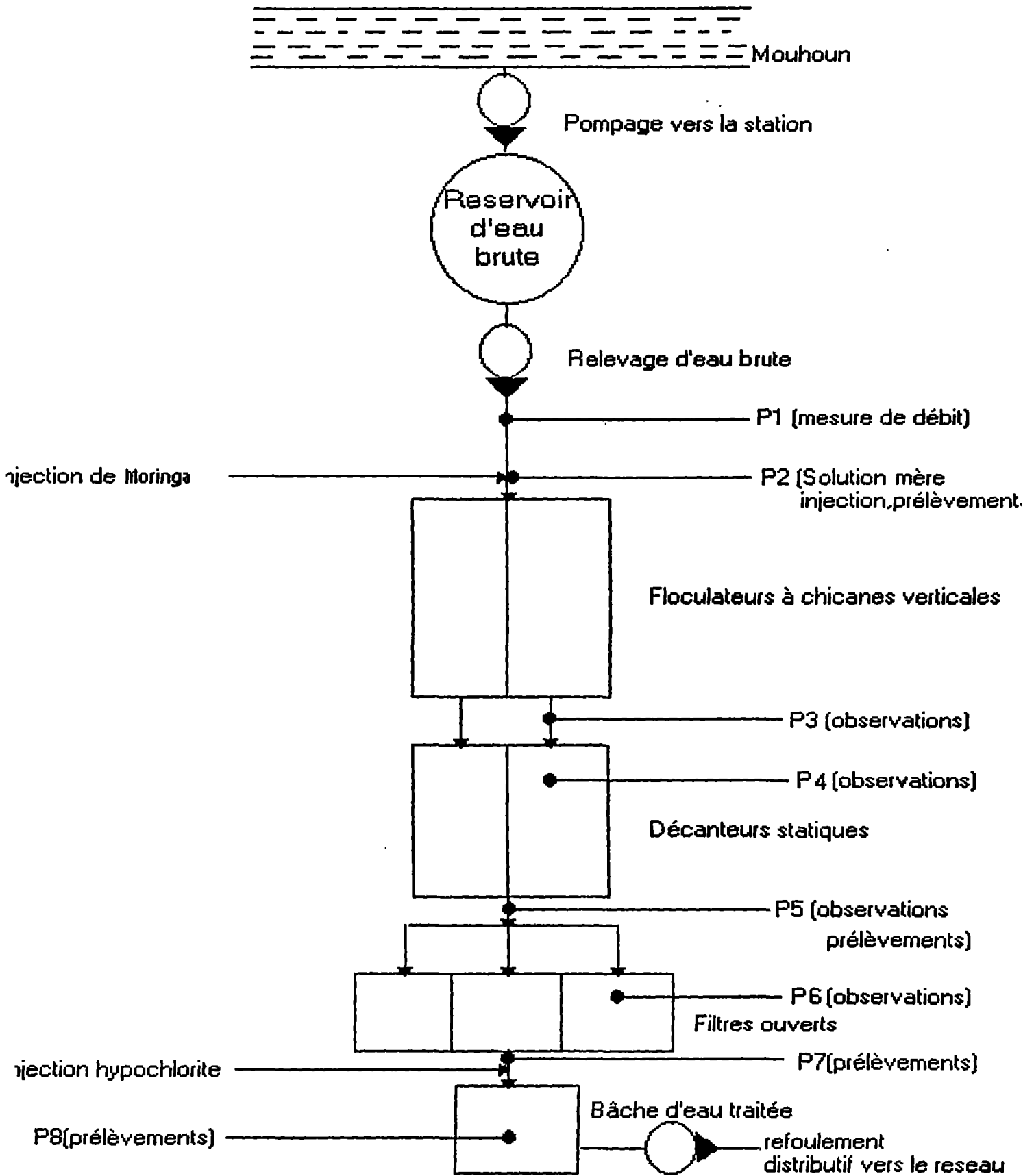
L'enjeu de l'essai en station, réalisé pour la première fois en Afrique de l'Ouest, est tel que sa préparation a dû faire l'objet de soins attentifs et d'une organisation minutieuse.

4.3.1. Définitions des différents postes d'observation, de prélèvement et de mesure (Fig. 4.2)

Poste	Fonction
P ₁ = Débitmètre sur le relevage des eaux brutes (1 personne)	- Relevés toutes les demi-heures.
P ₂ = Injection de la solution mère (1 à 2 personnes)	- contrôle du débit d'injection et de l'alimentation constante du fût à charge constante - mélange intermittent de la solution mère toutes les 3 à 5 minutes - Prélèvements d'eau brute de solution mère
P ₃ = Sortie de floculation	- observation de l'eau floculée à l'oeil nu.
P ₄ = Zone de décantation	- observation de la décantation à l'oeil nu
P ₅ = Prélèvement de l'eau décantée donc poste prioritaire (P ₃ , P ₄ , P ₅ occupés par 1 personne)	- Echantillonnage pour physicochimie continue (toutes les 15 à 30 mn) complète (toutes les heures), pour bactériologie (toutes les heures)
P ₆ = Filtres (1 personne)	- Suivi du niveau de l'eau au dessus des filtres pendant l'essai toutes les 15 minutes
P ₇ = Prélèvements de l'eau filtrée sous le matériau filtrant donc sous la dalle buselée (1 personne)	- Echantillonnage pour physicochimie continue (toutes les 30 mn), complète (toutes les h.), pour bactériologie (toutes les heures)
P ₈ = Prélèvements de l'eau filtrée chlorée dans la bache (accès par échelle) (1 personne)	- idem

fig. 4.2

SITUATION DES POSTES DE PRELEVEMENTS ET D'OBSERVATIONS EN COURS D'ESSAI



4.3.2. Moyens mis en place lors de l'essai

4.3.2.1. Un mini-laboratoire équipé de :

- 1 Jar-Test pour essai de floculation préalable au traitement par le Moringa ;
- 1 Turbidimètre de haute précision ;
- 1 spectrophotomètre pour dosage de SO_4^{2-} , NH_4^+ ;
- 1 pH mètre ;
- 1 conductimètre équipé d'une sonde de température ;
- 1 comparateur de chlore LOVIBOND avec pastille DPD ;
- 1 balance (préparation de la solution mère) ;
- 1 incubateur Millipore de terrain ;
- 1 système de filtration manuelle Millipore avec membranes stériles Schleicher et Schuell de $0,45 \mu$ de porosité ;
- la totalité du flaconnage pour conservation des échantillons pour analyse physicochimique et flaconnage stérile pour bactériologie.

associé à ce mini-laboratoire

- 1 technicien analyste pour réaliser les analyses sur chaque échantillon prélevé ;
- 1 pharmacien (ONG EAST) pour la filtration sur membrane des échantillons bactériolo et la mise en incubation, le tout dans des conditions stériles.

une équipe d'encadrement

- le responsable du traitement des eaux de l'ONEA sur le Burkina Faso ;
- le directeur régional III ;
- un ingénieur du CIEH et un ingénieur de l'EIER ;
- le chef de station.

4.3.2.2. Suivi analytique et conservation en flaconnages

4.3.2.2.1. Suivi continu

- P2 . Turbidité, pH, conductivité (1 heure)
- P5 . Idem P2 (15 minutes)
. + bactériologie CT (1 heure) + sulfates (30 mn) + ammoniac (30 mn)
- P7 . Idem que P2 (30 mn)
. + bactériologie CT (1 heure)
- P8 . Idem que P2 (15 mn)
. + bactériologie CT (1 heure) + chlore (30 mn) (libre et combiné).

4.3.2.2.2. Analyses prévues sur les échantillons conservés

- P2 . Analyse complète sur 2 échantillons
 - . Bactériologie (1 heure) avec les trois indicateurs courants. Coliformes totaux (CT), Thermotolérants (CF), Streptocoques fécaux (SF).
 - . Analyse de la concentration de la solution mère (g/l de matières) pour au moins 2 échantillons.

- P5 . Analyse complète sur 3 échantillons représentatifs de différentes phases ; début, fin, post-traitement
 - . Bactériologie (1 heure) avec CT, CF, SF.
 - . Vérification des taux de sulfates et d'ammoniac au laboratoire.

- P7 . Analyse complète sur 2 échantillons
 - . Bactériologie (toutes les 2 heures) avec CT, CF, SF.

- P8 . Analyse complète sur 3 échantillons
 - . Bactériologie (toutes les heures) avec CT, CF, SF
 - . Vérification des taux de chlore combiné et libre sans ajout préalable d'hyposulfite de sodium (suiivi de la consommation en chlore en fonction du temps).

N.B. : La veille de l'essai un essai au Jar-Test sur P2 avec lait de Moringa permettra de déterminer la dose de coagulant (Tableau 4.2).

4.3.2.2.3. Analyse complète au laboratoire

Cette analyse consistera à identifier la matrice chimique de chaque eau, certains éléments indésirables facilement analysables, et le taux de matières organiques résiduel résultant éventuellement de particules de Moringa encore en suspension de façon prépondérante.

4.4. Situation d'exploitation en station et en réseau au début de l'essai (t = 0)

- . Tous les ouvrages sont propres (boues vidangées, ...)
- . Flocculateurs vides
- . Une filière isolée (en tête de floculation)
- . Décanteur statique testé vidé de 5 m³ (nécessité pour vidanger le flocculateur) donc quasiment plein d'eau traitée préalablement au sulfate d'alumine
- . Filtres vides
- . Bâche d'eau traitée vide (celle-ci malheureusement ne sera pas totalement nettoyée et un fond boueux subsistera proche de l'exutoire)
- . Château d'eau, en réseau, plein
- . Fût de solution mère plein de lait de Moringa soit 730 litres à 22,88 g/l, et fût d'injection en charge

- . Solution mère en agitation mécanique depuis la veille à 23h30 (soit 7 heures en continu).

N.B. : La population de Poura a été prévenue la veille et l'avant veille de l'essai, par voie radiophonique (en Moré, Dioula et Français sur Radio FM POURA), d'un risque de coupure d'eau dans la journée de l'essai.

4.5. Réalisation effective de l'essai (Tableau 4.1)

- . Durée : 7h45 à 12h00 le 15 mai 1993
- . Débit de traitement pendant injection de lait de Moringa :
 - 16 m³/h de 7h45 à 10h30
 - 8 m³/h de 10h30 à 12h00
- . Débit de traitement après phase d'essai :
 - 16 m³/h par filière (2 en service) à partir de 14h15 soit un temps de décantation statique de 2 heures 30 entre la fin de l'essai et la reprise du traitement au sulfate d'alumine (il faut ajouter environ 20 minutes pour le remplissage des flocculateurs).
- . Débit d'injection de lait de Moringa retenu 180 l/heure pour une dose de 250 mg/l environ.
- . Durée du manque d'eau sur le réseau : 11h30 à 17h00. (Tableaux 4.1 et 4.2).

4.6. Résultats

Les différents résultats présentés ci-joint en annexe sont le fait de prélèvements et analyses menés sur le terrain pendant l'essai et au laboratoire le lendemain matin soit près de 18 h à 24 h après prélèvements.

Les résultats nous paraissant les plus importants à exploiter sont :

- 1a. Evolution de la turbidité en fonction du temps aux différents postes identifiés (mesures in situ). Rappelons que la modification du débit traité a eu lieu à 10h30, de 16 m³/h à 8 m³/h.
- 1b. Evolution du taux de matières en solution dans l'eau en fonction du temps à différents postes (mesures au laboratoire).
- 1c. Evolution de la qualité bactériologique de l'eau aux différents postes (incubation in situ + confirmation au laboratoire).
- 1d. Evolution de la concentration du lait de Moringa. A ce propos, nous considérons que notre attention n'a pas été suffisante. Au moins deux prélèvements supplémentaires auraient été nécessaires et confirmatifs.

- 1e Analyses complètes des eaux recueillies après essais, en différents points.

Les résultats secondaires au premier abord mais qui permettent une interprétation plus fouillée sont :

- 2a. Evolution du pH, et des sulfates qu'on considèrera d'une certaine façon comme deux traceurs.

Notons que la conductivité et la température, paramètres de routine, ont été suivies sans pouvoir apporter d'éléments particuliers à l'interprétation de l'essai puisqu'elles restent quasi constantes tout le long de l'essai.

- 2b. Evolution de la concentration en ammoniac puisque le Moringa, selon Mme JAHN, aurait des pouvoirs d'élimination de l'azote ammoniacal.

- 2c. La répartition du chlore introduit en chlore libre et en chlore combiné, malheureusement suivie un peu tardivement pendant l'essai.

L'évolution du niveau d'eau au dessus des filtres, en moindre mesure, aurait permis de constater un accroissement brutal du colmatage ce qui ne s'est pas produit.

4.7. Discussion générale préalable sur les phénomènes observés dans la zone de décantation

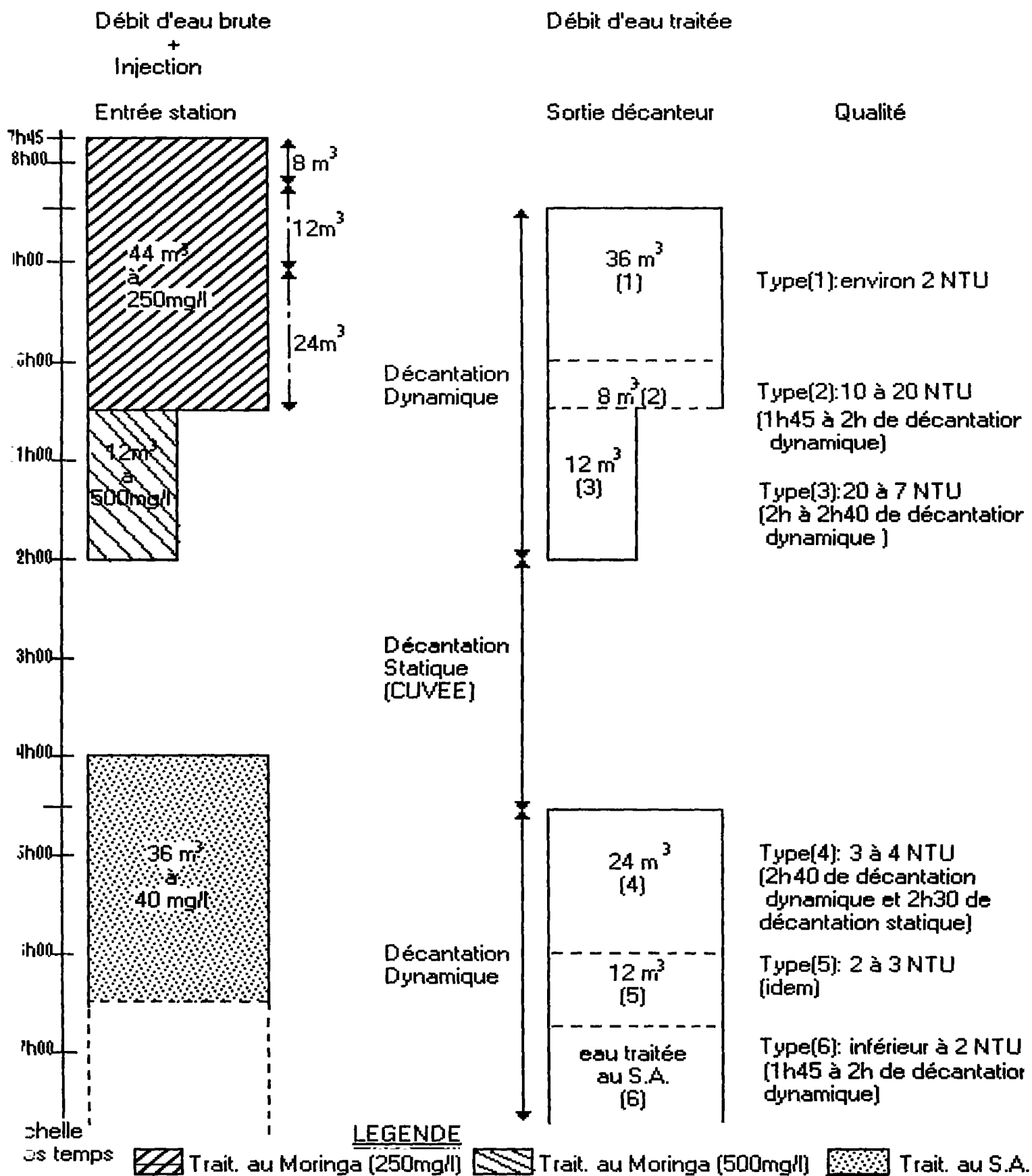
Au regard des résultats obtenus et des observations effectuées sur le terrain, la dynamique des phénomènes qui se sont déroulés dans le décanteur (voir Fig. 4.3) est à décrire minutieusement pour mieux comprendre l'interprétation des résultats en second lieu.

Le flocculateur s'est rempli dans les vingt premières minutes avant d'alimenter en eau flocculée le décanteur statique. Ce dernier n'a déversé qu'au bout d'une demi-heure environ.

Les premières eaux se déversant en sortie du décanteur sont donc en tout premier temps les eaux traitées par le sulfate d'alumine dans la nuit du 14 au 15 (ce traitement a été interrompu vers minuit). L'intérêt du suivi de la qualité de l'eau décantée est justement de mettre en évidence la qualité des premières eaux réellement traitées par le Moringa. Comme nous l'avons dit, le cheminement préférentiel dans l'ouvrage est visible à l'oeil nu sur la partie gauche du décanteur en regardant vers le déversoir de sortie, et ne fera que compliquer l'interprétation des résultats et la rendre plus hypothétique.

fig. 4.3

DIAGRAMMES EXPLICATIFS SIMPLIFIES DE LA DYNAMIQUE DE TRAITEMENT



Nous schématiserons l'écoulement global dans le décanteur par la figure 4.4.

Globalement, l'écoulement préférentiel a tendance à se produire latéralement mais aussi superficiellement puisque l'entrée d'eau flocculée n'est située que sur les quarante premières entrées d'eau dans la chambre de répartition. Le court circuitage est donc double en un certain sens aussi bien dans un plan horizontal que vertical. Au delà d'une certaine distance difficile à évaluer (autour de 3 à 4 mètres), les lignes de courant se modifient probablement le long du décanteur sans toutefois devenir totalement homogènes et parallèles. La preuve en est que l'eau est toujours beaucoup plus claire dans la zone droite du décanteur que dans la zone gauche, et ceci même à l'approche du déversoir.

En première approximation, si l'on considère que les premières eaux traitées par le Moringa sortent vers 10h00 (cf. Fig. 4.3), soit près de 1h30 après les premiers déversements, on calcule aisément que le volume moyen "traversé" dans le décanteur par les eaux traitées par le Moringa est de l'ordre de 24 m³, pour une contenance globale de 70 m³, et un volume théoriquement concerné par l'écoulement de 48 m³ environ. Le court circuit s'opère donc sur une bonne moitié du décanteur, superficiellement comme en profondeur, même s'il n'est sans doute que partiel (zones à faible écoulement).

Lorsque les eaux décantées se sont avérées très turbides en sortie (à partir de 10h10), notre démarche fut simple : il fallait augmenter le temps de séjour de l'eau dans le décanteur ; avec un débit de 16 m³/h, le temps de séjour de une heure trente était bien trop court pour espérer un abattement convenable des floccs de Moringa en suspension.

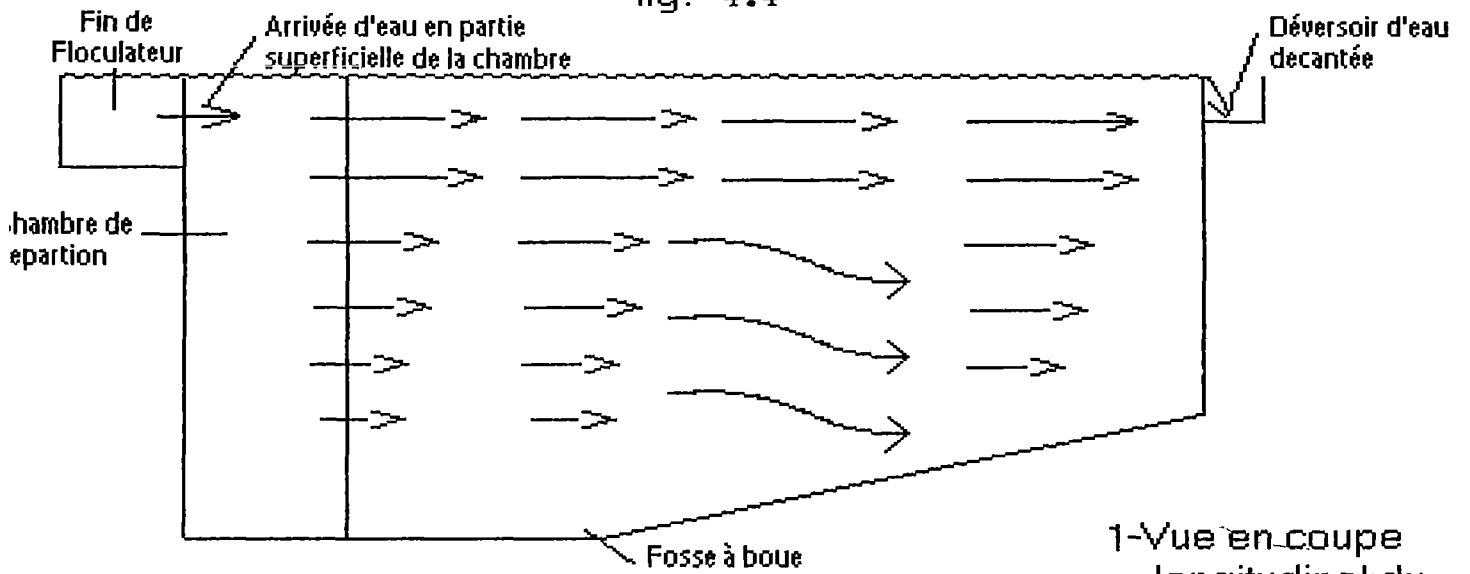
Les diagrammes simplifiés ci-joints (Fig. 4.3) sont censés représenter très schématiquement la dynamique globale du traitement, en intégrant les débits d'eau traitée, les débits d'eau décantée et leur qualité, et en faisant apparaître enfin les temps supposés de décantation dynamique d'une part (en écoulement), et statique d'autre part (sans écoulement), dans chaque cas.

Par exemple, il est clair que l'eau flocculée de 7h45 à 8h15 commence à sortir du décanteur de 10h à 10h30. Il faut soustraire à cela le temps de flocculation de l'ordre de 20 minutes pour déduire le temps de décantation dynamique réelle.

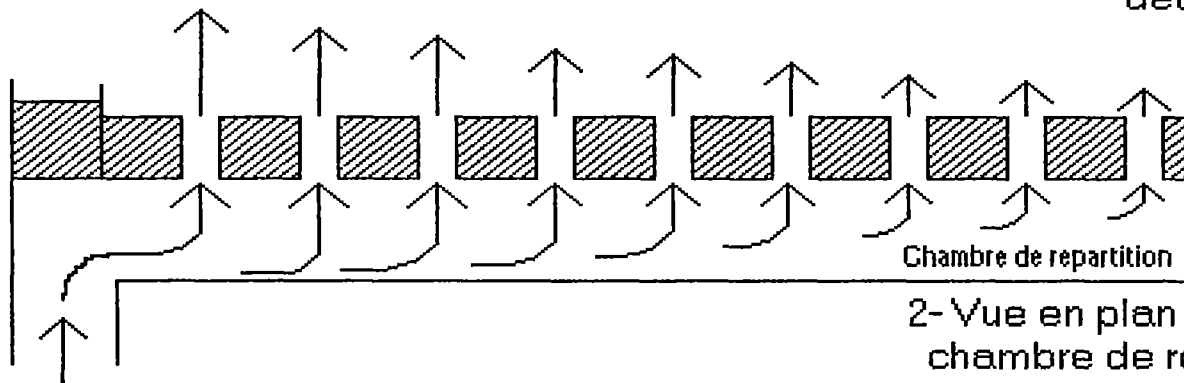
L'eau flocculée de 8h15 à 9h (soit 12 m³) est évacuée du décanteur entre 10h30 et 12h00. Le temps de décantation s'accroît donc, ce qui est le but visé puisque nous voulions, en diminuant le débit, obtenir un temps de séjour plus long et, par conséquent, une meilleure qualité de traitement.

RESENTATION SIMPLIFIEE DES ECOULEMENTS DANS LE DECANTEUR

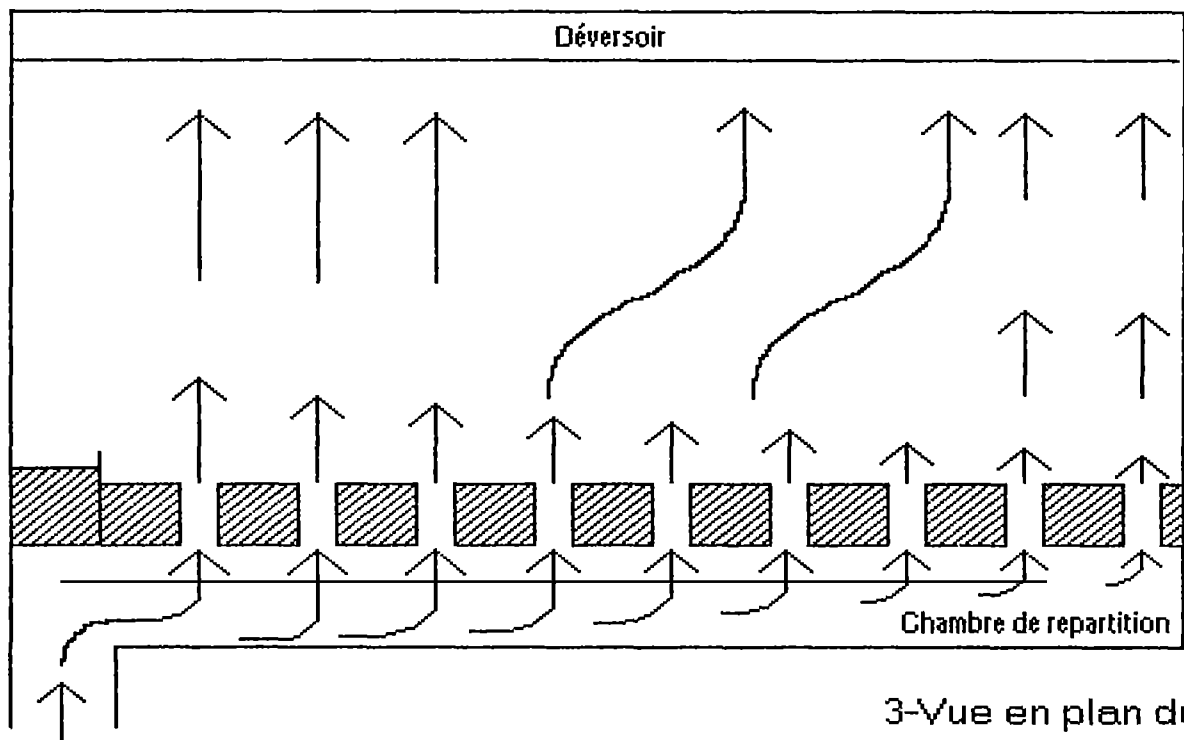
fig. 4.4



1-Vue en coupe longitudinale du decanteur



2-Vue en plan de la chambre de repartition



3-Vue en plan du decanteur

L'eau flocculée de 9h15 à 12h00 sera restituée dans l'après-midi avec un complément de décantation statique de 2h30 (type "cuvée" dans le jargon du traiteur d'eau).

Vers 16h45, l'eau flocculée au sulfate d'alumine à partir de 14h15 commence à se déverser en sortie du décanteur.

Bien sûr, ce schéma dynamique est simplifié puisque l'écoulement dans le système n'est probablement pas un écoulement totalement piston. Des phénomènes de dispersion des particules en suspension font que les limites indiquées sur le diagramme notamment pour la restitution des débits d'eau traités sont arbitraires (voir chapitre V approche théorique). L'avantage de cette représentation est cependant de disposer d'un schéma simplifié pour l'interprétation des résultats.

En réduisant le débit à 8 m³/h environ, le temps de séjour précédent se trouvait doubler à 3h tout en restant dans des normes convenables pour le dimensionnement d'un décanteur statique fonctionnant correctement (ce qui n'est pas vraiment le cas pour celui-ci malheureusement).

La répercussion sur la qualité de l'eau décantée a été lente mais constante vers l'amélioration, et l'on peut finalement considérer que la qualité de l'eau obtenue 1h et demi plus tard (soit vers 11h45) correspondrait à peu près à la qualité d'une eau effectivement décantée dans l'ouvrage pendant près de 3h.

4.8. Interprétation des résultats

4.8.1. Evolution de la turbidité et des matières sèches totales le long de la filière

4.8.1.1. Après décantation

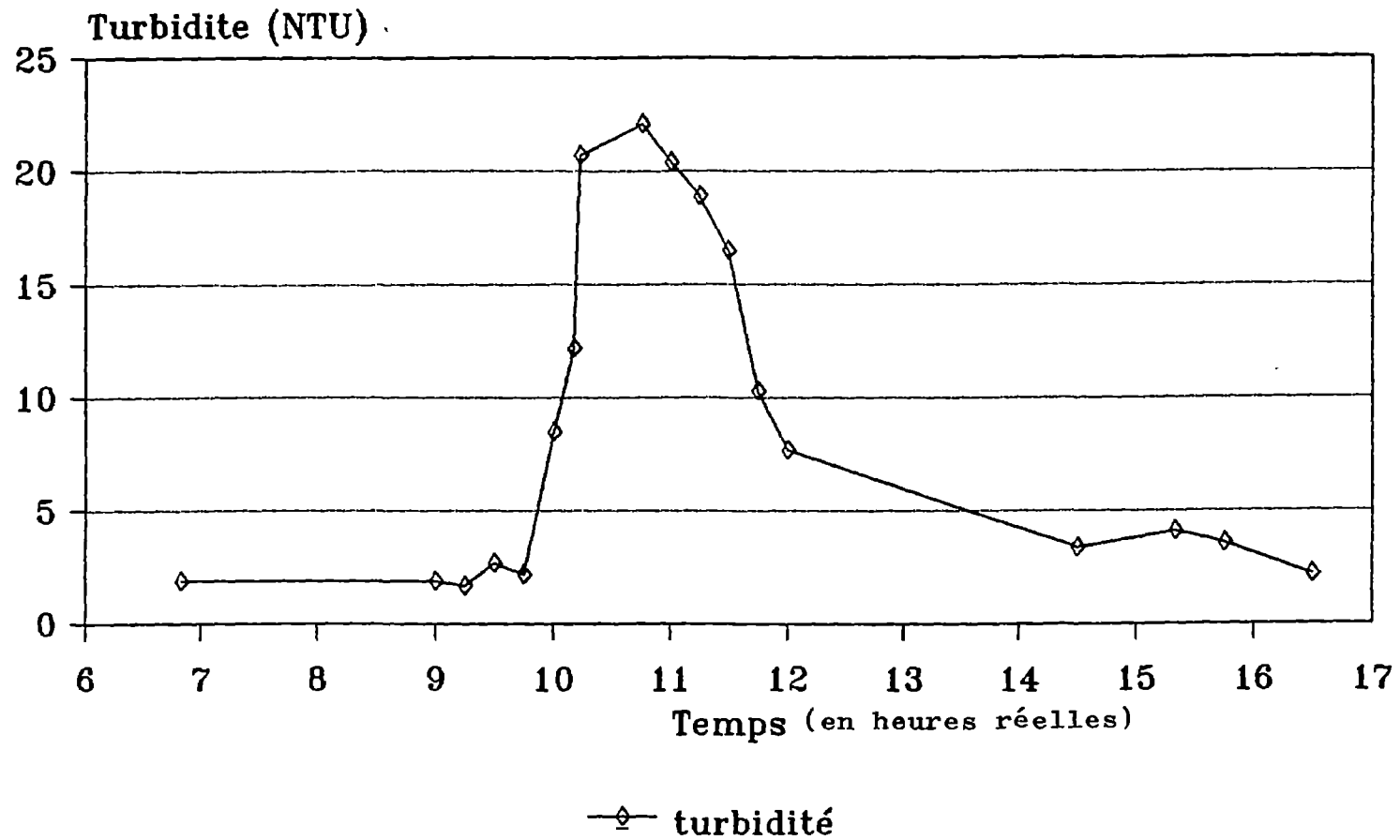
La qualité de l'eau brute à l'entrée est relativement constante. Sa turbidité est le fait aussi bien de matières minérales qu'organiques à la hauteur de 20 à 30 mg/l de matières colloïdales organiques et de 60 à 70 mg/l de matières minérales en soustrayant le résidu sec à 105°C constitué des ions en solutions.

Il apparaît nettement que l'eau traitée par le Moringa sort du décanteur après 1h45 à 2h00 de décantation dynamique et que ce temps de séjour ne suffit pas à abattre correctement les matières en suspension de Moringa qui sont à l'origine de la clarification de l'eau.

Une turbidité de l'ordre de 20 NTU à la sortie d'un décanteur n'est pas du tout acceptable pour le traiteur d'eau.

Evolution de la turbidité de l'eau
decantee en fonction du temps (poste P5)

fig. 4.5



Notons cependant qu'il ne faut pas comparer directement la turbidité de l'eau brute résultante de matières colloïdales non visibles à l'oeil ou sous un faisceau incident et la turbidité de l'eau traitée par le Moringa et partiellement décantée, résultat des particules de Moringa visibles en suspension qui n'ont pas sédimenté. Dans le premier cas, il s'agit d'une turbidité "colloïdale" et dans le second, d'une turbidité "particulaire".

Lorsque le temps de séjour s'accroît (puisque le débit de traitement est diminué de moitié), la turbidité s'abaisse notablement pour atteindre de l'ordre de 7 NTU après 2h40 environ de décantation dynamique.

La décantation statique de 2h30mn améliore encore partiellement la qualité de l'eau sans atteindre toutefois une turbidité inférieure à 2 NTU comparable à celle obtenue lorsqu'on traite au sulfate d'alumine.

En conclusion, pour l'eau brute de Poura, 2h de décantation dynamique ne suffisent pas pour obtenir une qualité satisfaisante d'eau décantée après traitement au Moringa.

Il est nécessaire d'atteindre au moins 3 à 4h de décantation pour obtenir une turbidité correcte de l'ordre de 5 NTU ou inférieure en sortie de décanteur. Il semble cependant difficile de faire aussi bien que le sulfate d'alumine même avec un temps de décantation important.

4.8.1.2. Après filtration

Les résultats (Tableau 4.5) montrent que la filtration réalise une bonne performance sur l'abattement des matières des eaux mal décantées entre 10h10 et midi puisque, aussi bien en P7 (sous le filtre) qu'en P8 (dans la bache), la turbidité tourne autour de 5 NTU et est même inférieure en P8 (phénomène de dilution avec les eaux traitées de 8h30 à 10h).

En clair les filtres diminuent la turbidité de 15 à 20 NTU à 5 à 6 NTU. Rappelons que la norme de turbidité fixée par l'OMS sur les eaux de consommation est de 5 NTU et de 1 NTU si possible en cas de désinfection. L'objectif qualité n'est donc pas atteint, loin de là, lors de ce traitement par le Moringa. Généralement, la turbidité atteinte avec le sulfate d'alumine après filtration, tourne autour de 1 NTU, voire moins.

La qualité de l'eau filtrée en P7 et P8 dans l'après-midi n'a pas été suivie car l'ONEA a décidé de ne pas distribuer l'eau produite avec le Moringa ; par conséquent la bache d'eau traitée a été en vidange permanente.

- Le coagulant Moringa a un effet désinfectant limité puisqu'en P5 au moment où les suspensions de Moringa étaient très présentes (vers 10h15 à 10h55), aussi bien qu'en P5 dans l'après-midi, après pourtant un temps de décantation beaucoup plus important, la quantité de coliformes et de streptocoques reste abondante même si elle est moindre qu'en P2. Même après une décantation qui paraît presque satisfaisante (vers 16h30 puisque la turbidité atteint 2,2 NTU), la qualité bactériologique est mauvaise et est à peine améliorée par rapport à l'eau brute.

Par conséquent, l'effet d'abattement des germes est plausible même s'il est limité mais on ne peut distinguer l'effet lié à la décantation et l'effet lié à la présence de molécules mises en solution à principe actif désinfectant.

- La filtration améliore quelque peu la qualité bactériologique de l'eau puisque la présence des bactéries témoins est moindre en P7 après filtration qu'en P5 avant filtration. Ce phénomène est probablement lié à la rétention particulaire dans les filtres.
- La chloration en sortie sur la bache d'eau traitée détruit la totalité des germes encore que certains germes banaux sont mis en évidence à 11h05 et 12h00 après incubation immédiate, ce qui est tout de même étonnant aux doses de chlore de quelques unités de mg/l (3 mg/l à 11h00 et 0,6 à 12h00 en chlore libre).

Une hypothèse est envisageable : les particules en suspension qui subsistent dans l'eau constituent peut-être une protection pour les germes piégés sur la matière solide, d'autant que le temps de contact n'est que de l'ordre de 1 à 2 h (ce qui est tout de même suffisant en principe).

Au laboratoire, ces germes ne sont plus identifiés dans le même flacon ce qui tend à penser que le chlore a eu le temps d'agir du fait d'un accroissement du temps de contact (plus de 18 heures).

Remarquons qu'en P5 à 16h30, les témoins de contamination sont encore très présents ce qui sous-entend que l'eau brute coagulée au sulfate d'alumine et chlorée (préchloration) n'a pas encore atteint la sortie du décanteur et le déversoir, ou que le chlore a réagi avec des matières réductrices (suspensions de Moringa ?). Comme nous l'avons signifié sur notre diagramme simplifié en figure 4.3, il s'agirait encore de l'eau traitée par le Moringa vers 11 heures qui se déverserait à turbidité convenable.

4.8.1.3. Evolution des matières sèches totales pendant le traitement

L'eau brute est caractérisée par un résidu sec filtré calculé à 105°C de 120 à 130 mg/l ; on peut aisément effectuer ce calcul à partir de l'analyse complète (tableau 4.12). Les quantités de matières organiques et de matières minérales colloïdales ou en suspension sont de l'ordre de 20 à 30 mg/l et de 60 à 70 mg/l respectivement. Il suffit pour le calcul de soustraire les résultats obtenus (tableau 4.9) dans le tableau du résidu sec filtré calculé.

La qualité de l'eau brute en P2 varie suivant le niveau de pompage dans la bache d'eau brute qui constitue un décanteur naturel. En P5, on constate essentiellement que l'accroissement de turbidité à partir de 10h00 et 10h10 est dû à une brutale augmentation du taux de matières organiques, ce qui confirme nos explications sur la turbidité résiduelle de l'eau en P5 due à la présence de suspensions de Moringa non décantées. De 10h13 à 15h45, ce taux de matières organiques diminue puisque le temps de décantation se trouve augmenté (débit de production diminué de moitié et décantation statique de 12h à 14h).

Après la filtration, on observe que la quantité de matière organique abattue est significative puisqu'on atteint des valeurs comprises entre 3 et 5 mg/l (tableau 4.9).

Notons cependant quelques valeurs étonnantes sur ce tableau :

- Le résidu minéral total en P5 à 8h40, 15h45, 16h30 ne doit pas être inférieur à 120 mg/l, résidu sec filtré minimal à 105°C calculé à partir de l'analyse complète. Or, on constate des valeurs de 91, 110 et 102 mg/l, ce qui tendrait à penser que la composition ionique de l'eau a un peu évolué lorsque l'eau est d'une faible turbidité.
- La précision des analyses de résidu d'une part et physicochimique complète d'autre part peut être mise en cause. En d'autres termes, l'évolution des résultats en P5 indique une tendance mais une interprétation quantitative est sans doute peu sûre.
- En P8, à 8h40 et 10h00, le résidu minéral total supérieur à 200 mg/l est lié à la présence de matières décantées dans la bache, remises en suspension lors de la mise en eau pendant la phase d'essai.

4.8.2. Evolution de la qualité bactériologique de l'eau

A l'examen des tableaux 4.11 et 4.12 trois points saillants apparaissent :

Notons enfin que le décanteur testé est contaminé à 6h50 ainsi que le décanteur parallèle à 16h30 (prélèvement dans le bassin et en sortie respectivement) ce qui montre que la préchloration n'a qu'un effet limité sur la désinfection de l'eau brute (consommation probable du chlore par des matières réductrices ?).

4.8.3. Evolution de la concentration du lait de Moringa (solution mère en fût)

Ces résultats (tableau 4.3) sont très préoccupants car ils montrent sans ambiguïté que la concentration de la solution mère n'est pas homogène du tout. Les agitations périodiques (à l'agitateur mécanique) toutes les trois à cinq minutes n'ont pas suffi à rendre "la soupe" de coagulant de qualité constante. Notons à ce propos que l'interruption de l'agitation était nécessaire de façon passagère de façon à pouvoir transvaser le lait depuis le fût de 1000 l vers le fût à charge constante de 100 l. Dans le cas contraire, l'effet d'agitation dans le fût de 1000 l contrarie tout écoulement du liquide vers l'extérieur (observations réalisées sur place).

Quoiqu'il en soit, la variation de la concentration de la solution mère sur la base des résultats présentés en tableau 4.3, implique que la concentration en poudre de Moringa dans l'eau brute varie après injection de 200 à 300 mg/l environ, au lieu d'être constante à 250 mg/l comme nous le désirions (injection à 180 l/heure par une concentration de 22,88 g/l).

4.8.4. Evolution de la qualité physicochimique des eaux traitées par le Moringa le long de la filière de traitement : cas de l'ammonium, des sulfates et du pH en particulier

Comme nous l'avons mis en évidence au laboratoire, une coagulation par le Moringa ne modifie guère la qualité chimique de l'eau brute. Les concentrations en calcium, magnésium et potassium ne changent pas de façon significative de P2 à P5 (tableau 4.12).

Les concentrations en fer et en ammoniac diminuent conséquemment pour être même quasiment nulle en fer pour toutes les eaux récoltées en P5.

. L'élimination du fer est liée soit à son oxydation et à sa précipitation sous forme d'oxyde de fer, soit à son adsorption au niveau des suspensions de Moringa qui ne permet plus de le mettre en évidence.

. L'abattement de l'azote ammoniacal (tableau 4.8) est de l'ordre de 50% à 60%. Rien ne dit cependant que ce phénomène n'est pas dû à une oxydation de l'azote réduit. L'effet direct du Moringa, comme le soulignait Mme JAHN, n'est pas certain. Constatons que lors du traitement au sulfate d'alumine, la

concentration en ammonium chutait à 0,2 mg/l mais rappelons à ce sujet que la préchloration, menée parallèlement, conduit forcément à une oxydation chimique partielle de l'élément.

. Les bicarbonates diminuent un peu en concentration ; l'équilibre carbonique est donc légèrement modifié. La teneur en chlorures est à peu près constante.

. Les sulfates apportés par le sulfate d'alumine hydraté, absents initialement dans l'eau brute (à ce niveau notons que les eaux superficielles du Burkina Faso sont souvent exemptes de sulfates), sont bien mis en évidence dans l'eau décantée avant l'essai dans le tableau 4.8 (dose située autour de 19 mg/l).

Cette concentration chute lentement jusqu'à 15 mg/l pour se stabiliser à cette valeur ce qui est étonnant. A priori, on pourrait penser que l'eau brute traitée par le Moringa devrait être exempte de sulfates.

Il y a donc lieu de vérifier si le lait de Moringa est une source d'apport en sulfates (essais non réalisés).

Un argument qui peut aussi être avancé est un phénomène de dilution avec les eaux présentes initialement dans les décanteurs et traitées antérieurement par le sulfate d'alumine. Cette hypothèse prendrait en défaut la schématisation avancée en figure 4.3 à partir d'un écoulement piston.

A partir de 15h40 jusqu'à 16h30, le taux de sulfate augmente jusqu'à 28 mg/l. Considérant un traitement de 45 à 55 mg/l au sulfate d'alumine hydraté (S.A.H), la concentration en sulfate devrait tourner autour de 25 mg/l ce qui est cohérent. Vers 16h30, l'eau traitée au sulfate d'alumine a donc quasiment "chassé" l'eau traitée par le Moringa dans la matinée. Cette constatation est appuyée par la mesure de pH qui chute dans le même temps à 6,9 et 6,8 à 15h45 et 16h30 respectivement (tableau 4.6). Le sulfate d'aluminium a en effet la propriété d'acidifier l'eau puisque l'ion aluminium trivalent est acide.

Ceci montre que l'eau traitée au S.A.H. à partir de 14h, qui a atteint le décanteur vers 14h20, sort du décanteur au plus vers 15h40, soit après 1h20. On peut penser que ce décalage d'une dizaine de minutes par rapport aux observations réalisées dans la matinée, peut être dû à une répartition du débit de 32 m³/h pas tout à fait uniforme à l'entrée des floculations parallèles. Nous n'avons pas de moyens précis pour confirmer cet argument.

4.8.5. Evolution du chlore résiduel de l'eau de la bache de traitement

Le chlore libre a été contrôlé sur l'eau de la bache (tableau 4.10). La chloration a débuté à partir de 9h05 avec une injection telle que le taux de chlore se trouve ajusté à 3 à 4 mg/l (la précision est à 20% sur un comparateur pour ces fortes

concentrations). Entre 10h50 et 11h, la chloration a été interrompue étant donné le résiduel beaucoup trop fort obtenu. Un effet de dilution est donc à l'origine de la chute du taux de chlore à partir de 11 heures.

Il est néanmoins intéressant de constater sur le terrain la formation d'une part non négligeable de chlore combiné qui s'accroît dans l'après-midi après un temps de contact plus long.

Au laboratoire, après 18h à 24h, on met en évidence à 10h près de 1 mg/l de chlore combiné pour 3 mg/l de chlore libre contre 4 mg/l la veille en chlore libre. De 11h à 14h30, le taux de chlore combiné est même prépondérant par rapport au chlore libre qui a considérablement diminué par rapport aux mesures réalisées 18h avant au moins.

Deux conclusions se dégagent de ces observations :

- Le chlore réagit avec de la matière organique encore présente en sortie de filtre. Les particules de Moringa encore en suspension dans l'eau filtrée sont sans doute à l'origine de la matière organique présente. Il en résulte du chlore combiné.
- Une certaine quantité de chlore a disparu, en réagissant et en détruisant partiellement les matières organiques.

Ce résultat auquel on pouvait s'attendre n'est pas favorable au Moringa. On sait en effet que le chlore combiné à un pouvoir désinfectant moindre que le chlore libre. La filtration devra donc éliminer toutes les suspensions de Moringa. Dans le cas contraire, le temps de contact classiquement estimé à 1h dans la bache d'eau traitée risque de ne pas suffire (puisque le pouvoir désinfectant diminue).

Notons enfin que le chlore combiné est plus facilement détectable au goût et l'eau goûtée à 11h50 et 12h00 par nos soins dégage en effet un fort goût de chlore.

4.8.6. Qualités organoleptiques de l'eau traitée non chlorée et chlorée

Des tests gustatifs ont été effectués par les expérimentateurs et les agents de l'ONEA aussi bien sur l'eau filtrée (recrachée puisque non désinfectée) et sur l'eau chlorée.

Suivant la sensibilité du goûteur, 2 personnes sur 3 constataient une absence de goût, pour une qui distinguait un très léger goût amer, mais sans sensation désagréable cependant. L'eau chlorée, traitée à des taux conséquents et comportant du chlore combiné a significativement un goût de chlore.

Notons sur ces tests gustatifs que la solution mère de Moringa a subi ce même traitement. Trois "arômes" se dégagent successivement, le premier très court difficilement identifiable sans qu'il soit désagréable, est vite suivi d'une sensation d'amertume prolongée une dizaine de secondes pour enfin laisser transparaître un goût sucré.

Globalement, une eau flocculée par le Moringa n'est cependant pas repoussante ni au niveau du goût, ni au niveau de l'odeur (inodore).

4.8.7. Observations réalisées dans la semaine suivant l'essai

. Aucune remontée de boues ou de matières solides n'a été constatée par l'exploitant dans la semaine qui a suivi l'essai.

On pouvait le craindre après des réactions biologiques de fermentation.

. La solution mère conservée à l'air libre pendant 5 jours dans la cuve d'origine a dégagé une odeur un peu plus désagréable (odeur de matières fermentées) au bout du cinquième jour (température située entre 35° et 40°C). Cette odeur est restée stable, même si assez inconvenante, pendant quatre jours juste au dessus du fût de 1000 l.

4.9. Principales conclusions et recommandations

Nous ne nous étendrons pas ici en commentaires, mais présenterons plus particulièrement un tableau récapitulant les faits majeurs développés ci-dessus.

TRAITEMENT DE L'EAU PAR LE MORINGA
AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Inconvénients	Avantages
<p>A. <u>Aspects généraux</u></p> <ul style="list-style-type: none"> . Difficulté de préparation de la solution mère à partir de la poudre brute : délayage nécessaire. . Difficulté d'obtenir une solution mère homogène en masse de suspensions de Moringa dans l'eau. . Décantation dynamique difficile et incomplète due probablement à une faible densité des suspensions de Moringa : chute lente des particules. . Formation de chlore combiné au cas où la filtration n'est pas totalement efficace. . Après filtration, sur la station de Poura, turbidité de l'eau filtrée non satisfaisante pour effectuer une désinfection (considérant la norme OMS). <p>B. <u>Comparaison avec les flocculants chimiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> . Dose beaucoup plus importante à introduire par rapport aux flocculants chimiques (4 à 5 fois dans notre cas en station). . A priori pas de réaction de polymérisation entre particules, donc absence des "phénomènes de pontage" habituels pour les flocculants chimiques. . Floccs de faible taille et fragiles. . Difficulté du conditionnement : stockage en particulier. 	<ul style="list-style-type: none"> . Transformation de la turbidité colloïdale en turbidité particulaire avec une cinétique rapide (visible à l'oeil nu). . Ne modifie pas la qualité physicochimique de l'eau, ni son pH en particulier. A priori, ne modifie donc pas l'équilibre de l'eau (ajout de chaux pas forcément nécessaire en période d'hivernage: à confirmer néanmoins). . La filtration retient assez bien les suspensions de Moringa non décantées. Une filtration lente en particulier s'avérerait sans doute très efficace. . Pas d'incompatibilité avec l'eau traitée au sulfate d'alumine et avec les boues d'alumine. . Boues sans doute beaucoup plus biodégradables que les boues d'alumine, et surtout exemptes d'aluminium. . Possibilité de traitement en cuvée, (après décantation statique) mais technique peu avantageuse pour le traiteur d'eau.

V. CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DES PHENOMENES DE CLARIFICATION PAR LE MORINGA : THEORIES ET REALITES

5.1. Observations générales sur le pouvoir flocculant du Moringa et sur ses caractéristiques en décantation

L'expérimentateur dispose pour juger du pouvoir flocculant et de la décantation du Moringa d'un certain nombre d'outils analytiques ; c'est jusqu'à présent ce qui nous a permis de déduire un bon nombre de conclusions pratiques.

Néanmoins, une description précise de ce que l'expérimentateur "voit" n'est pas à négliger et se révèle parfois difficilement remplaçable.

Comment évolue le lait de Moringa injecté dans une eau brute ? Utilisons un de nos meilleurs outils, l'oeil, pour l'apprécier.

Le lait de Moringa, à l'origine, est constitué de poudre en suspension dans l'eau, particules de taille variable, a priori loin d'être sphériques mais plutôt "effilochées", abrasées qu'elles ont été lors du broyage par CYCLOTEC. Si on laisse décanter quelques dizaines de minutes le lait de Moringa, on constate que d'une part le surnageant reste très trouble, constitué de très fines particules en suspension, et d'autre part un dépôt de couleur presque crème apparaît rapidement. Il y a donc bien des particules facilement décantables et d'autres beaucoup plus difficilement. Le tout baigne dans une couleur blanchâtre sans doute due à des matières organiques dissoutes.

Injectée dans une eau brute, le devenir de chaque particule, essentiellement organique, sera fonction de sa taille plus particulièrement et de sa forme.

Après agitation rapide d'une eau brute traitée par le Moringa, on remarque que déjà une certaine clarification s'effectue dans le milieu interstitiel entre les particules de Moringa en suspension. En bref, les particules semblent faire le clair autour d'elles, et cette clarification s'accroîtra avec l'agitation lente traduite le plus souvent en terme de flocculation par les traités d'eau.

La flocculation est réelle : des flocs de taille 0,1 à 0,3 mm apparaissent et n'augmentent plus guère en volume. Nous noterons qu'ils se brisent facilement sous agitation rapide. Néanmoins, de fines particules non agglomérées au floc persistent dans le milieu et seront sans doute responsables de la turbidité résiduelle après quelques heures de décantation.

Notons que les substances blanchâtres (dissoutes ?) n'apparaissent plus et nous ignorons leur devenir.

Lors de la décantation, les floccs formés ou les particules de Moringa sédimentent à leur allure et, sans paraître s'agglutiner même lorsqu'elles se rencontrent, poursuivent leur chemin vers le fond du becher suivant une trajectoire pas toujours franchement verticale. Il fallait s'y attendre : les particules, fragments organiques de Moringa, tombent plus ou moins en feuilles mortes dans l'eau.

Il apparaît même parfois qu'une turbulence localisée, due par exemple à une convection thermique (sur le banc de Jar-Test, sous éclairage par exemple), conduit à voir remonter les fines particules et même les floccs présents dans l'eau. Leur sensibilité à toute perturbation physique est donc importante.

Graduellement, après une vingtaine de minutes, lorsque l'eau traitée a reçu sa dose optimale de Moringa, le premier centimètre sous la surface de l'eau est extrêmement clair. La majorité des suspensions ont alors quasiment décanté même s'il reste encore quelques fibres infiniment petites qui semblent encore en équilibre : il y a donc bien une turbidité résiduelle en dessous de laquelle il sera bien difficile d'aller.

En prolongeant la décantation, ces observations se confirment et au bout de deux à trois heures, le résultat sur un becher contenant une hauteur d'eau d'une vingtaine de centimètres est concluant.

Cependant, il est des cas où la clarification ne s'opère pas. Analytiquement, on a constaté que pour une eau d'une turbidité trop forte (> 100 NTU), la clarification s'avérait parfois impossible même pour des doses abondantes de Moringa : la turbidité diminue mais le trouble interparticulaire subsiste.

Le pouvoir de chaque particule de Moringa "à faire le clair" autour d'elle est donc limité. Quel est le facteur limitant pour des conditions d'agitation égales ? Si on suppose que la turbidité due aux matières colloïdales minérales ou organiques et à leur concentration a tendance à diminuer quand ces matières se trouvent adsorbées et concentrées autour d'un pôle attractif présent dans l'eau, une ébauche d'explication se dégage simplement : une particule de Moringa aurait un pouvoir d'adsorption donné sur sa surface extérieure en contact avec l'eau et ce pouvoir serait limité. Cette hypothèse est confirmée par le fait qu'une faible concentration particulaire de Moringa ne parviendra pas à clarifier une eau. Si on accroît la concentration particulaire (en mg/l), on accroît le pouvoir d'adsorption totale du "système" particulaire, et donc pour une dose donnée, la clarification est franchement significative (cas de l'eau brute de Poura en station où l'on passe de 10 NTU à 5 NTU pour 30 mg/l supplémentaire de Moringa (voir tableau 4.2).

Chaque particule entourée de son cortège de molécules fixées sur son pourtour chute donc en entraînant avec elle les matières colloïdales et la clarification s'opère.

Après une journée, si l'élimination des matières colloïdales est optimale, il ne subsiste plus qu'une turbidité résiduelle faible de l'ordre de 1 à 2 NTU due aux particules de Moringa très fines non décantables.

La boue observée en fond de béccher a une bonne homogénéité. La capacité des particules à se fondre dans une masse boueuse, fluide, mais formant corps est certaine. A ce niveau, une certaine agglutination apparaît qu'on met en évidence simplement en agitant le milieu : la boue se déplace "en paquets". Remarquons cependant que cette cohésion est moins bonne si la turbidité éliminée dans l'eau brute est importante.

Cette boue est tout de même fluide et coule si on l'épanche. L'ensemble ne s'est pas solidifié, heureusement.

En conclusion, les phénomènes se décomposent en :

- une cinétique "d'adsorption" assez rapide (moins du quart d'heure) ;
- une cinétique de décantation diffuse et libre avec peu d'agglomération pendant la chute, très lente (de l'ordre de 2 à 3 heures) ;
- un état boueux cohérent, compact laissant supposer une bonne adhérence entre chaque particule décantée au bout d'un temps à définir.

Nous allons tenter d'utiliser des outils classiques pour expliquer les deux premiers phénomènes, quitte dans un second temps à les confirmer par des expériences plus précises (chapitre VI).

5.2. Essais de modélisation des phénomènes

5.2.1. Cinétique d'adsorption

Le modèle le plus simple d'adsorption est le suivant : on admet que les sites d'adsorption S à la surface du corps solide adsorbant sont occupés par les espèces adsorbées de la solution A , adsorbant, suivant une stoechiométrie de un pour un, ce qui revient à écrire :



les concentrations en S et SA sont exprimables en moles par unité de surface ;

S'il y a S_T nombre maximum de sites d'adsorption par cm^2 d'adsorbant assimilables à des moles par cm^2 , et S' mole/ cm^2 de sites occupés par l'adsorbant, il reste $S_T - S'$ mole/ cm^2 inoccupés par l'adsorbant.

S' représente donc la quantité [SA] et $S_T - S'$ représente la quantité S (sites inoccupés) et S_T vaut donc [S] + [SA]

En appliquant la loi d'action de masse à l'équilibre (1), on obtient :

$$K_a = \frac{[SA]}{[S][A]} = \frac{[SA]}{(S_T - [SA])[A]} \quad \text{où [] expriment les concentrations à l'équilibre.}$$

ce qui en développant donne $[SA] = S_T \frac{K_a [A]}{1 + K_a [A]}$

En pratique le terme [SA] est difficilement mesurable, ainsi que K_a fonction de l'énergie d'adsorption ΔG° et de la température (loi de Gibbs).

Par contre, on peut aisément calculer q nombre de moles de A adsorbés par masse d'adsorbant à l'équilibre, en soustrayant de la quantité de A initiale, la quantité de A à l'équilibre après adsorption, et l'on a alors :

$$\frac{q}{Q} = \frac{K_a C}{1 + K_a C}$$

où $Q = S_T$ = nombre maximal de sites adsorbants
et C = concentration de l'adsorbant.

q et C étant mesurés, K_a et Q sont déterminés en traçant :

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{K_a Q} + \frac{C}{Q}$$

Ce modèle, dit de Langmuir, repose sur les hypothèses que :

- Chacun des sites peut adsorber une seule molécule. Les molécules sont donc adsorbées au niveau d'une seule couche;
- L'affinité des sites est le même pour l'adsorbant donné;
- L'activité d'un site n'affecte pas l'activité des sites adjacents.

Suivant le type d'adsorbant, on est confronté à des cinétiques d'adsorption plus compliquée où il faut conférer à certains sites d'adsorption une énergie plus forte ; il faut alors considérer que :

$$q = aC^{1/n} \quad (\text{équation de Freundlich}).$$

Les suspensions de Moringa réagissent-elles comme un adsorbant classique ? Il paraît intéressant de répondre à cette question et nous tenterons de l'aborder dans le chapitre VI.

5.2.2. Phénomènes de floculation

De façon simplifiée et sans entrer dans les détails, les particules rencontrées dans l'eau de tailles inférieures à 10μ appelées colloïdes sont stables et restent dispersées parce qu'elles sont chargées électriquement (en général plutôt négativement). A ceci se surajoute une stabilité liée à leur caractère hydrophile pour certaines due à l'affinité de leurs groupes fonctionnels de surface pour l'eau.

L'introduction des flocculants chimiques contribue à déstabiliser ces colloïdes en modifiant leur charge surfacique et en favorisant ainsi leur agglomération lors de l'agitation.

Le Moringa coagule-t-il l'eau et les colloïdes plus particulièrement de la sorte ? L'abattement des colloïdes par un phénomène d'adsorption nous paraît plus plausible en premier lieu.

Dans un second temps, lors de l'agitation lente, la collision entre des particules de Moringa en phase d'adsorption semble se réaliser puisque, à vue, les particules grossissent jusqu'à une taille de 0,2 à 0,3 mm maximum. Cette agglomération dépend de la fréquence des collisions et de leur efficacité et des caractéristiques hydrodynamiques des particules.

L'expérience montre que l'érosion des flocs de Moringa est évidente : un accroissement de l'agitation, conduisant à accroître les forces de cisaillement, détruit les flocs ; le floc de Moringa est très fragile. Lors de l'essai en fût et en colonne de décantation, il est clair que les flocs les plus gros jusqu'à 0,3 mm se forment après l'agitation lente lorsqu'il subsiste encore une légère agitation tourbillonnante beaucoup plus lente encore. Une chute de l'eau ainsi flocculée, de quelques dizaines de centimètres, détruit les flocons (cf. essais de décantation en colonne comparés à l'essai de décantation en fût sans transvasement, derniers Tableaux 3.7).

Ces différentes remarques nous conduisent à conclure qu'une phase d'agitation modérée ou très modérée avec un gradient de vitesse de l'ordre de 5 à 10 s^{-1} (beaucoup plus faible que pour les flocculants chimiques classiques) est sans doute nécessaire pour une floculation satisfaisante par le Moringa. Dans le cas contraire, le traitement est inefficace ou moins bon.

5.2.3. Cinétique de décantation

5.2.3.1. Notions théoriques

Dans le cas général d'une chute de particule dans un milieu visqueux (tel que l'eau), on considère que les forces de pesanteur, les forces de trainée (forces de frottements) et éventuellement la force d'Archimède sont à prendre en compte, de façon différente si le régime de chute est laminaire ou pas.

De façon générale, la vitesse de chute de la particule est donnée par :

$$V^{2-n} = \frac{4d^{1+n} g (\rho_s - \rho_e)}{3b \eta^n \rho_e^{1-n}}$$

- où :
- . n fonction du type d'écoulement (autour de la particule qui chute)
 - . b défini dans le coefficient de trainée C qui vaut :

$$C = \frac{b}{Re^n} \quad \text{où} \quad Re = \text{nbre de Reynolds} = \frac{Vd}{\rho_e \eta}$$
 - . η la viscosité dynamique de l'eau
 - . d est la taille de la particule
 - . ρ_s la masse volumique de la particule
 - . ρ_e la masse volumique de l'eau
 - . g l'accélération de la pesanteur.

Pour des particules de taille inférieure à 0,1 mm (cas des suspensions de Moringa non flocculées voir granulométrie), le régime est laminaire (écoulement de Stokes) et on a : $Re < 1$; $n = 1$; $b = 24$.

$$V = \frac{1}{18} \frac{d^2 g \Delta \rho}{\rho_e \eta}$$

Pour des tailles comprises entre 0,1 et 1 mm (cas des floccs), on aurait un régime dit de Allen où :

$$V^{1,4} = 0,072 \frac{d^{1,6} g \Delta \rho}{\eta^{0,6} \rho_e^{0,4}}$$

Dans tous les cas, et étant donné la non sphéricité des particules de Moringa en suspension, un coefficient correcteur doit être pris en compte, dit indice de sphéricité ϕ_v que l'on définit par le rapport du volume de la sphère de même surface que la particule au volume de cette même particule (dit aussi indice de Wadell). On a alors : $C' = C \phi_v$ et C' constitue le nouveau coefficient de trainée.

Suivant les tables en notre possession, nous déduisons que ϕ_v est compris entre 5 et 30 pour des particules organiques telles que celles issues de la poudre de Moringa.

5.2.3.2. Décantation "dynamique"

Lorsqu'une particule est en écoulement, entraînée dans un flux horizontal (cas d'un décanteur pour le traitement de l'eau), les effets produits par l'écoulement contrarient la chute normale de la particule. Les traiteurs d'eau prennent alors en compte une composante verticale moyenne de la turbulence opposée à la vitesse de chute de la particule pour mieux approcher la cinétique de décantation. On a :

. si u_0 = vitesse de chute dans une eau immobile
 \bar{V} = vitesse moyenne d'écoulement horizontal
 u_1 = valeur de chute relative dans l'écoulement à la vitesse moyenne \bar{V} .

$$u_1 = u_0 - \frac{\bar{V}}{20}$$

On remarque qu'une correction est donc apportée à la vitesse de chute en eau immobile pour obtenir la vitesse de chute réelle.

Cette expression introduite dans le calcul de la vitesse de surverse V_s (définissant le rendement du décanteur) nous donne :

$$V_s = \frac{Q}{S} \left(1 + \frac{1}{k} \frac{L}{H} \right)$$

où k vaut de 20 à 30.

L = longueur du décanteur,

H = hauteur d'eau de la zone de décantation.

Si le radier présente une pente sensible, on aura :

$$V_s = \frac{Q}{S} \frac{H + L (1/k - \text{tg}\alpha)}{H - L/2 \text{tg}\alpha} \quad (1)$$

Le facteur k est d'autant plus petit que la particule présente une turbulence dans sa chute. Ce serait en particulier le cas de toute particule n'ayant pas une forme proche d'une sphère et légère, donc facilement contrariée dans sa chute par un écoulement horizontal.

Finalement, nous mettons encore ici l'accent sur la difficulté de décantier correctement une eau floclée par le Moringa dans des ouvrages classiques. L'opération n'est pas irréalisable mais la floculation préalable doit être excellente ; en d'autres termes, on a peu droit à l'erreur.

5.2.3.3. Applications

Considérons des suspensions de Moringa de taille 0,08 mm, et d'une densité 1,2 à 1,3 et recherchons leur vitesse de chute théorique en milieu immobile ; nous réaliserons dans un second temps la même opération avec un floc de taille 0,2 mm.

On obtient :

$$V_{0,08 \text{ mm}} \# 3 \text{ m/h.}$$

Sachant qu'à 30°C, η vaut de l'ordre de $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$.

$$V_{0,2 \text{ mm}} \# 21,6 \text{ m/h.}$$

ϕ_v est estimé entre 5 et 30, et doit être pris en compte tel que :

$$V' = \frac{V}{(\phi_v)^{1/2}}$$

On a alors une correction d'un facteur 2 à 6 sur les vitesses de chute, ce qui donnerait :

$$V'_{0,08 \text{ mm}} = 0,5 \text{ à } 1 \text{ m/h}$$

$$V'_{0,2 \text{ mm}} = 3 \text{ à } 10 \text{ m/h.}$$

On retrouve à peu de chose près les vitesses de chute calculées sur le pilote de décantation. Les particules qui restent en suspension après 1 heure de décantation après Jar-Test doivent par ailleurs être d'une dimension inférieure à 50 microns.

En calculant la vitesse de surverse dans le cas de la station de Poura à partir de la formule (1), on aurait $V_s = 0,57 \text{ m/h}$, en prenant $k = 20$, $Q = 16 \text{ m}^3/\text{h}$, $S = 27,4 \text{ m}^2$; $\text{tg}\alpha = 0,07$; $H = 1,77 \text{ m}$; $L = 2,8 \text{ m}$.

En fait cette vitesse calculée est sous-estimée par le fait que :

- la surface de décantation réelle est réduite, 15 à 20 m² au lieu de 27,4 m² (zone de turbulence à l'entrée et à la sortie) ;
- k est sans doute plus grand pour les particules de Moringa ;
- on ne tient pas compte des cheminements préférentiels.

Par conséquent, seuls les flocs supérieurs en taille à 0,1 mm environ seront décantés dans un décanteur tel que celui de Poura.

5.2.4. Dispersion des suspensions de Moringa dans le décanteur

A la station de Poura, le décanteur se comporte vraisemblablement comme un réacteur bien différent d'un réacteur piston (PF reactor pour les anglo-saxons). Les suspensions de Moringa qui n'ont pas décanté se dispersent dans le réacteur. La cinétique de dispersion est prépondérante par rapport à la décantation que l'on peut négliger dans le cas où le débit est trop fort (16 m³/h par exemple).

L'écoulement dans le décanteur conduit à la fois à des phénomènes de convection et de diffusion longitudinale pour les particules en question et ceci est traduit par la loi de Fick et la loi de conservation de la masse de particules dans un volume élémentaire du fluide, ce qui donne en première approximation :

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

où D_L = coefficient de dispersion longitudinale
 x = distance dans le réacteur (c'est-à-dire le décanteur)
 C = concentration particulaire
 U = vitesse moyenne d'écoulement suivant l'axe des x .

La résolution de cette équation aux dérivées partielles est réalisable en considérant des conditions aux limites connues. En particulier la fonction créneau d'injection de Moringa de 7h45 à 10h30 suivant un débit q_1 et de 10h30 à 12h00 suivant un débit $2q_1$ devrait permettre d'obtenir une solution au problème.

La courbe obtenue en figure 4.5 traduisant l'évolution de la turbidité en sortie du décanteur (donc du réacteur) en fonction du temps montre clairement qu'une dispersion a bien lieu puisqu'on obtient une courbe en cloche dont l'allure est proche de celle calculée analytiquement par le modèle décrit par l'équation (2).

Sans nous étendre beaucoup plus, nous voulons montrer par là que :

- l'écoulement dans le décanteur n'est pas un écoulement piston ;
- la dispersion dans un plan horizontal est prépondérante par rapport à la décantation lorsque la vitesse d'écoulement est de l'ordre de 3 m/h (cas de POURA), au moins pour un certain groupe de particules ;
- en décantation dynamique classique, un abattement particulaire conséquent après traitement par le Moringa est très irréaliste ; seule une décantation statique ou quasi statique est envisageable (type cuvée), mais est-elle bien raisonnable pour un producteur d'eau qui ne peut opérer comme le vigneron ?

VI. RECHERCHES COMPLEMENTAIRES : CONTRIBUTION A UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU POUVOIR FLOCCULANT DU MORINGA

Nous avons énoncé dans l'introduction (I - Phase II) une gamme de recherches appliquées à programmer pour mieux connaître le pouvoir flocculant du Moringa, et les adaptations nécessaires pour le rentabiliser dans les étapes de traitement.

Nos dernières activités ont donc consisté à entamer ces recherches de façon embryonnaire pour fournir déjà des sérieux éléments de réflexion pour le futur.

Nous avons dégagé par conséquent cinq courts thèmes que l'on peut assez rapidement aborder dans le cadre d'un laboratoire équipé.

6.1. Complémentarité du sulfate d'alumine et du Moringa

6.1.1. Position du problème

Cette propriété de complémentarité paraissait aller de soi, avant même d'entamer toute expérience : le Moringa a un bon pouvoir adsorbant, mais forme des floccs de piètre volume et densité, alors que l'aluminium qui polymérise accroît la taille des floccs et les rend plus lourds, plus cohérents aussi.

L'enjeu est donc simple : est-il envisageable de réaliser une bonne coagulation-flocculation, et de produire ainsi une eau de bonne qualité après un temps de décantation satisfaisant (de l'ordre de 1 h) en injectant une dose de Moringa et de sulfate d'alumine significativement plus faible que si on les utilisait séparément pour obtenir une eau de même qualité ?

Quelles sont alors les proportions convenables entre ces deux réactifs ?

Quelles sont les propriétés de la boue obtenue et, en particulier, a-t-elle une meilleure cohésion que la boue de Moringa seule ?

Enfin, si la synergie entre ces deux réactifs est intéressante, peut on les injecter ensemble à partir d'une solution mère composée ou bien faut-il les injecter séparément ?

6.1.2. Méthodologie

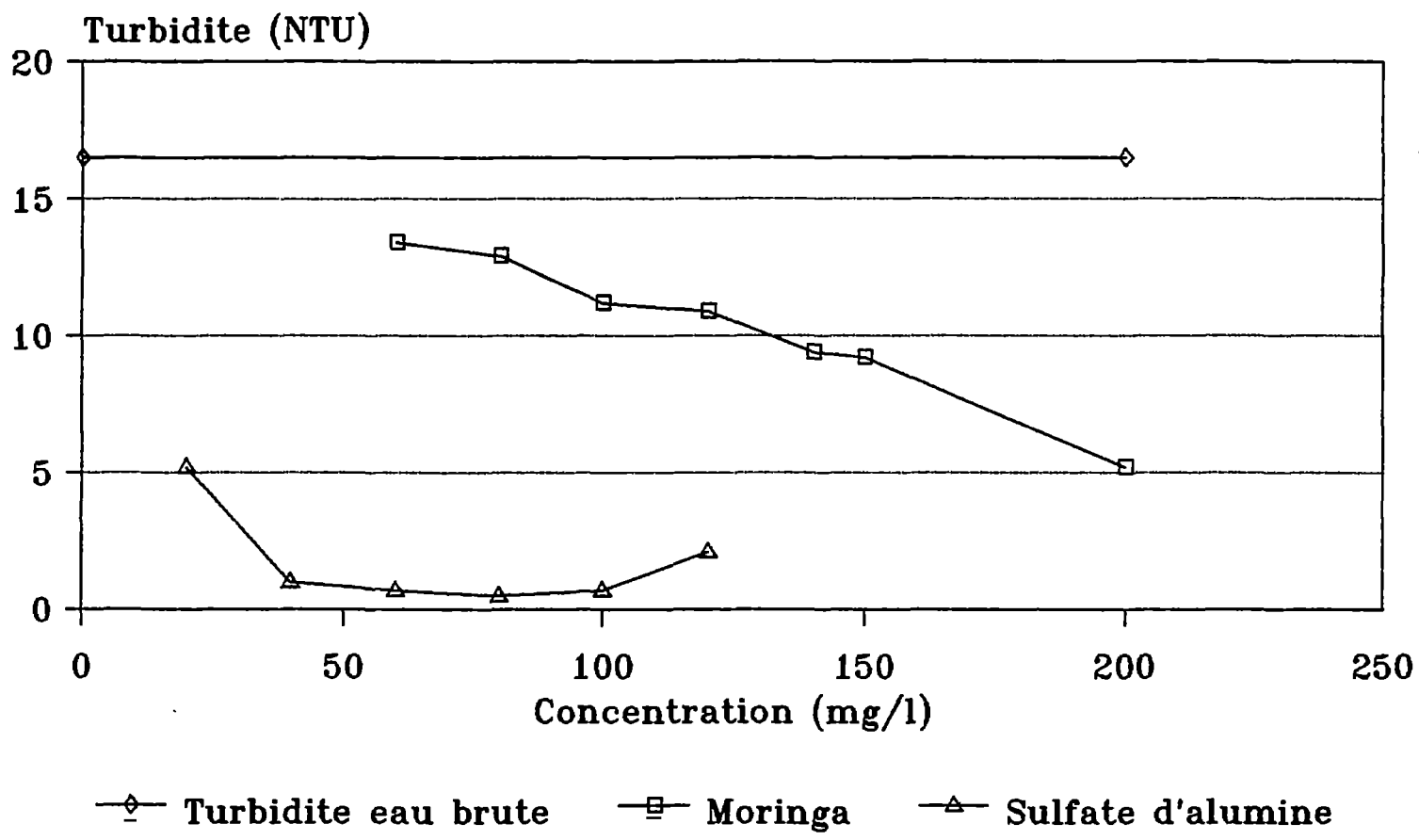
6.1.2.1. Recherche d'un rapport de mélange

Les premiers essais sont réalisés sur l'eau du barrage n°3 de Ouagadougou qui en date du 4 juin avait une turbidité de 16,5 NTU, et un pH de 8,05.

Dans un premier temps, des essais de Jar-Test par Moringa et par la sulfate d'alumine sont lancés séparément (fig. 6.1).

Barrage 3 Ouagadougou

Comparaison S.A./Moringa en vue d'une injection commune (04/06/93) fig. 6.1



Puis, on conviendra d'utiliser successivement environ les 1/8, 1/4, 1/3, 1/2 de la dose optimale en sulfate d'alumine avec des doses croissantes de Moringa inférieures à la dose de choix déterminée par traitement de Moringa seul.

Après 1 heure de décantation et 4h à titre indicatif, on mesurera la turbidité dans chacun des bechers, et le pH résultant.

6.1.2.2. Essai de traitement combiné et essais confirmatifs

Grâce aux expériences précédentes, nous pouvons déterminer un bon rapport de mélange entre sulfate d'alumine et Moringa pour obtenir des résultats de floculation plus intéressants.

Dans cette seconde partie, nous décidons d'utiliser différents mélanges de ces deux réactifs sur différentes eaux, dans le rapport 1/4 et 1/15 en sulfate d'alumine/Moringa.

Les essais de Jar-Test sont menés en effectuant deux témoins aux doses respectives de S.A et de Moringa, un traitement par injection séparée de S.A et de Moringa dans le rapport choisi et un traitement par injection d'une solution mère constituée du mélange des deux réactifs en cette même proportion (solution mère homogénéisée pendant 4 à 6 heures par agitation rapide).

Les eaux testées sont issues du barrage n°3 de Ouagadougou et sont de turbidités variées :

- une eau assez claire (décantée naturellement avec T = 8,5 NTU)
- une eau brute moyennement turbide (avec T = 60,3 NTU)
- une eau brute plus turbide prélevée au fond d'un fût après décantation (avec T = 76 et 108 NTU).

6.1.3. Résultats et interprétations (Tableaux 6.1)

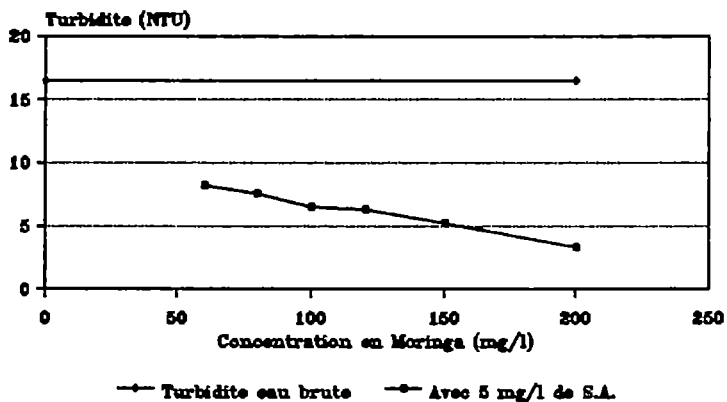
La dose satisfaisante à partir de laquelle il est raisonnable d'utiliser le Moringa est de 200 mg/l puisque la turbidité atteinte est de 5,2 NTU après 1 heure, et le pH de 7,7.

Pour le sulfate d'alumine, la dose de 40 mg/l est excellente puisqu'elle permet d'obtenir une turbidité légèrement inférieure à 1 NTU ; le pH alors s'en trouvera diminué à 6,5 pour un pH initial de 8,05.

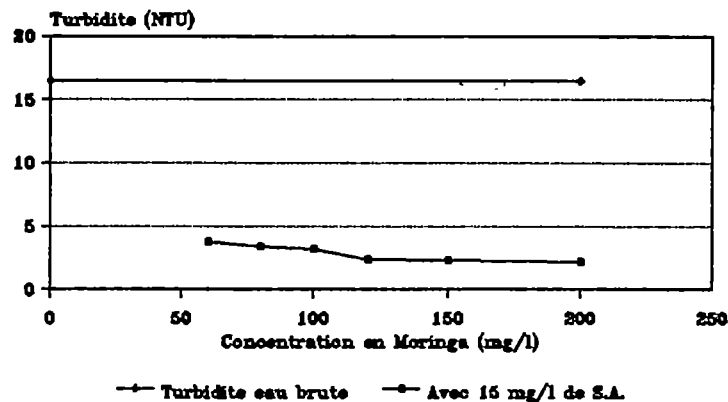
Les doses testées de sulfate d'alumine complémentaires à Moringa sont donc 5 mg/l, 10 mg/l, 15 mg/l et 20 mg/l pour des doses croissantes de 60 mg/l, 80 mg/l, 100 mg/l, 120 mg/l, 150 mg/l et 200 mg/l en Moringa.

**ESSAI COMBINE DE MORINGA ET DE SULFATE D'ALUMINE
A DIFFERENTES DOSES**

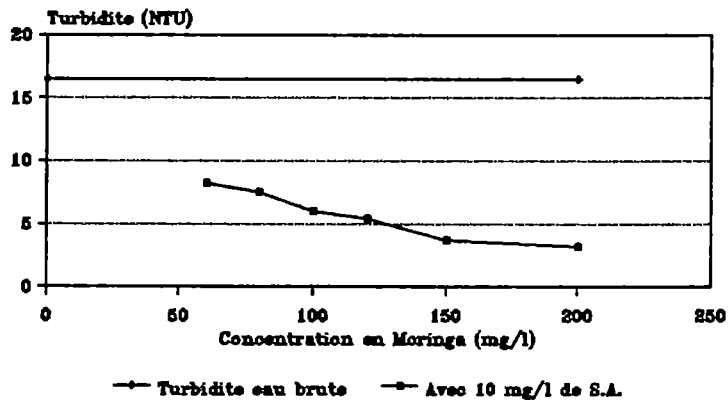
Barrage 3 Ouaga
fig. 6.2



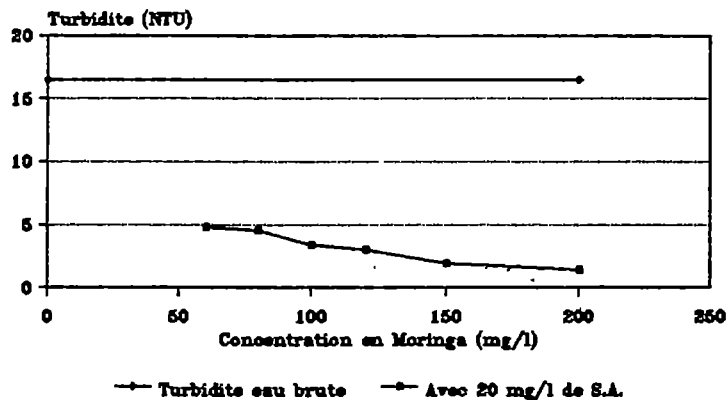
Barrage 3 Ouaga
fig. 6.4



Barrage 3 Ouaga
fig. 6.3



Barrage 3 Ouaga
fig. 6.5



L'effet additif des deux réactifs est bénéfique, mais la qualité du résultat s'accroît lentement :

- 5 mg/l de sulfate d'alumine (S.A) et 150 mg/l de Moringa fournissent une qualité d'eau identique à celle obtenue avec 200 mg/l de Moringa seul (Fig. 6.2)
- 10 mg/l de S.A, 120 mg/l de Moringa réalisent ce même objectif en qualité (Fig. 6.3)
- Avec 15 mg/l de S.A, l'effet est encore plus spectaculaire puisque l'ajout de 60 mg/l de Moringa donne une qualité d'eau décantée de 3,8 NTU pour 13,4 NTU si le Moringa est ajouté seul à cette dose (Fig. 6.4)
- Avec 20 mg/l de S.A, la qualité des résultats est un peu moins bonne que pour 15 mg/l de façon générale, et au regard des 5,2 NTU atteints avec cette même dose de S.A seul (Fig. 6.5).

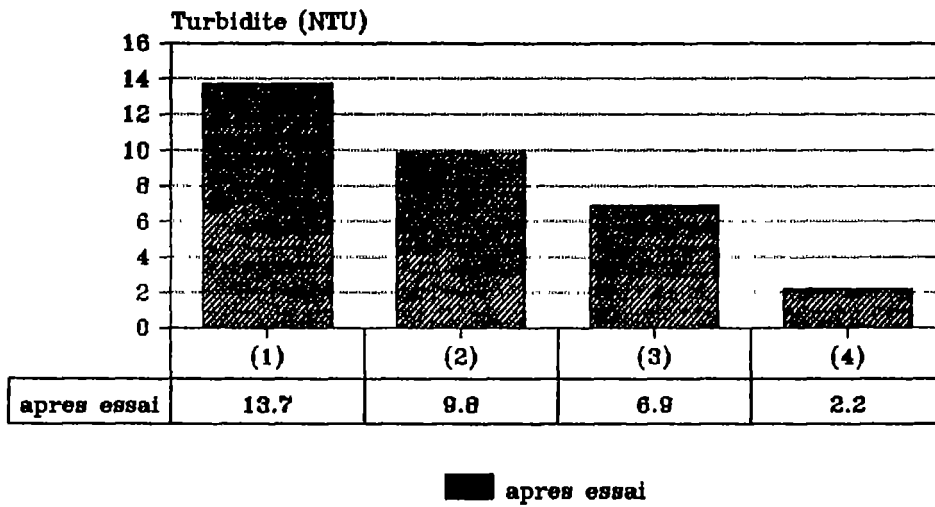
Ces résultats sont prometteurs : le Moringa paraît être un adjuvant intéressant au S.A, même s'il constitue un adjuvant accroissant la capacité d'adsorption plutôt que conduisant à un accroissement du poids des floes (ce qui est le plus souvent le cas pour les adjuvants courants tels que la silice activée pour les adjuvants minéraux ou l'amidon pour les adjuvants organiques).

Les essais complémentaires réalisés sur trois autres types d'eaux montrent que :

- Cette complémentarité est confirmée et est d'autant plus efficace que les réactifs sont injectés à partir d'une même solution mère, plutôt que de deux solutions mères distinctes de chacun des réactifs, excepté pour les eaux faiblement turbides qui une fois de plus ne font pas référence. On obtient un gain d'un facteur 2 à 4 en turbidité (fig. 6.6 et 6.7).
- Le rapport 1/4 fournit d'excellents résultats améliorant sensiblement les performances de floculation par rapport à un traitement avec un seul réactif, le rapport 1/15 paraît moins bon.

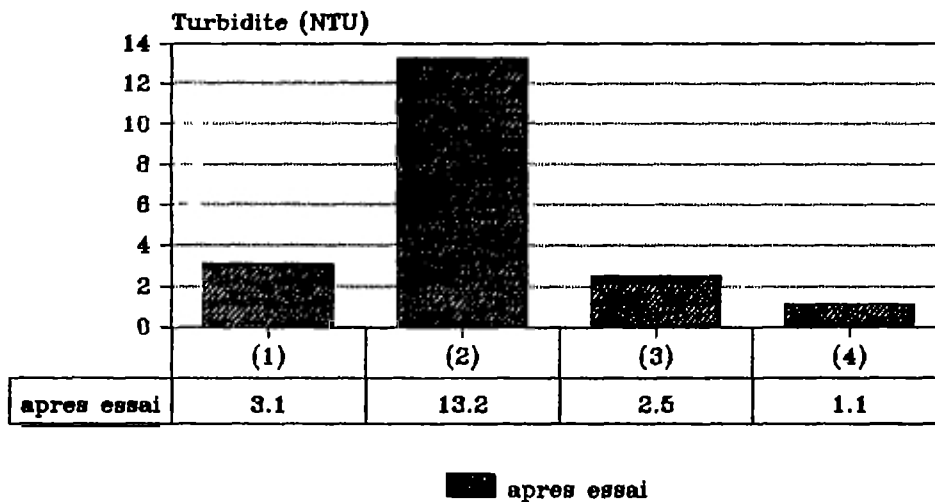
Cette pratique a un intérêt certain puisqu'il sera d'autant plus intéressant pour le traiteur d'eau d'utiliser une solution mère composée avec une injection unique, plutôt que deux solutions distinctes avec deux injections distinctes.

Barrage 3 Ouagadougou
 Turbidite initiale = 60,3 NTU
 (eau decantee naturellement) fig. 6.6



(1)=10mg/l de SA; (2)=150mg/l de MORINGA
 (3)=10mg/l de SA+150mg/l de MORINGA Injectés séparément
 (4)=10mg/l de SA+150mg/l de MORINGA Injectés ensemble

Barrage 3 Ouagadougou
 Turbidite initiale = 75.8 NTU
fig. 6.7



(1)=15mg/l de SA; (2)=60mg/l de MORINGA
 (3)=15mg/l de SA+60mg/l de MORINGA Injectés séparément
 (4)=15mg/l de SA+60mg/l de MORINGA Injectés ensemble

6.1.4. Discussion sur l'essai de cohésion de boue

Les résultats montrent que la boue composée a une excellente cohésion, dépassant même les performances d'une boue au sulfate d'alumine simple. On obtient en effet un coefficient K de l'ordre de 2 à 3 m/h pour une cohésion courante d'une boue d'alumine située entre 0,8 à 1,2 m/heure (fig. 3.20).

En première approximation, cette boue composée peut donc être utilisée en voile de boue, par exemple dans un pulsator. Rappelons que la boue de Moringa seule avait un coefficient K de 0,2 m/h environ qui était prohibitif pour un traitement avec voile de boue.

6.2. Action du chlore sur une eau traitée par le Moringa

6.2.1. Objectifs

Comme nous l'avons identifié lors de l'essai en station, le chlore injecté réagit avec les résidus de Moringa qui subsistent après filtration. Notre objectif est de le confirmer au laboratoire en tentant de dégager une cinétique d'oxydation et la part du chlore libre et combiné résiduel après 2 heures de temps de contact.

6.2.2. Méthodologie

L'eau brute de Poura prélevée le 12 juin 1993 est floculée par une dose convenable de Moringa à 500 mg/l ; elle est ensuite prélevée à une turbidité de 4,8 NTU après 2 heures de décantation.

On lui ajoute des doses croissantes de chlore injecté sous forme d'hypochlorite de calcium à 0,5, 1, 1,5, 2 mg/l respectivement. Par la méthode à la DPD solide (pastilles DPD), on détermine après 1 heure et 2 heures, le résiduel de chlore libre et combiné par spectrophotométrie. On réalise de façon parallèle un témoin d'eau distillée traitée à ces mêmes doses de chlore.

6.2.3. Résultats et interprétations

La figure 6.8 montre nettement que les suspensions de Moringa consomment le chlore après 2 heures. La droite présentée en figure 6.8 nous permet de conclure que pour l'eau testée, la quantité de chlore consommée par litre est de 0,7 mg/l environ, le résiduel de chlore combiné étant de l'ordre de 0,3 mg/l au delà du break-point (Tableau 6.4).

Chloration sur eau decantée (4.8 NTU)
Poura 154 NTU
Traitement par Moringa à 500mg/l

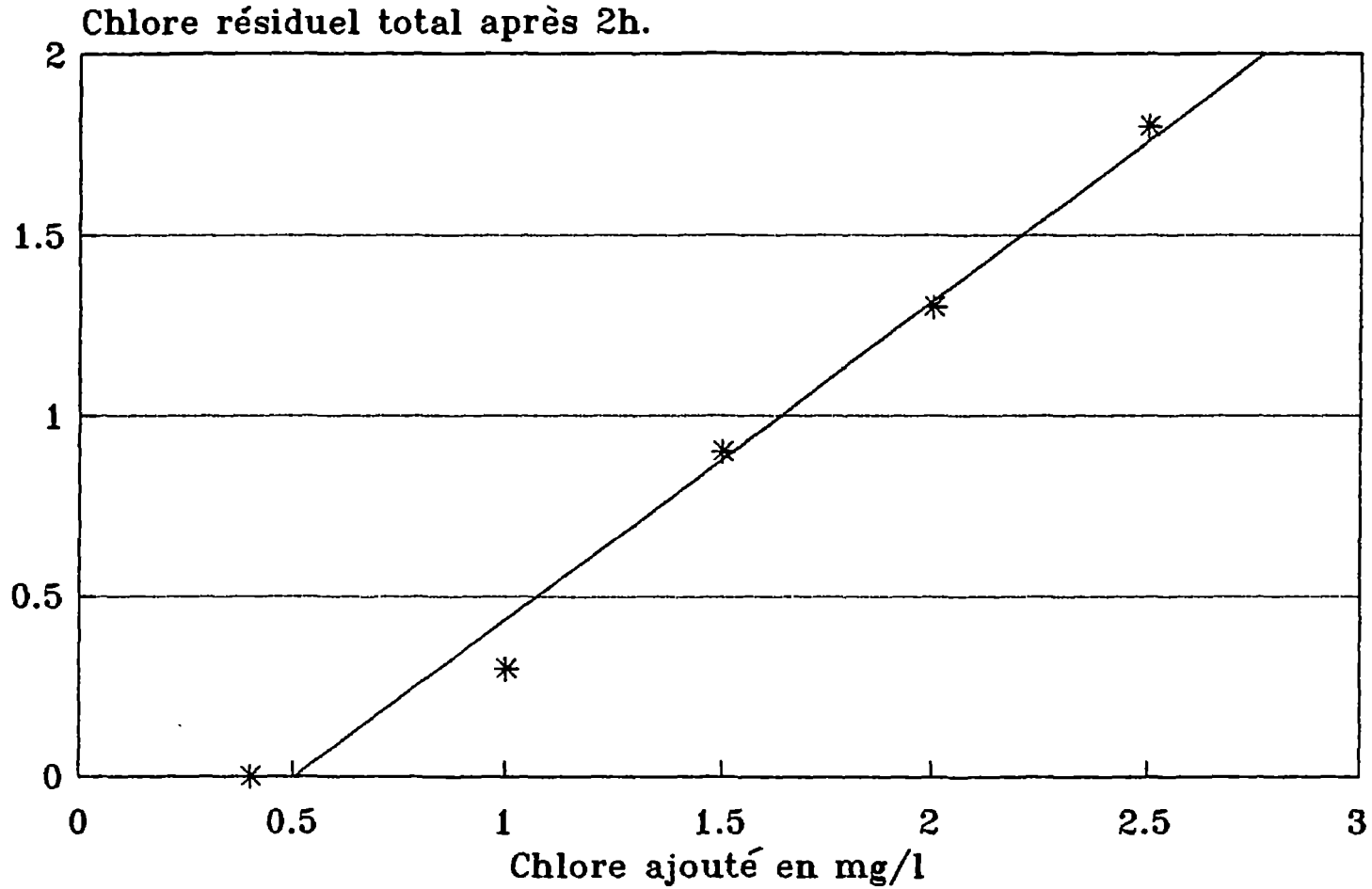


fig. 6.8

Par cet exemple, nous montrons simplement que :

- une préchloration n'est pas envisageable si l'on utilise le Moringa comme flocculant (et même en adjuvant).
- une filtration de mauvaise qualité qui ne retiendrait pas les particules de Moringa résiduelles, conduirait à une consommation excessive de chlore en postchloration.
- la quantité de chlore combiné produite posera des problèmes de goût pour l'eau du réseau.

6.3. Pouvoir désinfectant du Moringa au laboratoire

6.3.1. Objectifs

De nombreuses bibliographies font état d'un réel effet désinfectant du Moringa. Mme JAHN le rappelait dans son document de synthèse.

A notre niveau, les résultats sont au stade actuel assez contradictoires entre les résultats d'analyses au laboratoire et ceux obtenus à la station de Poura.

Au laboratoire, après les différents Jar-Tests effectués sur les eaux brutes du Burkina, l'abattement en germes témoins était important (facteur de 90 à 100%). Ces essais réalisés par un élève-ingénieur de l'EIER se devaient d'être confirmés par le laboratoire.

A la station de Poura, l'effet était beaucoup moins démonstratif puisque l'abattement, s'il existait, restait limité ou difficilement appréciable étant donné les fortes charges. Il est vrai qu'en station, la turbidité des eaux décantées n'avait jamais été très satisfaisante, même si l'après-midi, avec une qualité de 3 NTU, le nombre de germes témoins demeurait important.

Notre démarche à l'échelle du laboratoire va donc être double :

- Réaliser un nouvel essai sur deux eaux brutes (barrage de Ouaga 3 et Poura) et contrôler la qualité bactériologique avant et après traitement.
- Réaliser un essai de désinfection directement sur une solution très claire (eau distillée) contaminée par des indicateurs de pollution (coliformes fécaux). Dans cet essai, le phénomène de floculation n'aura pas lieu, ce qui nous permettra de mieux distinguer l'effet désinfectant propre du Moringa par rapport à son pouvoir de floculation (qui abat indirectement la charge bactérienne).

6.3.2. Méthodologie

Après essai au Jar-Test sur l'eau de Ouaga 3 et Poura, on prélève 3 fois 100 ml d'eau décantée, traitée à 200 mg/l de Moringa pour l'eau de Ouaga et à 1000 mg/l pour l'eau de Poura. On réalise un étalement sur les trois milieux tests. Dans le même temps, on effectue trois étalements de l'eau brute non traitée. La méthode de dénombrement est donc la même. On réalise la lecture et le comptage après incubation à 44° (pour les coliformes fécaux après 24 heures), à 37° (pour les coliformes totaux après 24 heures), et pour les streptocoques fécaux (après 48 heures).

Parallèlement, un témoin est réalisé en étalant une solution de Moringa à 200 mg/l (dose optimale utilisée) : la contamination de la poudre est en effet envisageable.

Par ailleurs, on prépare une suspension bactérienne de coliformes fécaux dans 1 litre d'eau distillée et on quantifie en UFC/100 ml la solution contaminée. Après une soigneuse homogénéisation, on traite à des doses de 50, 100, 150, 200 mg/l, et on mesure l'abattement des germes témoins après 1 heure (temps de contact convenable). Dans le même temps, on dénombre la quantité de ces mêmes germes sur la solution mère d'eau distillée contaminée : une élimination s'effectue probablement naturellement du fait de la grande sensibilité des coliformes fécaux, d'un certain stress lié à la mise en suspension depuis une colonie sur gélose, et du manque de matières organiques donc de conditions favorables à leur croissance et à leur survie.

Ces essais sont réalisés en plusieurs exemplaires, une réelle incertitude dans le comptage étant irrémédiable.

6.3.3. Résultats et interprétations

Les résultats du premier protocole (tableaux 6.5) montrent que la destruction (ou l'élimination par décantation) des germes est réelle à hauteur de 50% environ pour les coliformes totaux et fécaux. Les streptocoques semblent moins sensibles, ce qui est courant vis-à-vis d'autres désinfectants, ce germe présentant systématiquement une résistance plus affirmée (il est de ce fait souvent utilisé en tant qu'indicateur de désinfection sur les réseaux).

Comme nous le pensions, la solution de Moringa à 200 mg/l est contaminée : nous incriminons le décorticage réalisé à la main par la population locale, le broyage dans un broyeur destiné à déchiqueter des végétaux ou racines de toutes origines et non désinfecté après l'opération, et enfin le stockage. Il est évident que chacune de ces phases ne peut pas se dérouler dans une ambiance aseptique.

Les résultats obtenus sur l'eau de Poura confirment les précédents : l'eau traitée est moins chargée en germes témoins ; l'abattement est de l'ordre de 50 à 90% sans que l'on puisse être plus précis étant donné le nombre encore important de colonies présentes.

Par contre, les essais de préparation de solution distillée contaminée ont totalement échoué : Après ensemencement par une colonie de coliformes fécaux prélevés sur milieu gélosé, au temps $t = 0$, la quantité de coliformes n'est plus que de 6/100 ml et le témoin non traité par le Moringa après 30 minutes est exempt de germes. Il est donc impossible de mettre en évidence le caractère désinfectant du Moringa par ce protocole.

Le changement brutal de conditions pour la colonie contaminante est sans doute à l'origine de son dépérissement (absence de matières organiques, de sels dissous, etc).

6.4. Pouvoir adsorbant du Moringa : Essai avec de l'actapulqite activée

Dans le chapitre V, nous énoncions quelques observations qui nous menaient à croire que le pouvoir adsorbant du Moringa était peut être à l'origine de ses vertus clarifiantes.

En général, les matériaux adsorbants sont testés avec des produits organiques dosables, le plus souvent de synthèse. Pour le charbon actif par exemple, on a pu déterminer ces capacités d'adsorption c'est-à-dire son coefficient de transfert de masse dans la zone de diffusion, et le coefficient n caractérisant l'ordre de la réaction d'adsorption, pour des molécules dérivées de benzène, des organochlorés, des pesticides etc.

L'expérimentation consiste à suivre la diminution de concentration de l'élément adsorbé en fonction de la concentration de l'adsorbant dans le milieu aqueux.

La quantité de molécules adsorbées, rapportée à la quantité de masse d'adsorbant, est liée à la concentration en adsorbant suivant les lois de Langmuir ou de Freundlich. Ces lois sont parfois compliquées par la présence de niveaux d'adsorption (couches d'adsorption) différentes à la surface de la particule adsorbante qui nécessitent de sophistication le modèle.

Notre objectif est de tenter de mettre en évidence une loi d'adsorption, pour le Moringa, si elle existe, sur un produit donné. Nos faibles moyens analytiques au laboratoire de l'EIER, en matière de chimie organique en particulier, et le manque de temps, nous ont poussé à utiliser un composé argileux activé, communément fourni en pharmacie, l'actapulqite activée, dont les propriétés adsorbantes sont reconnues (il est utilisé pour réaliser des pansements gastriques).

L'actapulгите est préparée à partir de l'attapulгите, argile naturelle à structure à bandes de tétraédres silicatés. A ce produit naturel, est ajouté un excipient constitué de glucose, totalement soluble.

Globalement, il est donc constitué d'attapulгите, totalement minéral, et d'un produit organique facilitant son absorption lors d'un traitement médical.

6.4.1. Méthodologie

Nous préparons une solution mère d'actapulгите activée à 10 g/litre environ, homogène. Nous introduisons dans une eau distillée des quantités équivalentes de cette solution à savoir 1 g et nous complétons à 1 litre. La turbidité résultante est alors mesurée.

Le Jar-Test est réalisé avec des doses croissantes de Moringa de 40 mg/l à 600 mg/l, puis de 100 à 400 mg/l. Après un temps de décantation de une heure, on réalise la mesure de turbidité sur chaque becher et un bilan massique par le résidu sec à 105°C, en matières organiques et matières minérales.

Parallèlement, on contrôle un témoin avec une solution d'actapulгите à 1 g/l, qui décante naturellement : l'élimination de l'actapulгите est donc aussi le fait d'un phénomène de décantation qu'il faut soustraire du phénomène d'adsorption. Le résidu sec après 1 heure est mesuré de la même façon.

On répétera cette opération avec une solution d'actapulгите à 0,5 g/l.

Ce seront essentiellement les matières minérales résiduelles dans l'eau qui vont nous intéresser puisque les matières organiques proviennent de l'actapulгите comme du Moringa. La part des deux n'est pas facile à évaluer. A contrario, le Moringa contient très peu de matières minérales et le résidu minéral à 550°C sera surtout lié à l'attapulгите non adsorbée.

6.4.2. Résultats et interprétations

Le tableau 6.6 présente des résultats cohérents parfois troublants :

- Dans chaque cas, la détermination d'une dose optimale est aisée et le Jar-Test fonctionne bien : l'attapulгите est en partie éliminée par Moringa à des doses de l'ordre de 200 à 300 mg/l pour des turbidités de 50 à 60 NTU pour les solutions d'actapulгите décantées à 1 g/l.

- Les résultats sont pour certains contradictoires : les tableaux devraient donner des résultats identiques or il n'en est rien ni au niveau des turbidités, ni au niveau des résidus mesurés. Le protocole ou les techniques de mesure peuvent être remis en cause.
- L'essai présenté sur le tableau 6.6.a) montre une diminution des matières minérales graduellement de 100 à 200 mg/l. L'essai 6.6.b) fournit, pour sa part des résultats assez différents.
- L'accroissement de la turbidité après la dose optimale est assez brutal et reste stable (cas du tableau 6.6.c), mais là aussi on observe une contradiction.
- La dose optimale de Moringa à utiliser ne diminue pas linéairement en fonction de la quantité d'actapulгите: on a 200 mg/l pour 1 g/l et 130 mg/l pour 0,5 mg/l.

Nous avons tenté d'appliquer les modèles de Langmuir et de Freundlich aux données du tableau 6.6, sans résultats probants.

La cinétique d'adsorption ne suit pas un modèle classique ou les mesures sont à reprendre plus précisément et de façon répétitive.

6.5. Essais au Jar-Test avec des graines d'âges différents

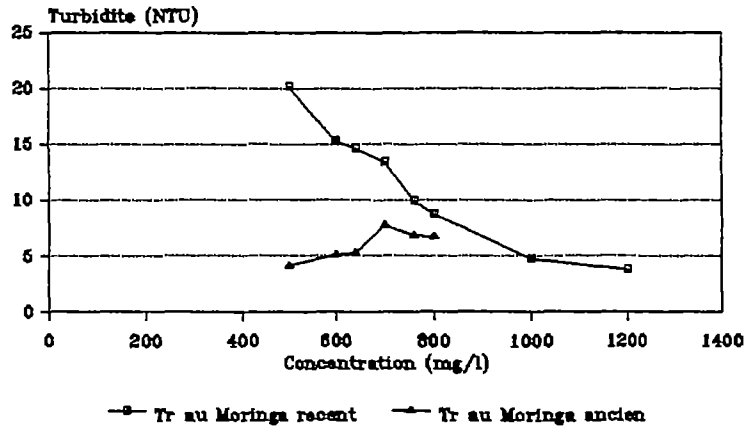
Nous disposons de deux types de poudre : l'une réalisée à partir de graines de Moringa récoltées en Avril 93 au Burkina Faso, l'autre à partir de graines de Moringa récoltées au moins avant Janvier 1992. Nous supposons que l'espèce Moringa fournissant ces graines est la même ; dans le cas contraire, les résultats ne seraient pas comparables.

Les Jar-Tests sont effectués à doses croissantes identiques avec ces deux solutions mères de graines 93 et de graines 92, sur les eaux de Loumbila (en Avril 93) et de Poura (prélevée début Juin 93). Les résultats obtenus des tableaux 6.7 montrent que :

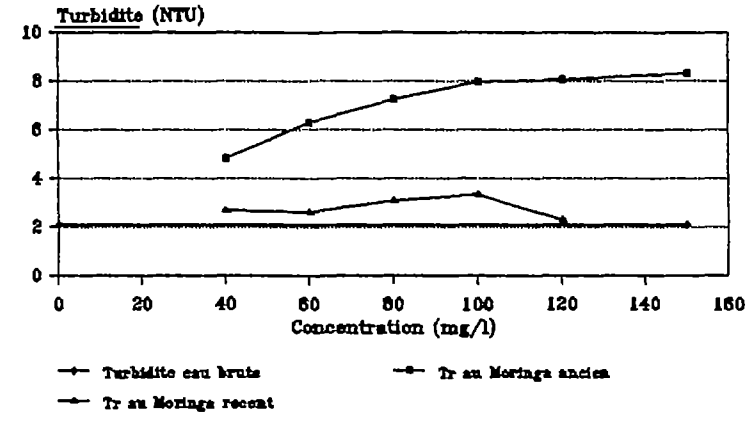
- Les essais menés sur l'eau de Loumbila ne sont pas encore une fois représentatifs du pouvoir flocculant du Moringa puisque les matières colloïdales sont quasiment absentes. On constate simplement que les suspensions de Moringa datant de plus d'un an semblent décanter moins vite que les suspensions issues des graines récentes (Fig. 6.10).
- Par contre, les essais entrepris sur l'eau de Poura indiquent sans ambiguïté que les graines les plus âgées ont un pouvoir deux fois plus efficace au moins puisque avec 500 mg/l, on atteint une turbidité de 4,1 NTU contre 4,7 NTU pour 1000 mg/l de graines récentes (voir Fig. 6.9). La dose optimale est peut-être même inférieure à 500 mg/l, notre gamme d'essais n'étant pas suffisamment précise.

COMPARAISON EFFICACITE DE 2 SOLUTIONS
MERES DE GRAINE D'AGE DIFFERENT

Prise de Poura
Turbidite initiale = 154 NTU (12/06/93)
fig. 6.9



Barrage de Loumbila
(14/04/93)
fig. 6.10



6.6. Cinétique de biodégradation de la solution mère de Moringa

La solution mère à 20 g/l de Moringa sans semence et avec semence (constituée de 1 ml d'eau usée épurée dans la station de lagunage de l'EIER) est soumise à un test DBO suivant la méthode manométrique.

La fig. 6.11 montre nettement que cette solution est biodégradable dans des proportions à peu près identiques avec ou sans ensemencement. Une adaptation des micro-organismes traduite par la courbe sigmoïde dans les trois premiers jours est sans doute nécessaire.

Nous n'avons pas réalisé ce même test sur une boue de Moringa. Il devrait conduire à des mesures comparables ~~fonction~~ aussi de la nature des matières colloïdales éliminées.

La conclusion néanmoins ne se fait pas attendre : une boue de Moringa est probablement plus biodégradable et moins polluante qu'une boue d'alumine. On peut cependant penser que le pouvoir floculant d'une solution mère mise à l'air peut s'atténuer avec le temps, à mesure que des réactions biologiques métaboliques s'opèrent en son sein. Cela reste cependant à prouver.

VII. CONCLUSIONS GENERALES

Ce document répond-t-il à la question présomptueuse formulée en introduction "le Moringa est-il un coagulant de choix pour les producteurs d'eau ?".

Après ces différentes recherches, nous sommes à même de conclure sans trop d'ambiguïté :

- le Moringa ne peut pas suppléer le sulfate d'alumine pour les eaux brutes du Burkina Faso et ceci quelle que soit la saison. Ce sont essentiellement ses très mauvaises capacités à la décantation qui en sont à l'origine.

Néanmoins cette affirmation est à nuancer :

- . L'effet clarifiant est indéniable pour des eaux de turbidité inférieure à 100 NTU, c'est-à-dire des eaux de rivières courantes ou de barrage à grande contenance. En particulier, la cinétique de clarification est rapide. Par conséquent une filtration efficace après une floculation par le Moringa sans décantation intermédiaire devrait fournir de bons résultats.

EVOLUTION DE LA DEMANDE BIOLOGIQUE EN
OXYGENE D'UN LAIT DE MORINGA A 20g/l
AVEC SEMENCE ET SANS SEMENCE

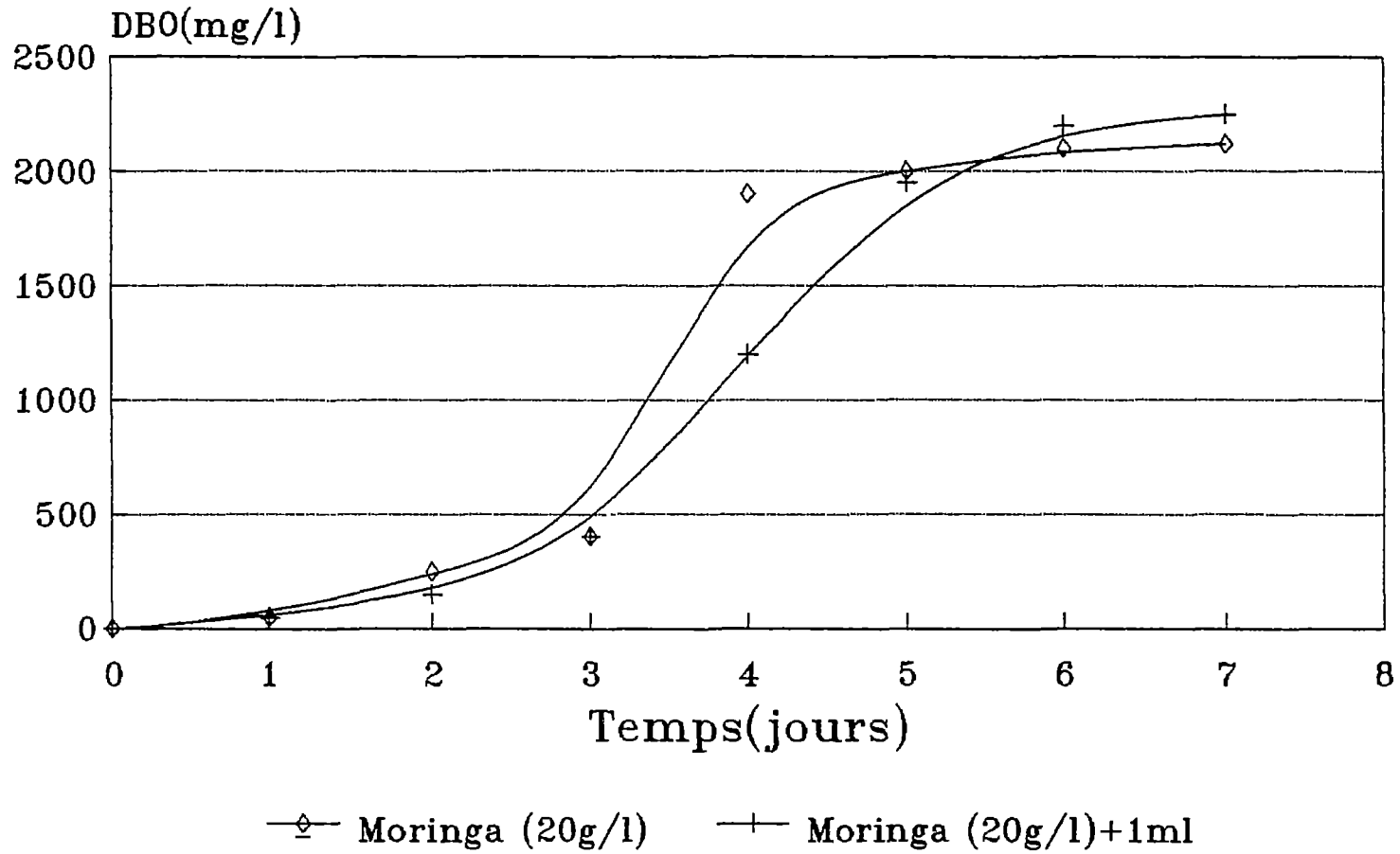


fig. 6.11

Nous manquons néanmoins d'arguments pour défendre cette hypothèse et des recherches plus fouillées mériteraient d'être engagées sur ce thème pour constater comment se comporte un filtre rapide ou lent avec à une eau flocculée par le Moringa et quelle est son évolution dans le colmatage.

- . Une décantation statique de 3 à 4 heures donne d'excellents résultats mais est utopique pour un traiteur d'eau (ces techniques de cuvée furent utilisées au début du siècle et au siècle dernier, ...).
- . Une flocculation adaptée au Moringa, avec des gradients de vitesse très faibles, des agitations très modérées, en bref un soin minutieux dans cette phase de traitement nécessitant un travail d'orfèvre, permettrait d'aboutir à de bons résultats mais cette démarche n'est pas envisageable en pays sahélien au stade industriel. Des recherches complémentaires avec des outils d'agitation divers sont envisageables, mais nous pensons qu'elles seraient difficilement transmissibles au niveau industriel sans y mettre de gros moyens matériels (agitateurs mécaniques adaptés, flocculateurs à chicanes spécifiques, ...).

Par rapport aux résultats déjà obtenus à travers le monde sur ce flocculant naturel, notre approche sans doute plus appliquée au traiteur d'eau a sans doute été moins couronnée de succès :

- Les doses à utiliser pour un traitement satisfaisant sont généralement plus importantes que ce qu'elles sont ailleurs, au Soudan en particulier.
- La phase de préparation du flocculant mérite encore d'être très approfondie mais des obstacles de taille se présentent : le broyage, le stockage, la conservation de la solution mère en font partie.

Par rapport à ces constatations, l'extraction du principe actif, proposée par la Compagnie Générale des Eaux, est une voie à poursuivre dans le contexte sahélien parce qu'elle pallierait sans doute à ces nombreux inconvénients précédemment évoqués.

Il reste que sa complémentarité avec le sulfate d'alumine est de bon augure et nous paraît la seule piste viable à ce jour. La bonne proportion entre ces deux réactifs, fonction probable du type d'eau à traiter, est encore à mieux déterminer.

Un essai en station avec un flocculant mixte nous semble constituer une juste continuité de ce document, même si la problématique de production du Moringa à grande échelle reste posée.

A N N E X E S

TABLEAU N°2.3 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE LA POUDRE
DE MORINGA OLEIFERA A SEC

Poids de l'échantillon à analyser : 55 g/présence de grumeaux

Tableau des résultats d'analyse

Maille du tamis (mm)	3,15	1,60	0,50	0,25
Poids de refus (g)	2,3	10,4	35	7
Poids de matériau passant (g)	52,7	42,3	7,3	0,3

TABLEAU N°2.4 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION
DE LA SOLUTION MERE APRES DECANTATION

(résidu sec total à 105°C)
(moyenne de 3 analyses pour chaque temps)

	à t = 0	à t = 5 mn	à t = 10 mn
Résidu sec total à 105°C	20,3 g/l	6 g/l	5,5 g/l

**TABLEAU N°3.1 : RESULTATS DES ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES
ET BACTERIOLOGIQUES DES EAUX BRUTES**

Paramètres	Unité	Poura(1)	Poura(2)	Loumbila	Tenado	Ouaga(2)	Itenga	Ouaga(3)	Boulmigou	Nazinon	Saponé	Nakambé
Température	°C	29	28,9	31	29,1	30,1	29,7	29,6	29	30,6	30,3	31,1
PH à 25°C		7,01	7,23	6,50	6,85	7,15	7,13	6,75	5,65	5,93	5,45	6,72
Conductivité	µs/cm	320	200	71	178	349	186	480	140	75	106	150
Turbidité	NTU	15,8	10,9	2,3	5,5	9,4	99	195	395	260	490	570
Odeur		néant	néant	néant	néant	néant	néant	mauvaise	mauvaise	de terre	de terre	de terre
Couleur		assez claire	assez claire	claire	claire	assez claire	trouble	verdâtre	verdâtre	chocolat	chocolat	chocolat
T.A.	*F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T.A.C.	*F	11,3	11,4	3,8	9,9	13,7	6,4	15,7	7,3	6,8	4,4	7,1
Dureté totale	*F	11,0	10	2,6	9,9	10,7	5,2	12,5	2,4	8,8	3,6	8,5
Calcium	mg/l	25,9	21,2	6,7	18,2	29,0	19,2	40,5	10,2	29,5	9,0	26,7
Magnésium	mg/l	16,5	15,4	6,3	17,0	10,8	3,4	8,27	3,8	3,6	3,3	4,4
Sodium	mg/l	21,1	18,4	16,5	19,4	60,3	34,5	75,6	32,8	24,0	35,8	34,8
Potassium	mg/l	24,0	22,1	23,1	21,2	53,2	25,0	66,7	39,7	20,2	33,1	31,0
Ammonium	mg/l	0,008	0,00	0,17	0,09	0,15	0,00	0,96	0,45	1,22	0,00	0,49
Carbonates	mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bicarbonates	mg/l	138,8	139,9	47,0	121,3	167,0	78,4	192,6	89,5	83,4	54,2	87,2
Chlorures	mg/l	6,4	8,7	7,8	12,0	40,9	10,9	74,2	25,7	80	61,0	60,7
Coliformes totaux	/100 ml	36	40	*	*	80	*	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100
Coliformes fécaux	/100 ml	- 50	- 50	> 100	*	> 100	0	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100
Streptocoques fécaux	/100 ml	0	0	0	0	60	8	80	80	0	0	60
Dates de prélèvement		15.04.93	15.04.93	14.04.93	15.04.93	14.04.93	14.04.93	15.04.93	15.04.93	15.04.93	14.04.93	14.04.93
Heures de prélèvement		12h20'	12h30'	11h40'	09h50'	09h00	15h20'	15h00'	15h10'	14h00'	13h40'	10h35'

* : échantillons non lisibles
présences abondantes de germes banaux ou autres.

**TABLEAU N°3.2 : RESULTATS DES ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES
ET BACTERIOLOGIQUES DES EAUX TRAITEES**

Paramètres	Unité	Rec. OMS	Poura(1)	Poura(2)	Loumbila	Tenado	Ouaga(2)	Itenga	Ouaga(3)	Boulmigou
Température	°C		28,5	28,1	30	28,9	30	29	28,8	29
PH à 25°C		6,5-8,5	6,9	7,3		7,3	7,0	7,0	6,8	5,7
Conductivité	µs/cm	400	315	198	72	180	352	183	488	149
Turbidité	NTU	5	6,1	3,5	5,5	3,5	5,2	5,4	5,6	82,2
Odeur			néant	néant	néant	néant	néant	néant	néant	néant
Couleur			néant	néant	néant	néant	néant	néant	néant	trouble
Goût										
T.A	°F		0	0	0	0	0	0	0	0
T.A.C	°F		10,5	10,6	3,3	9,8	12,4	3,5	12,1	3,7
Dureté totale	°F	50	10,4	9,1	2,1	6,4	9,5	4,7	11,0	1,4
Calcium	mg/l		24,1	20,3	5,9	17,9	24,9	10,2	25,3	3,6
Magnésium	mg/l		16,0	16,7	5,6	14,1	10,3	7,6	13,9	7,2
Sodium	mg/l	200	21,1	19,4	16,5	19,4	60,3	34,5	74,6	35,7
Potassium	mg/l		25,0	22,1	25,1	22,1	54,1	30,8	69,68	58,3
Ammonium	mg/l	5 CEE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,05	0,33
Carbonates	mg/l		0	0	0	0	0	0	0	0
Bicarbonates	mg/l		129,2	129,4	40,3	120,6	151,6	42,9	147,7	45,6
Chlorures	mg/l		5,6	5,9	6,3	7,5	37,4	8,6	70,7	13,8
Coliformes totaux	/100 ml	03 CEE	12	15	0	0	0	0	8	0
Coliformes fécaux	/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	10	0
Streptocoques fécaux	/100 ml	0	0	0	0	0	8	0	6	16
Date d'analyse			16.04.93	17.04.93	17.04.93	18.04.93	16.04.93	18.04.93	19.04.93	19.04.93
Mise à incubation			8h00	7h30'	15h15'	7h00	15h00	15h00	7h30	15h15'
Doses de Moringa en mg/l			150	80	200	150	200	600	800	2000

**TABLEAU N°3.3 : RESULTATS DES ESSAIS AU JAR-TEST FAITS
SUR LES DIFFERENTS ECHANTILLONS D'EAU BRUTE
"GRAINE DE MORINGA OLEIFERA"**

<u>BARRAGE DE OUAGADOUGOU N°2</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	150	200	250	300	350	400
Turbidite (NTU)	8,6	5,2	4,3	4,5	3,0	2,5
<u>BARRAGE DE ITENGA</u> <u>ESSAI N°1</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	200	250	300	350	400	450
Turbidité (NTU)	54,5	48,6	40,4	62,9	55,4	50,1
<u>ESSAI N°2</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	600	650	700	750	800	1000
Turbidite (NTU)	5,4	6,1	7,5	5,5	7,5	13,5
<u>BARRAGE DE OUAGADOUGOU N°3</u> <u>ESSAI N°1</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	150	200	250	300	350	400
Turbidite (NTU)	25,2	23,1	20,5	18,7	17,5	12,5
<u>ESSAI N°2</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	600	700	750	800	1000	
Turbidite (NTU)	10,7	10,5	7,1	5,6	4,3	

**TABLEAU N° 3.4 : RESULTATS DES ESSAIS AU JAR-TEST FAITS
SUR LES DIFFERENTS ECHANTILLONS D'EAU BRUTE
"GRAINE DE MORINGA OLEIFERA"**

<u>STATION DE POURA (1) : Prélèvement en tete du flocculateur</u>						
<u>ESSAI N°1 : Emploi de la solution préparée sans filtrée</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	150	200	250	300	350	400
Turbidite (NTU)	6,1	4,9	4,4	3,0	2,7	2,5
<u>ESSAI N°2 : Emploi de la solution préparée filtrée</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	200	250	275	300	350	400
Turbidite (NTU)	6,9	5,6	5,1	4,8	3,5	3,1
<u>STATION DE POURA (2) : Prélèvement sur le bassin d'admission d'eau brute</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	20	40	60	80	100	150
Turbidite (NTU)	3,5	3,6	3,7	4,0	3,0	4,3
<u>BARRAGE DE LOUMBILA</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	20	50	80	100	150	200
Turbidite (NTU)	4,6	5,1	5,6	7,0	5,5	3,0
<u>TENADO : PRISE SUR LE MOUHOUN</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	20	40	50	100	150	200
Turbidite (NTU)	4,8	4,6	4,7	4,25	3,5	3,2

**TABLEAU N°3.5 : RESULTATS DES ESSAIS AU JAR-TEST FAITS
SUR LES DIFFERENTS ECHANTILLONS D'EAU BRUTE
"GRAINE DE MORINGA OLEIFERA"**

<u>BARRAGE DE BOULMIGOU</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	600	800	900	1000	1500	2000
Turbidite (NTU)	295	240	220	180	110	82
<u>LE NAZINON</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	600	700	800	900	1000	1500
Turbidite (NTU)	183	145	136	143	146	158
<u>BARRAGE DE SAPONE</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	800	1000	1500	2000	2500	3000
Turbidite (NTU)	406	395	366	304	262	192
<u>LE NAKAMBE</u> <u>ESSAI N°1</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	300	350	400	450	500	550
Turbidite (NTU)	466	465	468	472	474	479
<u>ESSAI N°2</u>						
N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	700	800	900	100	1500	2000
Turbidite (NTU)	382	450	466	484	484	418

TABLEAU N°3.6 : DOSES DE CHOIX EN FONCTION DES TURBIDITES DES DIFFERENTS ECHANTILLONS D'EAU BRUTE

EAU BRUTE	TURBIDITE EAU BRUTE (NTU)	DOSES DE CHOIX (mg/l)	TURBIDITE EAU TRAITE (NTU)
Poura(1)	15,8	150	6,1
Barrage de Loumbila	2,3	150	5,5
Tenado (Mouhoun)	5,5	150	3,5
Barrage de Ouagadougou n°2	9,4	200	5,2
Barrage de Itenga	99,2	600	5,4
Barrage de Ouagadougou n°3	195	800	5,6

(1) : prélèvement au refoulement (tête du flocculateur)

(2) : " sur le bassin d'admission d'eau brute.

TABLEAUX N°3.7 : ESSAI DE DECANTATION SUR COLONNE

Eau brute : Barrage de Loumbila
Dose utilisée 150 mg/l
Date 9.05.93

Tableau de mesures de turbidité

Turbidité eau brute : 3,05 NTU
A l'instant t = 0 (après floculation) turbidité = 15,9 NTU

Temps (mn)	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m
30	10,4	11,7	13,2	17,2
00	9,8	10,2	11,4	12,5
120	4,3	4,4	5,7	6,4
180	1,0	1,3	1,4	1,6

Tableau de mesures de matières sèches

- Matières sèches en mg/l sur la colonne de décantation

Résidu sec filtré de l'eau brute à 105°C = 77 mg/l
Matières sèches = 218 mg/l
Matières en suspension de l'eau brute = 6 mg/l

Temps (mn)	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m
30	129	136	146	153
60	87	110	115	120
120	78	82	93	104
180	67	78	85	96

- Résultats en pourcentages

30	63 %	58 %	52 %	47 %
60	90 %	75 %	72 %	68 %
120	95 %	93 %	86 %	79 %
180	100 %	95 %	91 %	84 %

**TABLEAUX N°3.7 (Suite) : ESSAI DE DECANTATION
SUR COLONNE VERTICALE
ET EN FUT**

Eau Brute = Barrage N°3 de OUAGADOUGOU
 Dose utilisée : 500 mg/l
 Date : 8/06/92
 Turbidité : 75,3 NTU
 Résidu sec filtré : 110 à 130 mg/l
 MES et matières colloïdales : 120 à 150 mg/l
 Résidu sec total : 230 à 280 mg/l.

Décantation en colonne : Rendement en matières éliminées

Temps (mn)	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m
30	60 %	37 %	36 %	13 %
60	89 %	85 %	67 %	56 %
120	90 %	86 %	85 %	76 %
180	98 %	87 %	86 %	85 %
240	99 %	91 %	88 %	86 %

Décantation en fût : Rendement en matières éliminées

Temps (mn)	0,4 m	0,6 m	0,8 m
30	98 %	-	-
60	98 %	98 %	98 %
120	-	99 %	100 %
180	99 %	-	-

TABLEAUX N°3.7 (Suite)

Décantation en colonnes : Abattement de la turbidité en NTU

Temps (mn)	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m
0	180	-	-	-
30	77	108	138	167
60	38	49	67	78
120	17	19	21	26
180	13	18	19	20
240	11	15	16	19
23h	4	4	4	6

Décantation en fût : Abattement de la turbidité en NTU

Temps (mn)	0,4 m	0,6 m	0,8 m
0	174	-	-
30	-	-	-
60	10	-	-
120	8	9	10
180	-	6	3
240	5	-	-
23h	3	4	4

TABLEAUX N°3./ (Suite) : Essai de decantation
sur colonne verticale et en fut

Eau brute : . Eau brute du Mouhoun a Poura
 . Dose utilisee = 1000 mg/l
 . Date = 15/06/92
 . Turbidite = 154 NTU

Résultats de l'abattement en NTU

Temps (mn) en fut	en colonne					
	0,1 m	0,4 m	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m
0	-	414	-	-	-	-
30	23	40	134	266	374	406
60	18	18	18	122	180	245
120	15	9	15	76	92	135
180	10	11	9	32	42	64
240	6	9	8	12	32	38

**TABLEAU N°4.1 : RECAPITULATIF DES EVENEMENTS
MAJEURS PENDANT L'ESSAI**

Temps	Heure effective	Volume cumulé traité en m3/filière	Evénement
0	7h45	0	Début du relevage d'eau brute à 16 m3/h et du traitement au Moringa
20mn	8h05	5,3	Arrivée de l'eau flocculée au décanteur (remplissage du flocculateur)
50mn	8h35	8	Sortie de l'eau décantée (remplissage complémentaire du décanteur) + perte de 2,5 m3 sur la filière parallèle
2h28mn	10h13	39,5	Arrivée d'un panache turbide en sortie du décanteur
2h45mn	10h30	44	Modification du débit traité à 8 m3/h sans modification de l'injection de lait de Moringa
4h15mn	12h00	56	Arrêt de l'injection et fin du relevage
-	12h00 à 14h15	-	Pas de traitement, phase de décantation statique
6h30mn	14h15	0	Relevage d'eau brute à 16 m3/h par filière et traitement à 40 mg/l de sulfate d'alumine
8h45mn	16h30	36	Fin du suivi de la qualité de l'eau en P5 (sortie du décanteur)

TABLEAU N°4.2 : ESSAI DE JAR-TEST
 PREALABLE A L'ESSAI D'INJECTION EN STATION
 A POURA
 LE 14/05/93

TURBIDITE = 35,6 NTU

Dose de floculant	100	120	140	160	170	200
Turbidité Après 1 h de decantation	16,2	14,6	13,4	11,1	10,7	5,5
Turbidite Après 12 h de decantation	-	-	-	-	9,8	5,1

TABLEAU N°4.3 : CONCENTRATION DU LAIT DE MORINGA INJECTE

Heure de prélèvement		Résidu à 105°C	Matières volatiles sèches (MVS)	Matières minérales sèches
8h05	1e essai	16,918 g/l	16,840 g/l	1,078 g/l (6,4 ‰)
	2e essai	18,614 g/l	17,526 g/l	1,088 g/l (5,8 ‰)
11h40	1e essai	23,618 g/l	22,462 g/l	1,156 g/l (4,9 ‰)
	2e essai	26,370 g/l	25,010 g/l	1,360 g/l (5,2 ‰)
Solution mère référence en labo (à 20 g/l)	1e essai	16,306 g/l	15,042 g/l	1,264 g/l (7,8 ‰)
	2e essai	17,936 g/l	16,738 g/l	1,198 g/l (6,7 ‰)

Rappel important : la solution mère a été préparée à 22,88 g/l initialement.

TABLEAU N°4.4 : EVOLUTION DU NIVEAU DE L'EAU DECANTEE AU DESSUS DES FILTRES

	8h45	9h00	9h15	9h30	9h45	10h00	10h15	10h30	10h45	11h00	11h15	11h30
Filtre I en cm	26	47	61	58	56	52	54	54	51	21	10	5
Filtre II en cm	12	23	36	47	50	50	54	53	51	54	61	64

N.B. : . à 10h30, le débit est diminué de moitié
 . Pour un débit de 8 m³/h (2^e phase), le débit arrivant sur le filtre I est nul même en vannant de façon importante.

TABLEAU N°4.5 : ESSAI EN STATION

EVOLUTION DE LA TURBIDITE EN NTU

	6h50	8h05	8h50	9h00	9h15	9h30	9h45	10h00	10h10	10h13	10h45	11h00	11h15	11h30	11h45	12h00	-	14h30	15h20	15h45	16h30
P2		33,5	-	-	33,2	-	-	-	31,2	-	-	-	32,5	-	-	-	-	-	-	-	-
P5	1,9	-	-	1,9	1,7	2,7	2,2	8,5	12,2	20,7	22,1	20,4	18,9	16,5	10,3	7,7		3,4	4,1	3,6	2,2
P'5																		-	-	1,8	-
P7	-	-	-	4,6	-	-	1,2	-	-	-	5,7	-	-	-	6,5	5,3	-				
P8	18,1	-	16,2*	-	6,4	3,9	3,1	3,1	3,1	-	2,7	3,1	3,5	4,8	3,2	3,3	-				
Po	0,9																-				

115

Po = Prise sur robinet en ville

P'5 = sortie du décanteur de la filière parallèle.

* L'eau de la bache est un peu boueuse au départ (dépôts localisés).

TABLEAU N°4.6 : ESSAI EN STATION

Evolution du PH en unité pH

	6h50	8h05	8h50	9h00	9h15	9h30	9h45	10h00	10h10	10h13	10h45	11h00	11h15	11h30	11h45	12h00	-	14h30	15h20	15h45	16h30
P2		7,6	-	-	7,5	-	-	-	7,6	-	-	-	7,7	-	-	-	-	7,6	-	-	-
P5	7,2	-	-	7,2	7,3	7,2	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,5	7,5	7,6	7,5	7,5	-	7,4	7,5	6,9	6,8
P7			-	7,2	-	-	7,4	-	-	-	7,3	-	-	-	7,5	-	-				
P8	7,3	-	7,5	-	7,6	7,6	7,7	7,8	7,7	-	7,6	7,6	7,6	7,6	7,5	7,5	-	7,5			
Po	7,3																				

TABLEAU N°4.7 : ESSAI EN STATION

CONDUCTIVITE ET TEMPERATURE

Conductivité

Température

P2	constante de 202 à 204 $\mu\text{s cm}^{-1}$	évoluant de 31°C à 33°C dans l'après-midi
P5	constante de 212 à 215 $\mu\text{s cm}^{-1}$	idem
P7	constante de 211 à 214 $\mu\text{s cm}^{-1}$	idem
P8	quasi constante de 230 à 235 $\mu\text{s cm}^{-1}$	plus constante autour de 31 à 32°C.
Po	215 $\mu\text{s cm}^{-1}$	-

TABLEAUX N°4.8 : ESSAI EN STATION

1) SULFATES EN MG/L

	6h50	8h05	8h40	10h00	10h10	10h13	10h30	11h40	12h00	-	14h30	15h20	15h45	16h30
P2	-	0	0	0	-	-	-	0	0					
P5	19	-	19	19	16	15	-	15	15		17	18	24	28
P'5											-	-	26	-
P7		-	8	10	-	-	-	10	-					
Po	16													

2) AMMONIUM EN MG/L

	6h50	8h05		8h40	10h00	10h10	10h13	11h30	11h40	12h00	14h30	15h20	15h45	16h30
P2		1,1		1,1	1,2	-	-	0,9	-	-	-	-	-	
P5	0,2			0,2	0,3	0,5	0,5	-	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4
P'5														0,2
P7				0,4	0,5	-	-	0,6	0,5	-	-	-	-	-
P8				0,4	0,3	-	-	0,4	-	0,5	0,6	-	-	-
Po	0,1													

TABLEAU N°4.9 : ESSAI EN STATION

MATIERES SECHES EN MG/L

		6h50	8h05	8h40	10h00	10h10	10h13	11h00	11h40	12h00	14h30	15h20	15h45	16h30
P2	MS		158	202	174	-	-	172						
	MO		16	24	22			28						
	MM		142	178	152			144						
P5	MS		-	100	122	143	208	-	201	190	151	139	127	114
	MO		-	9	2	18	72	-	65	43	25	23	17	12
	MM		-	91	120	125	136	-	136	147	126	116	110	102
P7	MS			117	108	-	-	144	143	-				
	MO			2	22	-	-	5	3	-				
	MM			115	86	-	-	139	140	-				
P8	MS			222	223	-	-	140	135	-	128			
	MO			7	10	-	-	3	5	-	4			
	MM			215	213	-	-	137	130	-	124			

TABLEAU N°4.10 : CHLORE RESIDUEL EN MG/L EN P8

1 - Dosage sur place au comparateur

	9h00	9h15	9h30	10h00	10h30	10h50	11h00	12h00	14h30*
Chlore libre	<0,1	4	3	4	4	4	3	0,6	0,3
Chlore Combiné	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,7

* à la vidange de la bêche d'eau claire.

2 - Dosage au laboratoire après 18 h à 24 h

	9h00	10h00	11h00	12h00	14h30*
Chlore libre	0	3,2	0,10	0,05	0
Combiné	0	1,0	0,30	0,20	0,1

TABLEAU N°4.11 : QUALITE BACTERIOLOGIQUE AU LABORATOIRE
(filtration entre 18 à 24 h après le prélèvement)

P2				P5				P7				P8				Eau Témoin			
Heure	CT	CF	SF	Heure	CT	CF	SF	Heure	CT	CF	SF	Heure	CT	CF	SF	Heure	CT	CF	SF
8h05	>100°	*	14	6h50	*°	2	0	8h50	60°	20	34	6h50	>100°	14*	14	9h55		0	
10h10	>100°	*	40	8h40	*°	20	0	10h00	50°	10	10	9h10	*°	*	0	10h55		0	
				10h15	>100°	>100	168	10h00	50°	10	10	10h15	0°	0	0	Décanteur parallèle			
				10h55	>100°	>100	122	12h00	>100°	>100	18	11h05	0 ¹	0	0	Heure	CT	CF	SF
				11h55 (< CT à 10h55)	>100° (< CT)	>100 (< CT)	180	12h00	>100°	>100	18	12h00	0 ¹	0	0	16h30	>100	10	2
14h40	*°	>100	30	15h15	>100°	>100 (< CT)	96									Milieu Décanteur à l'essai			
				16h30	>100°	>100 (< CT)	30									Heure	CT	CF	SF
																14h35	>100	>100	>100

Remarques : . Attention P5 de 6h50 à 8h40 (eau préalablement chlorée en préchloration la veille jusqu'à minuit)

. A 6h50 en P8, il s'agissait de l'eau de la bache d'eau traitée en cours de vidange (fond de bache boueuse).

. Le taux de chlore est nul en P5 de 6h50 à 16h30 (suivi au comparateur sur le terrain).

* = Difficulté de lire le résultat, développement abondant de colonies diverses et variées (y compris de champignons) qui faussent la lecture des coliformes.

° = Résultats légèrement différents à l'incubateur (bactériologie de terrain).

¹ = Résultats légèrement différents de ceux obtenus par l'incubateur ; présence de germes banaux en quantité non négligeable.

TABLEAU N°4.12 : ANALYSES COMPLETES (Ions en mg/l)

	P2 à 9h05	P5 à 10h00	P8 à 10h13	P8 à 12h00	P7 à 11h45	P8 à 12h00	Décanteur d'essai 6h50	eau du Robinet
Turbidité	31,2	8,5	20,7	8,8	6,5	3,2	1,8	0,9
pH à 28°C	7,6	7,2	7,2	7,4	7,5	7,5	7,2	7,2
Conductivité	204 à 31,6°C	213 à 31,9°C	212 à 31,7°C	215 à 32,5°C	211 à 31,7°C	223 à 43,3°C	212 à 31,1°C	215 à 33,2°C
TA	0	0	0	0	0	0	0	0
TAC	11,9	10,3	10,3	10,3	10,3	10,0	9,9	9,6
Dureté totale	11,9	10,9	10,9	10,9	10,9	11,5	11,1	11,5
Calcium	23,2	21,4	20,7	20,6	20,8	21,4	20,4	21,6
Magnésium	14,8	13,5	13,8	13,9	13,8	14,9	14,6	14,8
Sodium	-	-	-	-	-	-	-	-
Potassium	6,0	6,3	7,0	8,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Fer total	0,5	0	0	0	0	0	0	0
Ammonium	1,0	0,2	0,4	0,6	0,5	0,5	0,1	0,1
Carbonates	0	0	0	0	0	0	0	0
Bicarbonates	145,6	125,6	125,6	125,6	125,6	122,0	120,8	117,1
Sulfates	0	19,0	16,0	15,0	8	17	19	16
Nitrates	3,5	0	0	0	0	0	0	0
Nitrites	0	0	0	0	0	0	0	0
Phosphates	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1
Matières sèches	202	122	208	190	143	135	64	105
Matières organiques	24	2	72	43	3	5	12	3
Matières minérales	178	120	136	147	140	130	52	102
Chlore libre	0	0	0	0	0	0,06	0	0
Chlore Total	0	0	0	0	0	0,23	0	0

TABLEAU N°4.13 : HAUTEUR D'EAU DANS LES CHICANES
A 16 M3/H

1e compartiment	2e compartiment	3e compartiment
22 cm	24 cm	35 cm

4) Essai au Moringa avec 10 mg/l de sulfate d'alumine						
Concentration en mg/l	60	80	100	120	150	200 mg/l
Turbidité après 1h	8,2	7,4	6,0	5,4	3,7	3,2
Turbidité après 4h	7,3	6,2	6,0	4,7	2,8	2,6
PH après 1h	7,6	7,5	7,5	7,5	7,5	7,4

5) Essai au Moringa avec 15 mg/l de sulfate d'alumine						
Concentration en mg/l	60	80	100	120	150	200 mg/l
Turbidité après 1h	3,83	3,45	3,19	2,44	2,32	2,21
Turbidité après 4h	3,47	3,26	2,95	2,29	1,78	1,13
PH après 1h	7,24	7,21	7,20	7,17	7,17	6,95

6) Essai au Moringa avec 20 mg/l de sulfate d'alumine						
Concentration en mg/l	60	80	100	120	150	200 mg/l
Turbidité après 1h	4,75	4,47	3,40	3,05	1,86	1,44
Turbidité après 4h	4,34	4,03	3,36	2,58	1,46	1,25
PH après 1h	7,15	7,14	7,08	7,06	7,05	7,05

TABLEAUX N°6.2 : Essai des mélanges de solutions de Moringa et $Al_2(SO_4)_3$. Eau barrage N°3 Ouaga (prise ONEA)

M1 = injection séparée de 150 mg/l de Moringa et 10 mg/l d'alumine
 M2 = injection à partir d'une solution mère unique de 150 mg/l de Moringa et 10 mg/l d'alumine

A. Essai Jar-Test sur eau moins chargée

. Turbidité de l'eau brute = 8,5 NTU

Concentrations en mg/l	10 mg/l d'alumine	150 mg/l de Moringa	M1(150 + 10)	M2 (150,10)
Turbidité en NTU en 1h	0,7	2,2	1,4	0,9

B. Essai Jar-Test sur eau moyennement chargée
 Barrage N° 3 à 400 m de la prise

. Turbidité de l'eau brute = 60,3 NTU

Concentrations en mg/l	10 mg/l d'alumine	150 mg/l de Moringa	M1(150 + 10)	M2 (150,10)
Turbidité en NTU en 1h	13,7	9,8	6,9	2,2

TABLEAUX N°6.2 (Suite) : Essai des Mélanges de solutions de Moringa et $Al_2 (SO_4)_3$

C. Essai Jar-Test sur eau moyennement chargée avec Nouveau Moringa

Eau du Barrage Ouaga N°3 à 400 m de la prise ONEA

. Turbidité de l'eau brute : 108 NTU

Concentrations en mg/l	15 mg/l Sulfate d'Alum.	60 mg/l de Moringa	M1'(15 + 60)	M2'(15, 60)
Turbidité en NTU en 1h	65,1	68,2	53,3	12,9

D. Essai Jar-Test sur eau moyennement chargée avec ancien Moringa (1 année)

. Turbidité de l'eau brute : 60,8 NTU

Concentrations en mg/l	15 mg/l Sulfate d'Alum.	60 mg/l de Moringa	M1'(15 + 60)	M2'(15, 60)
Turbidité en NTU en 1h	65,1	62,4	49,2	11,4

E. Essai au Jar-test Eau moyennement chargée Eau du barrage Ouaga N°3

. Turbidité de l'eau brute : 75,8 NTU

Concentration en mg/l	60 mg/l de Moringa	15 mg/l d'Alum.	M1	M2
Turbidité après 1h	13,2	3,10	2,5	1,14

TABLEAU N°6.3 : Essai de cohésion de boue
après traitement de l'eau
de OUAGA 3 avec 15 mg/l de S.A
et 60 mg/l de Moringa

Volume de boue en cm ³	80	88	100	108	115	140
Vitesse en m/h	0,75	1,05	1,80	2,00	2,20	3,55

TABLEAU N°6.4 : Essai de chloration sur l'eau de POURA traitée
par 500 mg/l de Moringa, et décantée 2 h

Turbidité initiale = 154 NTU

Turbidité après décantation = 4,8 NTU après 2 h de décantation.

Concentration en chlore libre théorique en mg/l		0,4	1	1,5	2	2,5
Concentration mesurée à t = 0 en chlore libre		0,4	1	1,5	2	2,5
à t = 1 h	Cl ₂ libre	0,2	0,5	1,0	1,3	1,9
	Cl ₂ total	0,3	0,65	1,3	1,7	2,3
à t = 2 h	Cl ₂ libre	0	0,1	0,6	0,9	1,4
	Cl ₂ total	0	0,3	0,9	1,3	1,8

TABLEAU N°6.5 : Analyse bactériologique
Essai de traitement

1) Cas : Eau de Poura

Traitée par 1000 mg/l de Moringa

	Eau brute ufc/100 ml	Eau traitée ufc/100 ml
Coliformes totaux	500 à 1000	100 à 200
Coliformes fécaux	500 à 1000	100 à 200

2) Cas : Eau du barrage n°3 à Ouagadougou

Traitée par 200 mg/l de Moringa en Jar-Test

	Eau brute ufc/100 ml	Eau traitée ufc/100 ml	Solution de Moringa à 200 mg/l ufc/100 ml
Coliformes totaux	700	300	40
Coliformes fécaux	280	120	20
Streptocoques fécaux	100	80	0

TABLEAUX 6.6 : Essais au Jar-Test

a) Avec solution d'actapulqite à 1 g/l initialement

Concentration en Moringa en mg/l	40	100	160	200	240	300	600	Témoin à 1 g/l	Eau distillée
Turbidité initiale	106	106	106	106	106	106	106	106	0,37
Turbidité en NTU après 1 h	38,7	19,3	10,1	7,9	7,1	3,8	4,8	57	
Turbidité en NTU après 3 h	27,9	16,3	9,4	6,7	6,1	2,7	1,8	35,8	
MST (*)	323	250	240	240	238	226	257	331	
MOT (*)	175	212	210	212	205	222	223	174	
MM (*)	148	38	30	28	33	4	34	157	

* MST = matières sèches totales à 105°C

* MM = matières minérales à 550°C

* MOT = matières organiques totales par déduction.

b) Evolution des matières minérales après Jar-Test en fonction de la dose de Moringa

(avec 1 g/l d'actapulqite activée)

Concentration mg/l	100	120	140	160	200	220	240	260	280	300	400	Témoin
M. M.	50	46	41	34	24	32	37	38	51	46	77	140

MM = matières minérales à 550°C.

c) Essai au Jar-Test avec actapulqite activée et Moringa

c.1) 1 g/l d'actapulqite activée

Concentration mg/l	100	120	140	160	200	220	240	260	280	300	400	Témoin
Turbidité en NTU après 1 heure	9,5	8,9	8,4	6,4	3,2	3,3	15,8	15,2	14,4	14,5	14,5	51,4

c.2) 0,5 g/l d'actapulqite activée

Concentration mg/l	30	50	70	90	110	130	150	200	Témoin
Turbidité en NTU après 1 heure	13,6	13,4	9,10	7,9	6,6	5,4	5,7	13,4	27,2

TABLEAUX N°6.7 : ESSAIS AU JAR-TEST

Comparaison de l'efficacité de graines d'âges différents

1) Echantillon : eau brute de Loumbila

Conductivité : 84 μ s/cm

Température : 32,1°C

PH = 7,15

Turbidité : 2,1 NTU

a) Graines de Moringa O. datant d'un an

N° Becher	1	2	3	4	5	6
Doses (mg/l)	40	60	80	100	120	150
Turbidité (NTU) (après 2 heures de décantation)	4,8	6,30	7,25	7,96	8,06	8,32
Turbidité (NTU) (après 24 heures de décantation)	2,66	3,10	3,08	2,54	2,60	2,86

b) Graines récentes de Moringa Oleifera

N° Becher	1	2	3	4	5
Doses (mg/l)	40	60	80	100	120
Turbidité (NTU) (après 2 heures de décantation)	2,68	2,63	3,07	3,35	2,30
Turbidité (NTU) (après 24 heures de décantation)	2,50	2,25	3,05	2,88	2,15

METHODES D'ANALYSES ET REFERENCES

Paramètres	Méthodes d'analyses et Référence des méthodes
Turbidité	Mesure instrumentale : NF T90-033 Sept. 1985
PH	Mesure électrométrique avec les électrodes NF T90-008 - Avril 1953
Conductivité	Mesure avec 1 conductimètre NF T90-031 Décembre 1977
Titre alcalimétrique carbonates, bicarbonates	Méthode avec Indicateurs NF T90-036 Juillet 1977
Dureté totale Calcium Magnésium	Méthode titrimétrique à l'EDTA NF T90-003 Août 1984
Sodium Potassium	Méthode par spectrométrie d'émission de flamme NF T90-019 Août 1984
Ammonium	Méthode Nessler, HACH DR 2000
Chlorures	Volumétrique NF T90-014 Février 1952
Sulfates	Méthode HACH spectrophotomètre DR 2000
Nitrates	Méthode HACH spectrophotomètre DR 2000
Nitrites	Méthode HACH spectrophotomètre DR 2000
Orthophosphates	Méthode HACH spectrophotomètre DR 2000
Fer total	Méthode HACH spectrophotomètre DR 2000
Coliformes totaux Coliformes fécaux	Milieu tergitol 7 Méthode de filtration sur membrane 0,45 NF T90-414 Oct. 85
Streptocoques fécaux	Méthode de filtration sur membrane NF T90-416 Oct. 85
Matières sèches Minérales et organiques	NF T90-029 Juin 1970



