

Mise en place d'un système intégré de gestion des boues de vidange pour la commune urbaine de Tamatave

ANALYSE DU SECHAGE DES BOUES EN CONDITIONS LOCALES

Table des matières

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 5 |
| 2 | MATERIELS ET METHODES | 5 |
| 2.1.1 | Organisation et collaborations | 5 |
| 2.2 | Analyse climatique | 5 |
| 2.3 | Caractérisation physico- chimique des boues de vidange | 6 |
| 2.3.1 | Organisation de la campagne de prélèvement | 6 |
| 2.3.2 | Mode de prélèvement | 7 |
| 2.3.3 | Paramètres analysés et protocoles | 7 |
| 2.4 | Test de séchage | 7 |
| 2.4.1 | Dispositif | 7 |
| 2.4.2 | Protocole de suivi | 8 |
| 3 | RESULTATS ET DISCUSSION | 11 |
| 3.1 | Analyse climatique | 11 |
| 3.1.1 | Vue générale | 11 |
| 3.1.2 | Précision du type de pluviométrie | 11 |
| 3.1.3 | Conclusion | 12 |
| 3.2 | Caractérisation des boues | 12 |
| 3.2.1 | Résultats (campagnes de mesure 2012 et 2013) | 12 |
| 3.2.2 | Conclusion | 13 |
| 3.3 | Tests de séchage | 14 |
| 3.3.1 | Résultats phase 1 | 14 |
| 3.3.2 | Résultats phase 2 | 15 |
| 4 | CONCLUSION | 17 |
| | ANNEXE I : DONNEES GENERALES CLIMATIQUES A TAMATAVE | 19 |
| | ANNEXE II : LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENT | 20 |
| | ANNEXE III : PROTOCOLE D'ANALYSE MS ET MV | 22 |
| | ANNEXE IV : SUIVI PHOTOGRAPHIQUE BOUE N°9 (PHASE II) | 24 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Figure 1 : dispositif de prélèvement des boues | 7 |
| Figure 2 : photo du dispositif pilote en construction | 8 |
| Figure 3 : photo du dispositif pilote | 8 |
| Figure 4 : séquence de pluie artificielle appliquée, $T_{moy} = 26^{\circ}\text{C}$ | 9 |
| Figure 5 : pluviométrie et température pendant le suivi PHASE II | 10 |
| Figure 6 : bilan pluviométrique année 2012 (mm/mois) | 11 |
| Figure 7 : concentration en MS selon le dispositif et la campagne de mesure | 13 |
| Figure 8 : concentration en MV selon le dispositif et la campagne de mesure | 13 |
| Figure 9 : corrélation entre matière sèche et taux de matière volatile | 13 |
| Figure 10 : évolution de l'épaisseur des boues A et B | 14 |
| Figure 11 : évolution de la siccité des boues A et B | 14 |
| Figure 12 : évolution du taux de MV des boues A et B | 14 |
| Figure 13 : nombre de jours de séchage nécessaire avant enlèvement, selon les concentrations initiales | 16 |
| Figure 14 : évolution de l'épaisseur de la couche sur 15 jours – suivi couvert | 16 |
| Figure 15 : évolution de l'épaisseur de la couche sur 15 jours – suivi à ciel ouvert | 16 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : emplacement des prélèvements 2013 | 6 |
| Figure 2 : dispositif de prélèvement des boues | 7 |
| Figure 3 : photo du dispositif pilote en construction | 8 |
| Figure 4 : photo du dispositif pilote | 8 |
| Figure 5 : séquence de pluie artificielle appliquée, $T_{moy} = 26^{\circ}\text{C}$ | 9 |
| Figure 6 : pluviométrie et température pendant le suivi PHASE II | 10 |
| Figure 7 : bilan pluviométrique année 2012 (mm/mois) | 11 |
| Figure 8 : concentration en MS selon le dispositif et la campagne de mesure | 13 |
| Figure 9 : concentration en MV selon le dispositif et la campagne de mesure | 13 |
| Figure 10 : corrélation entre matière sèche et taux de matière volatile | 13 |
| Figure 11 : évolution de l'épaisseur des boues A et B | 14 |
| Figure 12 : évolution de la siccité des boues A et B | 14 |
| Figure 13 : évolution du taux de MV des boues A et B | 14 |
| Figure 14 : nombre de jours de séchage nécessaire avant enlèvement, selon les concentrations initiales | 16 |
| Figure 15 : évolution de l'épaisseur de la couche sur 15 jours – suivi couvert | 16 |
| Figure 16 : évolution de l'épaisseur de la couche sur 15 jours – suivi à ciel ouvert | 16 |

Abréviations

| | |
|------|--|
| BV | Boues de vidange |
| ET | Ecart Type |
| CNRE | Centre Nationale de Recherche pour l'Environnement |
| MS | Matières Sèches |
| MV | Matières Volatiles |

Photographies et figures

P-H. Dodane

Les photographies et figures du présent rapport ne peuvent être ré-utilisées sans autorisation des auteurs en dehors du cadre du projet « Système intégré de gestion des boues de vidange de Tamatave ».

Synthèse

Suite à l'étude de faisabilité dont elle s'est dotée en 2012, la ville de Tamatave s'oriente, à travers un financement de la Communauté de Commune des Terrasses et Vallées de l'Aveyron et de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, et l'appui technique des ONG Practica et Protos, vers la mise en place d'un système d'assainissement composé de services de vidange des latrines et le traitement des matières fécales extraites (boues de vidange). La présente étude a pour objectif de préciser les caractéristiques des boues locales et leur aptitude au séchage dans les conditions climatiques locales, en vue de prévoir les procédés de traitement adaptés.

On distingue deux familles de boue selon qu'elles soient extraites de fosses maçonnées (type A) ou de latrines traditionnelles non maçonnées et de faibles contenances (type B). Les boues de type A sont encore à l'état liquide et présentent une concentration en matière sèche plus faible que les boues de type B, particulièrement pâteuses et probablement moins digérées. La particularité des boues de Tamatave réside dans le fait qu'elles sont très concentrées notamment en raison de la présence de matières minérales d'origine non fécale comme la cendre, le charbon, et le sable. Ceci peut s'expliquer par les usages locaux et le sol à dominante sableuse qui porte la ville.

Le climat de type tropical humide de la zone n'est pas particulièrement favorable au séchage si on considère le taux mensuel d'hygrométrie élevé et constant tout au long de l'année qui limite le potentiel d'évaporation. De plus la pluie est présente toute l'année (une saison de moindre pluie mais pas de saison sèche). Les séquences de pluie peuvent durer plusieurs jours avec des périodes de temps sec réduites, ce qui semble limiter la capacité des boues à se transformer et à drainer les eaux de pluie. Toutefois, l'étude montre que les boues peuvent sécher à ciel ouvert dans ce contexte, mais avec des surfaces de séchage grandes.

Les surfaces de séchage nécessaires sont proposées. Pour un séchage à ciel ouvert, les boues de type A demanderaient une charge admissible de 55 kg MS/m²/an (proche de la charge admissible en climat tempéré européen) et les boues de type B de 175 kg MS/m²/an. Les temps de séchage étant de l'ordre d'un mois pour les deux type de boue (pour une épaisseur initiale de 5 cm), le nombre de lit de séchage doit être supérieur à 20 afin de permettre un cycle complet avant une nouvelle application de boue. On constate également que le volume susceptible de percoler (fraction liquide d'eau libre) est faible, estimé à 30% du volume initial pour les boues de type A et quasiment nul pour les boues pâteuse de type B. Ces considérations sur les caractéristiques des boues et leur capacité à se déshydrater en conditions locales amène à justifier, au plan technique, une meilleure adaptation au contexte des procédés 1- Lits de séchage planté pour les boues de type A, et 2- d'enfouissement contrôlé pour les boues de type B. Le rapport fournit des éléments permettant d'asseoir un dimensionnement de ces deux procédés de traitement.

Remerciements

Meilleurs remerciements au CNRE, en particulier à Mme Félicitée REJO-FIENENA, Directrice, et l'équipe d'analyse, M Andriamalala RAJOELISOA et M Wega Léonard ASIMBOLARIMALALA, pour leur précision dans la réalisation des analyses et leur intérêt pour la thématique.

Merci tout particulièrement à M Xavier GRAS pour la coordination des partenaires, la gestion de l'équipe, pour sa vision constructive et les améliorations qu'il apporte à l'étude.

Merci également à Mme TIARISON Amélie pour la mise en œuvre consciencieuse du protocole de prélèvement et de suivi du pilote, ainsi qu'à M RAJARIZAFIARISON Guillaume Ernest pour ses appuis ponctuels.

1 Introduction

La Commune Urbaine de Tamatave, appuyée par les ONG PROTOS et PRACTICA a bénéficiée en 2012 d'une étude de faisabilité sur la gestion des boues de vidange dans la ville¹. Cette première étude montre la nécessité et la faisabilité d'un assainissement par gestion des boues de vidange via la mise en place de services adaptés et à moindre coût pour la collecte, le transport et le traitement des matières de vidange issues des latrines traditionnelles et fosses septiques de la ville.

Selon les recommandations de cette étude, les caractéristiques des matières à traiter et leur capacité à sécher dans un climat local humide et très pluvieux devaient faire l'objet d'une analyse plus poussée, avec l'objectif de préciser le type de traitement adapté et ses bases de dimensionnement. Le présent rapport vise à apporter les précisions suivantes :

- Précision du climat à Tamatave et de son influence sur le séchage des boues
- Complément de la caractérisation des boues de vidange de la ville
- Etablissement des temps de séchage des boues en condition locale et proposition de valeurs de charge admissible sur lits de séchage

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet global « Mise en place d'un système intégré de gestion des boues de vidange pour la commune urbaine de Tamatave » dont le volet traitement est financé par l'Agence de l'Eau Adour Garonne et la Communauté de Commune des Terrasses et Vallées de l'Aveyron.

2 Matériels et méthodes

L'étude comporte trois composantes :

- Analyse du climat local au regard du potentiel de séchage (pluviométrie et évaporation)
- Caractérisation physicochimique des matières de vidange de la ville en saison des pluies
- Tests de séchage de boues locales

Ces 3 composantes ont été mises en œuvre du 11 février au 26 avril 2013.

2.1.1 Organisation et collaborations

Le travail est organisé et coordonné par PRACTICA, qui emploie une équipe locale pour les prélèvements de boue, la mise en œuvre du pilote et le suivi du test de séchage.

Le CNRE est en charge de la réalisation des analyses des boues.

Les relevés météorologiques sont fournis par le Ministère des travaux Publics et de la Météorologie.

2.2 Analyse climatique

Cette analyse a pour but de caractériser les conditions climatiques locales susceptibles d'influencer le séchage des boues en extérieur. Elle s'effectue sur la base des données suivantes :

¹ Assainissement des excréments dans la ville de Tamatave - Analyse de la gestion des boues de vidange et propositions d'améliorations – Practica, novembre 2012

- Données générales sur la température, pluviométrie et humidité (moyennes mensuelles) présentées en annexe I.
- Relevés pluviométriques journaliers pour l'année 2012

La capacité évaporatoire locale est caractérisée par la différence entre pression de vapeur saturante et pression de vapeur de l'air. Les pressions de vapeur sont estimées par le diagramme de Mollier à partir des températures et hygrométries moyennes locales. La vitesse du vent n'est pas prise en compte.

2.3 Caractérisation physico- chimique des boues de vidange

La caractérisation des matières a pour but de préciser leur composition en vue du dimensionnement de la station de traitement. Elle s'opère durant le pic de la saison des pluies afin de compléter les données relevées en 2012. Elle s'effectue en 2 phases :

- Campagne de prélèvement des boues dans les quartiers
- Analyse au laboratoire des échantillons prélevés

2.3.1 Organisation de la campagne de prélèvement

De manière à effectuer un échantillonnage représentatif des matières qui seront vidangées par le service de vidange, 22 prélèvements ont été réalisés dans le centre urbain pour compléter les prélèvements 2012. Les prélèvements sont réalisés en zones urbaines denses, dans les arrondissements de Ankirihiry et Morarano, plus précisément dans les quartiers Salazamay Ambohijafy Andarnomadio Valpinson Cité Haras et Analankininina (image ci-dessous). Dans ces quartiers, les latrines et fosses pour prélèvement sont choisies avec la préoccupation de varier les environnements physiques (zone basse vs zone haute) et de privilégier les latrines et fosses pleines à 75 % minimum.

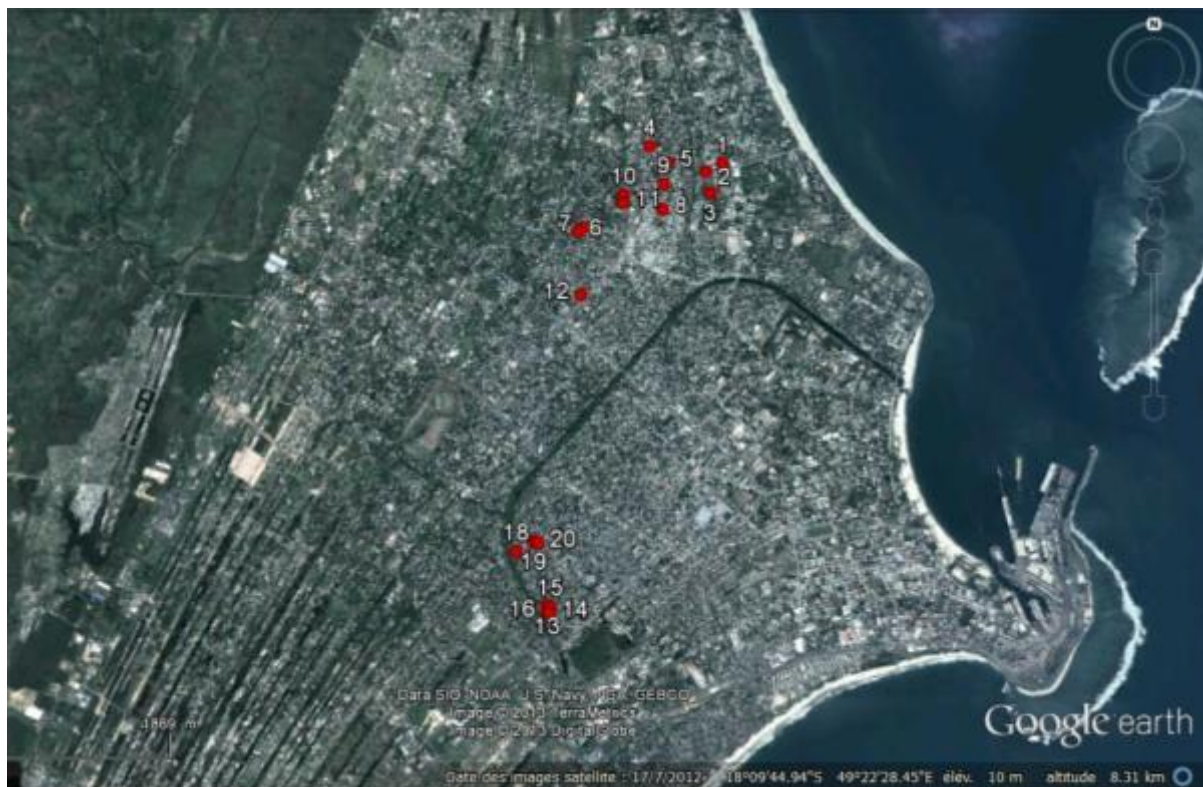


Figure 1 : emplacement des prélèvements 2013

Un repérage géographique des points de prélèvements est présenté en annexe II ainsi que la liste des informations relatives aux prélèvements.

2.3.2 Mode de prélèvement

Le mode de prélèvement de la boue est celui mis au point lors de l'étude 2011 Majunga² à l'aide d'une grande « seringue » de prélèvement construite à cet effet.

Les prélèvements ont été effectués dans le premier mètre de profondeur de manière à être représentatifs d'une vidange manuelle ou mécanique, et après agitation de la zone. La profondeur précise de prélèvement est à l'appréciation de l'équipe de prélèvement, selon les observations réalisées sur place sur la profondeur réelle de la latrine (parfois inférieure à 1 m).



Figure 2 : dispositif de prélèvement des boues

2.3.3 Paramètres analysés et protocoles

Les échantillons sont stockés dans des bocaux dans un endroit frais et ombragé, avant d'être transportés à Antananarivo pour analyse au CNRE selon le protocole mis au point par le CNRE, inspiré de la recommandation canadienne d'analyse de boue et décrit en annexe III. Les paramètres analysés sont Matière Sèche (MS) et Matières Volatiles (MV)

2.4 Test de séchage

Le test de séchage a pour objectif d'observer le séchage de boues représentatives de la ville pendant les mois les plus pluvieux, conditions réputées défavorables au séchage non couvert en extérieur. Le résultat doit permettre de définir les bases de dimensionnement d'un traitement par lits de séchage dans les conditions locales, la bibliographie fournissant des valeurs moyennes ou issues d'un contexte climatique donné.

2.4.1 Dispositif

Le dispositif mis en place est constitué de 2 lignes de 10 tubes remplis de gravier fin, surmontés par une petite couche de sable et très largement drainés à leur base, afin que chaque tube modélise un lit de séchage miniaturisé. Les deux lignes sont placées en extérieur. L'une est couverte par un toit (pour éviter l'introduction de la pluie) et l'autre est laissée à ciel ouvert.

² Assainissement de la ville de Mahajanga, Situation existante, Zonage et priorités d'action – Dodane P-H ; 2010 – IRCOD, Ville de Mahajanga



Figure 3 : photo du dispositif pilote en construction



Figure 4 : photo du dispositif pilote

Caractéristiques de chaque ligne :

- Tranchée de 2 m de long, 40 cm de large et 30 cm de profondeur
- Remplissage en gravier fin de granulométrie adaptée
- 10 morceaux de tube PVC diamètre interne 127 de 30 cm de long ($S=0,01266 \text{ m}^2$)
- Protection du ruissellement par des formes de pente aux alentours
- Talutage des parois des tubes pour minimiser l'effet thermique au niveau des parois

Le site pilote est également équipé d'une bassine carrée de 50 cm de côté et de 30 cm de profondeur pour le suivi du bilan hydrique selon la méthode des bacs d'évaporation. La bassine est enterrée dans le sol pour se rapprocher des conditions des lits de séchage pilotes.

2.4.2 Protocole de suivi

Le suivi consiste à appliquer une hauteur théorique de boue de 5 cm dans chaque tube et d'observer l'évolution des paramètres suivants jusqu'à ce que le séchage suffisant soit constaté :

- Hauteur de boue dans les tubes
- Hauteur d'eau dans le bac Colorado
- Signes visuels de séchage, de type fissuration, décollement, changement de couleur (suivi photographique et descriptif)
- Matières sèches (degré de séchage) et Matières volatiles (degré de minéralisation), sur la base de carottages effectués judicieusement dans les tubes
- Bilan hydrique à travers le relevé du bac d'évaporation

La hauteur d'application de 5 cm est choisie pour permettre une durée de séchage courte (espérée de l'ordre de 15 jours) facilitant l'obtention de conclusion dans la durée allouée au projet.

La date où les boues peuvent être considérées comme sèches est notée. Est considérée comme sèche la boue qui peut être facilement évacuée manuellement (pétable, qui se détache facilement du lit de sable, sans accrocher la couche de matériaux filtrants).

Une attention particulière est portée sur :

- la réalisation de carottes en milieu aqueux, humide et sec, qui reste représentatif de toute la hauteur de la couche de boue et libéré des grains de sable agglomérés en zone inférieure
- le conditionnement et stockage des carottes avant analyse
- la remise à niveau journalière du bac d'évaporation

2.4.2.1 SUIVI PHASE 1

La PHASE 1 a pour objectif de définir le temps de séchage de 2 boues types de Tamatave, l'une réputée représentative des boues de dispositifs maçonnés (fosses septiques et fosses « Saint Gabriel ») et l'autre des latrines traditionnelles (coffrage simple en fûts et pneu notamment).

Le protocole PHASE I consiste à observer le séchage de ces deux boues en leur appliquant une séquence de pluie artificielle représentative de la saison des pluies à Tamatave.

| | MS (%) | MV (% MS) | Nb tubes |
|--|--------|-----------|----------|
| Suivi pluies simulées | | | |
| Boue A <i>Représentative dispositifs maçonnés</i> | 9 | 65 | 6 |
| Boue B <i>Représentative dispositifs non maçonnés</i> | 28 | 30 | 4 |

Tableau 1 : éléments du protocole PHASE 1

Ces boues A et B sont confectionnées en mélangeant des échantillons prélevés afin d'obtenir des caractéristiques (MS et MV) proche des moyennes mesurées dans la ville.

La séquence de pluie appliquée est réputée représenter une séquence de pluie caractéristique de Tamatave (hors longues séquences de pluies de plus de 3 jours consécutifs) avec des épisodes moyens de 15 mm/jour, une fréquence de pluie de 50%, un épisode très intense et des périodes sèches, pour une pluviométrie mensuelle moyenne de 500 mm.

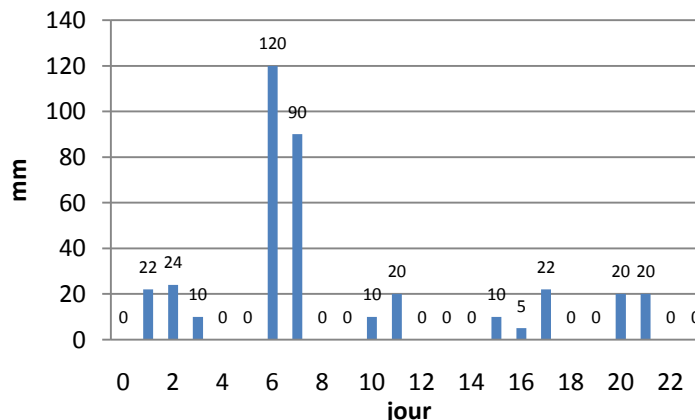


Figure 5 : séquence de pluie artificielle appliquée, Tmoy = 26°C

Pendant la mise en œuvre de cette phase, la pluviométrie à Tamatave connaît une séquence de 6 jours de pluies (jours 5-11). On note en particulier que les voiries d'accès à proximité du site pilote sont inondées pendant 2-3 jours. Le taux d'hygrométrie est supposé élevé à cette période.

2.4.2.2 SUIVI PHASE 2

La PHASE 2 a pour objectif d'approfondir la connaissance des mécanismes de séchage selon les caractéristiques des boues, par temps sec et par temps de pluie. Ces éléments pourront permettre de préciser les résultats de la PHASE 1 avec des boues de caractéristiques diverses.

Le protocole PHASE 2 consiste à observer le séchage de 10 boues de Tamatave de caractéristiques différentes (concentration, degré de digestion, présence ou non de sable). Ces 10 échantillons alimentent la ligne couverte et la ligne à ciel ouvert.

| N° tube | Nb lignes | MS (%) | MV (% MS) | Observations | Origine |
|---------|-----------|--------|-----------|--|------------------------------|
| 1 | 2 | 72 | 4 | Pâteux - Présence de sable en grande quantité | Fosse maçonnée |
| 2 | 2 | 28 | 50 | Pâteux | Latrine traditionnelle |
| 3 | 2 | 14 | 59 | Pâteux | Latrine traditionnelle |
| 4 | 2 | 24 | 43 | Pâteux - Présence de fibres végétales en grande quantité | Latrine traditionnelle |
| 5 | 2 | 2 | 81 | Liquide | Fosse maçonnée |
| 6 | 2 | 3 | 85 | Liquide | Fosse maçonnée |
| 7 | 2 | 6 | 68 | Liquide | Fosse maçonnée |
| 8 | 2 | 51 | 10 | Présence de sable et de charbon en grande quantité | Latrine traditionnelle |
| 9 | 2 | 9 | 76 | | Composite (pâteux + liquide) |
| 10 | 2 | 12 | 59 | | Composite (pâteux + liquide) |

Tableau 2 : caractéristiques des boues séchées en PHASE 2

Des pluies naturelles sont reçues pendant la durée du test, mais sans épisode intense, et avec très peu de pluie pendant la première semaine de séchage, particulièrement faible pour une saison des pluies à Tamatave, pour une pluviométrie mensuelle moyenne de 340 mm. La température moyen durant le suivi est de 27 °C.

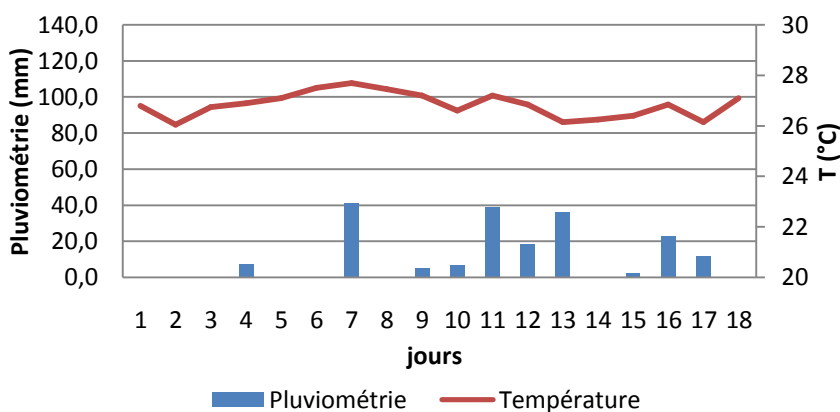


Figure 6 : pluviométrie et température pendant le suivi PHASE II

Pendant la mise en œuvre de cette phase, la pluviométrie à Tamatave est donc faible, en particulier la première semaine de séchage. Par conséquent le taux d'hygrométrie est supposé plus bas que la moyenne à cette période.

3 Résultats et Discussion

3.1 Analyse climatique

3.1.1 Vue générale

Le climat de Tamatave se caractérise par 2 saisons.

La saison des grandes pluies, chaude et pluvieuse, de novembre-décembre à avril, caractérisée par :

- Température moyenne journalière de 25°C
- Pluies abondantes et fréquentes (jusqu'à 600 mm/mois)
- Ensoleillement de l'ordre de 7 h/jour

La saison des petites pluies (moins chaude et moins pluvieuse), de mai à octobre-novembre, caractérisée par :

- Température moyenne journalière est de l'ordre de 21,5°C
- Pluie moins abondante et moins fréquente (pluviométrie mensuelle à partir de 100 mm/mois)
- Ensoleillement de l'ordre de 6 h/jour

Pour ces deux saisons, l'humidité est de l'ordre de 85 % sans fluctuation significative au cours de l'année.

Sur la base de ces données moyennes, l'évaporation peut être estimée comme légèrement supérieure en saison des grandes pluies, qu'en saison des petites pluies, de l'ordre 10 %, sur la base de températures et taux d'humidité et tout paramètre égal par ailleurs. Considérant de plus l'ensoleillement supérieur, la saison des grandes pluies apparaît la plus favorable à l'évaporation.

3.1.2 Précision du type de pluviométrie

Une analyse plus fine de la pluviométrie est réalisée sur la base des relevés 2012.

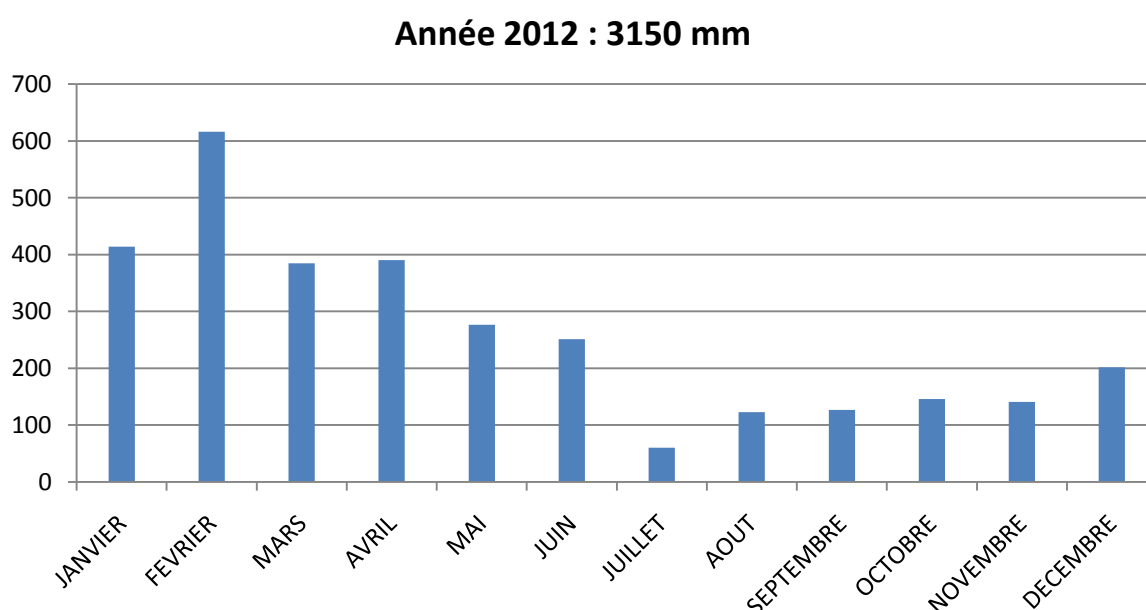


Figure 7 : bilan pluviométrique année 2012 (mm/mois)

Le relevé pluviométrique de l'année 2012 n'est pas représentatif pour le mois de juillet car les relevés sont incomplets ce mois là (70 % de journées sans mesure).

Le relevé fait apparaître de nombreuses mesures journalières faibles (< 2 mm), ce qui pourrait être assimilé à de la condensation étant donné le caractère très humide de l'environnement

En saison des grandes pluies :

- Fréquence de pluie jusqu'à 3 jours sur 5 (60 % des jours)
- Séquence de pluie type caractérisée par 3-4 jours de pluie d'intensité moyenne de l'ordre de 30 mm/jour puis de 2-3 jours de temps sec (ou très faiblement pluvieux)
- Les séquences de pluies peuvent parfois durer plus de 5 jours (1 séquence de 10 jours consécutifs entre février et mars 2012)
- Les épisodes pluvieux peuvent présenter des intensités parfois très fortes (100 mm)

En saison des petites pluies :

- Fréquence de pluie de 2 jours sur 5 (40% des jours)
- Intensité des épisodes plus basse, de l'ordre de 10 mm/jour
- Episodes forts rares
- Existence de longues séquences de pluie (> 5 jours consécutifs)

On constate également que les valeurs de température 2012 sont plus élevées que les moyennes générales, avec une température moyenne de 26,5 °C en saison des grandes pluies et 22,7 °C en saison des petites pluies.

Les épisodes pluvieux ne sont pas particulièrement de type orageux et ont lieu de jour comme de nuit.

3.1.3 Conclusion

Le climat de Tamatave est de type tropical humide avec une pluviométrie élevée tout au long de l'année, en particulier de décembre à avril, avec des épisodes de pluie fréquents et des séquences de pluie qui peuvent être longues (> 5 jours consécutifs). Ces conditions ne sont pas des plus favorables à un séchage non planté à ciel ouvert. Néanmoins les périodes sans pluies de quelques jours sont fréquentes.

La période la plus favorable à l'évaporation est aussi celle où il pleut le plus.

3.2 Caractérisation des boues

3.2.1 Résultats (campagnes de mesure 2012 et 2013)

Le tableau suivant présente une synthèse des analyses sur les campagnes de mesure 2012 (n=33) et 2013 (n=18). Les 51 prélèvements présentent des concentrations allant de 3 à 1200 g MS/L pour des taux de matière volatile allant de 4 à 85 %.

Tableau 3 : résultats des analyses de boues prélevées en 2012 et en 2013

| | Moyenne | Ecart type |
|-----------|---------|------------|
| MS (g/L) | 235 | 250 |
| MS (%) | 19.5 | 17 |
| MV (% MS) | 54 | 24 |

Les mesures des 2 années sont similaires, la principale différence étant la variabilité plus importante des concentrations lors de la campagne de mesure 2013. On distingue notamment une différence de caractéristique selon l'origine du prélèvement. Comme le montre la figure suivante, les boues de type A originaires de dispositifs maçonnés (fosse

septique et fosse « Saint Gabriel ») sont moins concentrées que les boues de type B issues des dispositifs non maçonnés (latrines traditionnelles sur coffrage habituel en fût ou en pneus). Leurs concentrations respectives sont de 12 % MS 64 % MV et 28 % MS 42 % MV.

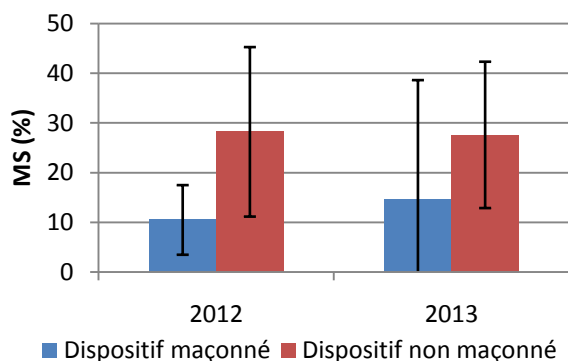


Figure 8 : concentration en MS selon le dispositif et la campagne de mesure

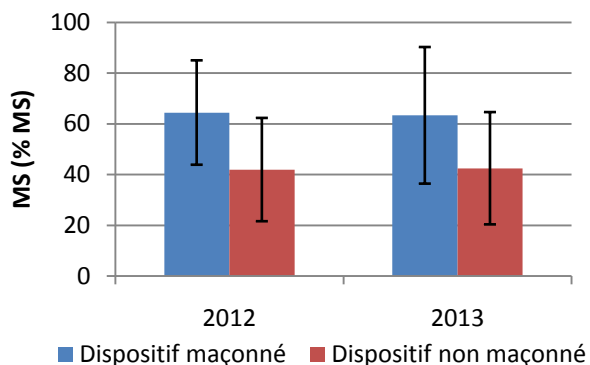


Figure 9 : concentration en MV selon le dispositif et la campagne de mesure

On observe une corrélation forte entre le taux de matières volatiles et les concentrations en matière sèche. Plus une boue de Tamatave est concentrée, moins elle contient de matière volatile (figure ci-contre). Les concentrations en matière sèche les plus élevées semblent être dues à la présence de matières minérales non fécales comme du sable ou du charbon. C'est aussi ce que l'observation visuelle tend à confirmer.

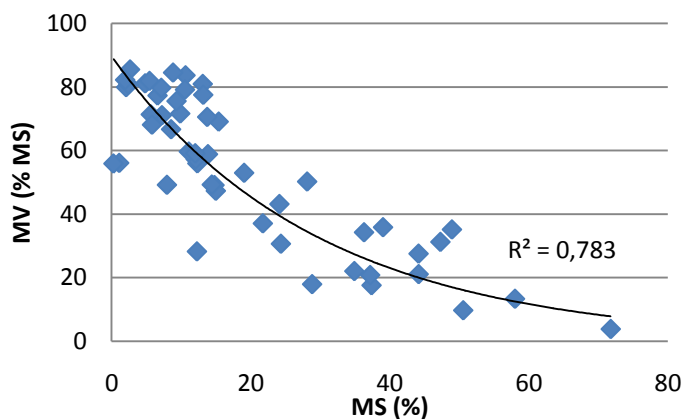


Figure 10 : corrélation entre matière sèche et taux de matière volatile

3.2.2 Conclusion

Bien que les boues de Tamatave soient très disparates, on peut distinguer les boues en provenance des dispositifs non maçonnés et en provenance de dispositifs maçonnés. Les boues issues des latrines traditionnelles sont très concentrées (28 % MS). Compte tenu de leurs petites tailles (rapportée entre 200 et 500 L dans l'étude 2012), on peut supposer qu'elles soient moins digérées. Leur très faible taux de matière volatile peut s'expliquer par une forte présence de matière minérale non fécale, en particulier du sable provenant du sol (sable). Les boues en provenance des dispositifs maçonnés contiennent aussi du sable, en quantité moins importante. Elles sont moins concentrées (12 % MS) et on peut supposer que la matière organique y est plus digérée.

3.3 Tests de séchage

3.3.1 Résultats phase 1

Les figures suivantes présentent l'évolution des paramètres de suivi (épaisseur de la couche de boue ; siccité ; taux de matière volatile) au cours du séchage pour les 2 boues types.

Boue A : représentative des boues issues des dispositifs maçonnés, MS=9%, MV=65%

Boue B : représentative des boues issues des dispositifs non maçonnés, MS=28%, MV=30%

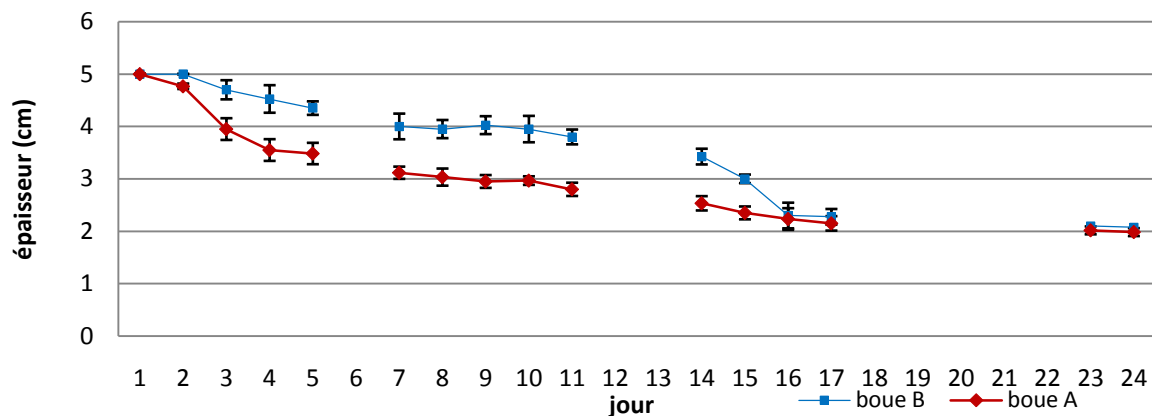


Figure 11 : évolution de l'épaisseur des boues A et B

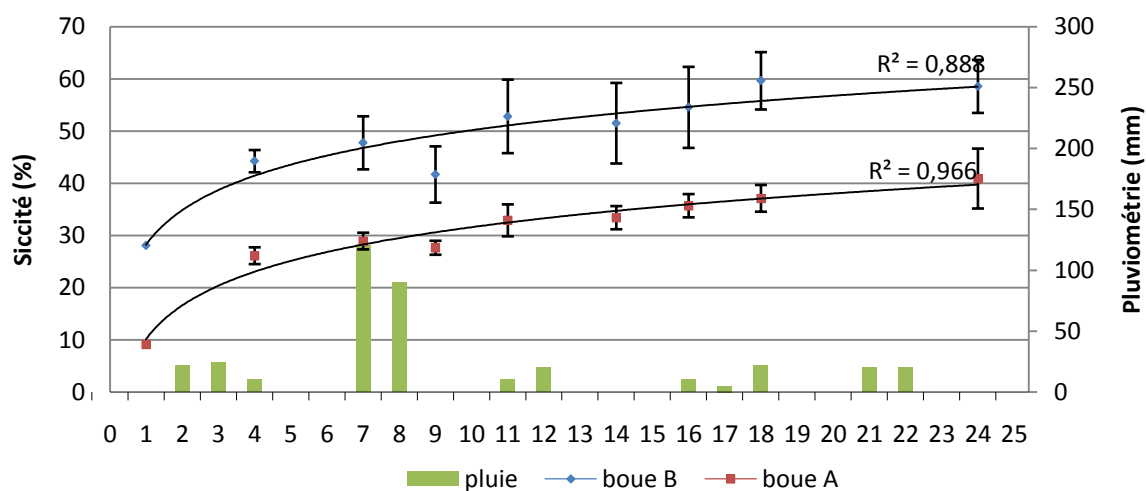


Figure 12 : évolution de la siccité des boues A et B

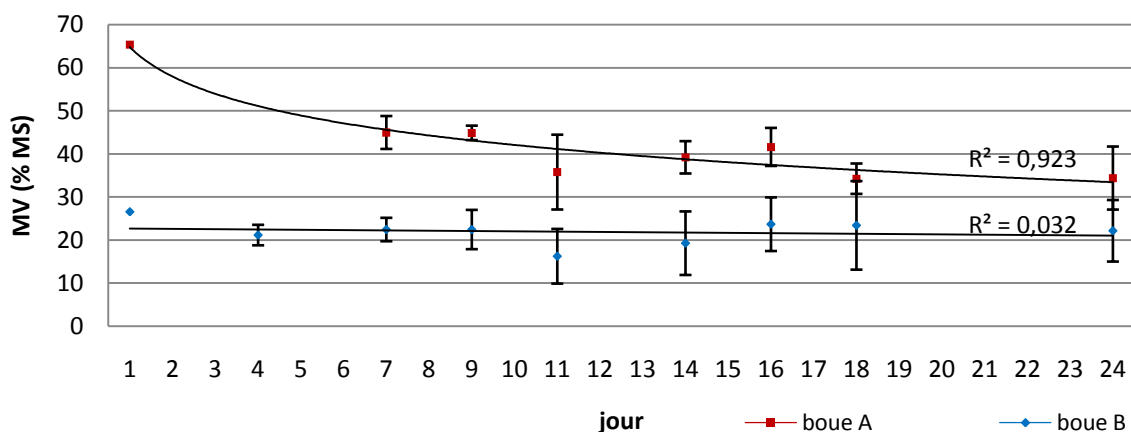


Figure 13 : évolution du taux de MV des boues A et B

La période de suivi se caractérise par un taux d'évaporation mesuré (bac d'évaporation) relativement faible de 1.65 mm/jour.

On observe une diminution de l'épaisseur de la couche de boue au cours du séchage de 60% en 25 jours.

Les vitesses de séchage des deux boues sont similaires. En 25 jours, les siccités atteignent 40 % et 60 % pour les boues A et B. On note l'impact des épisodes pluvieux intenses en fin de 1^{ère} semaine de séchage qui diminue la siccité du jour suivant.

On constate enfin une diminution progressive du taux de matière volatile dans la boue A, de l'ordre de 45 % en 25 jours, soit une vitesse de minéralisation de l'ordre de 2% MS /jour. La boue B présentant un taux de matière volatile initialement très bas (présence de matière minérale d'origine non fécale de type sable ou cendre), sa minéralisation n'apparaît pas, ou bien très faiblement, au cours du séchage.

A l'issue des 25 jours de suivi, les boues sont à l'état solide, compactes, mais ne peuvent pas tout à fait être considérées comme bien sèches (critère de facilité de décollage du lit de sable/gravier). Les charges applicables à Tamatave en temps de pluie sont donc :

- Légèrement inférieur à 65 kg/m²/an pour la boue A
- Légèrement inférieur à 210 kg/m²/an pour la boue B

3.3.2 Résultats phase 2

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus dans les 2 lignes de lits de séchage pilotes, couverte et à ciel ouvert (évolution de l'épaisseur de la couche de boue ; temps de séchage). Une planche photographique est présentée en annexe IV.

| N° | Initial | | Couvert | | Ciel ouvert | |
|----|---------|------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| | MS | MV | Temps séchage | Charge admise | Temps séchage | Charge admise |
| | % | % MS | jour | kg/m ² /an | jour | kg/m ² /an |
| 1 | 72 | 4 | 19 | 833 | 20 | 719 |
| 2 | 28 | 50 | 10 | 620 | 7 | 689 |
| 3 | 14 | 59 | 10 | 306 | 9 | 278 |
| 4 | 24 | 43 | 10 | 532 | 9 | 484 |
| 5 | 2 | 81 | 10 | 54 | 7 | 60 |
| 6 | 3 | 85 | 11 | 54 | 7 | 65 |
| 7 | 6 | 68 | 11 | 117 | 9 | 117 |
| 8 | 51 | 10 | 10 | 1115 | 8 | 1115 |
| 9 | 9 | 76 | 11 | 187 | 9 | 187 |
| 10 | 12 | 59 | 10 | 221 | 11 | 204 |

Tableau 4 : temps de séchage et charges admises correspondantes³

³ Inclus un temps de 2 jours supplémentaire pour permettre le curage des boues séchées

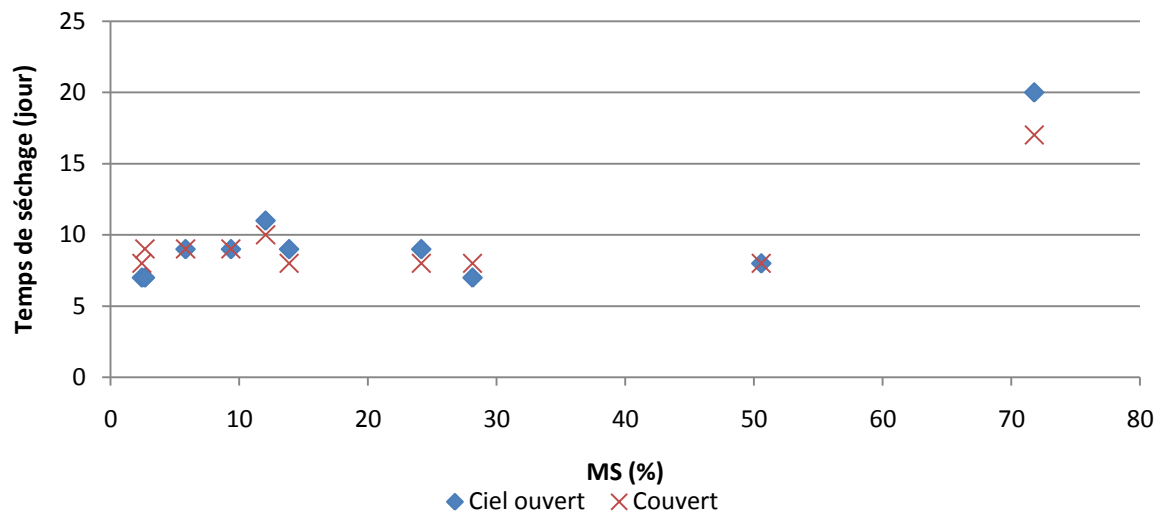


Figure 14 : nombre de jours de séchage nécessaire avant enlèvement, selon les concentrations initiales

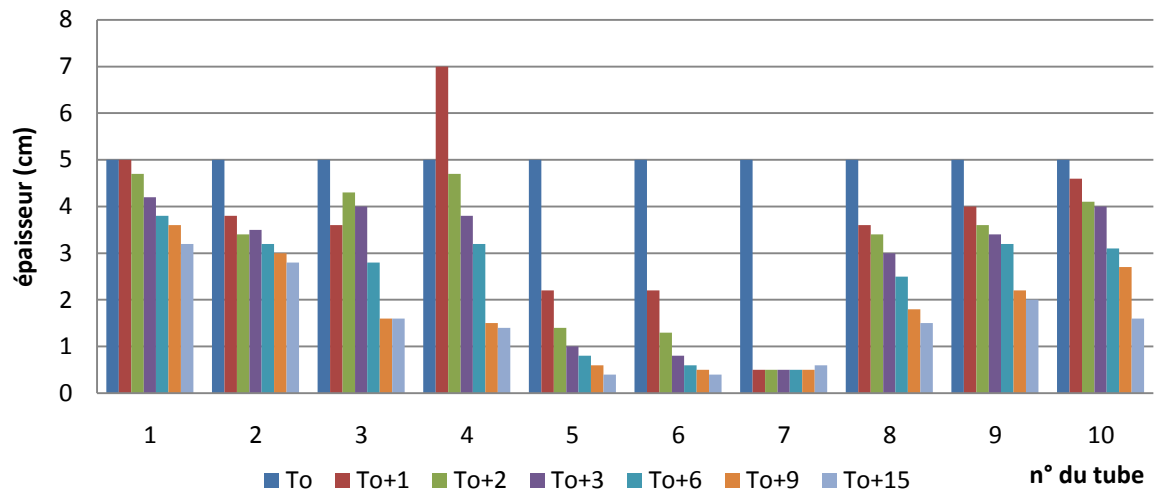


Figure 15 : évolution de l'épaisseur de la couche sur 15 jours – suivi couvert

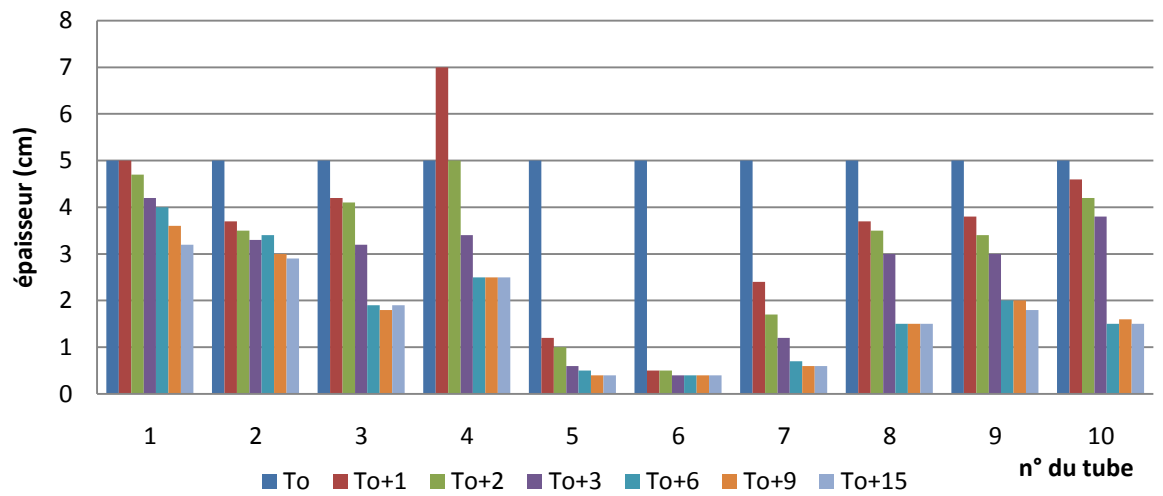


Figure 16 : évolution de l'épaisseur de la couche sur 15 jours – suivi à ciel ouvert

La période de suivi se caractérise par un taux d'évaporation (mesuré lors qu'il ne pleut pas via le bac d'évaporation) de 2 à 3 mm/jour, ce qui représente des conditions favorables pour le séchage à Tamatave.

On constate les points suivants :

- Il faut en moyenne 10 jours pour sécher les boues que ce soit en zone couverte ou à ciel ouvert. Le séchage à ciel ouvert est plus rapide pendant la 1^{ère} semaine du suivi, quand il ne pleut pas ou peu (la toiture réduit l'évaporation). Le séchage devient plus rapide pendant la 2^e semaine de suivi lorsqu'il pleut de manière plus conséquente.
- L'influence de la toiture en deuxième semaine reste néanmoins faible, tout au moins si les boues ont déjà suffisamment séché. L'influence de la pluie semble faible lorsque les boues présentent un craquellement (déshydratation par infiltration sans doute plus rapide).
- Les boues des tubes 3 9 et 10 ont des caractéristiques similaires aux boues de Tamatave issues de dispositifs maçonnés. Soumises à de très faibles pluies ou en milieu couvert, elles sèchent en une dizaine de jours, pour une charge sécuritaire appliquée de 200 à 300 kg/m²/an. Les volumes sont réduits de 65 % après 15 jours de séchage.
- Les boues des tubes 2 et 4 ont des caractéristiques similaires aux boues de Tamatave issues de dispositifs non maçonnés. Soumises à de très faibles pluies ou en milieu couvert, elles sèchent en moins d'une dizaine de jours, pour une charge sécuritaire appliquée de 500 à 600 kg/m²/an. Les volumes sont réduits de 50 % après 15 jours de séchage et ne semblent plus pouvoir beaucoup diminuer (compact et sec).
- Les charges surfaciques appliquées sont plutôt grandes en comparaison des valeurs de la littérature (entre 100 et 200 kg/m²/an) pour les boues initialement très concentrées (tubes n° 1, 2, 4 et 8), ce qui peut être expliqué par la présence de matière minérale non fécale (sable et charbon) en forte quantité dans ces échantillons là.
- L'épaisseur de la couche peut augmenter dans les 2 premiers jours (phénomène d'émulsion ?).
- Les boues peu concentrées (2-6 % MS) voient leur épaisseur diminuer rapidement avec l'évacuation de l'eau libre par drainage. Le volume drainé pour les boues liquides est de l'ordre de 70 % du volume initial.
- Les siccités atteintes lorsque les boues peuvent être décollées facilement varient beaucoup (de 50 à 90 %) selon que l'échantillon contient beaucoup de sable/charbon. La siccité n'est pas un indicateur du degré de séchage de la matière fécale lorsque celle-ci contient une part significative de matière minérale rapportée.

4 Conclusion

L'augmentation progressive des siccités des boues lors du test PHASE 1 montre que le séchage est possible y compris dans les conditions très humides de Tamatave. Néanmoins il implique des temps de séchage importants (de l'ordre et supérieur à 1 mois y compris avec des lame déversées faible -5 cm-) et donc des surfaces de séchage importantes.

Le climat de Tamatave ne se prête pas particulièrement au séchage non planté en raison d'une forte pluviométrie et d'un taux d'humidité élevé (85% en moyenne mensuelle toute l'année). L'application du diagramme de Mollier montre en effet que l'évaporation à T=27°C est 2,5 moindre lorsque le taux d'humidité passe de 75 à 85 %, tout autre variable restant identique par ailleurs. Un facteur de 1.7 a d'ailleurs été constaté lors de l'étude entre la phase 1 (taux d'humidité élevé) et la phase 2 (temps sec).

Le séchage des boues sous toiture permettrait d'éviter la ré-humectation des boues mais ne permettrait de s'affranchir du taux d'humidité. Il nécessiterait donc aussi des surfaces de séchage importantes.

| | Boue type A (dispositifs maçonnés) | Boue type B (dispositifs non maçonnés) |
|--|---------------------------------------|---|
| Zone couverte ou à ciel ouvert, faible hygrométrie | 200-300 | 500-600 |
| Ciel ouvert, forte hygrométrie | < 65 | < 210 |
| Ciel ouvert, forte hygrométrie valeurs extrapolées | 55 | 175 |

Tableau 5 : Charge admissible sur lits de séchage non plantés (kg MS/m²/an)

Pour les boues de type A (plus liquides), la solution du lit de séchage planté semble mieux adaptée au climat au regard de l'absence de risque de stress hydrique des macrophytes utilisés dans le traitement. Sur la base d'une charge de 4.5 kg MS/m² par application, le temps de séchage avant une nouvelle application pourrait être compris entre 14 et 21 jours de manière à éviter d'une part le colmatage si la boue sur le lit n'est suffisamment déshydratée et d'autre part le stress hydrique des macrophytes si le séchage durait trop longtemps. Cela correspond à une charge admissible comprise entre 80 et 120 kg MS/m²/an.

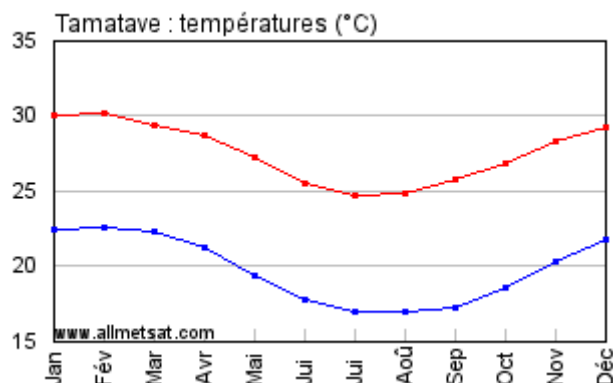
Pour les boues de type A et de moindre concentration (MS < 80 %) la fraction liquide drainable est de l'ordre de 65% du volume initial (MS < 80 %). On dénombre dans les prélèvements 11 échantillons de boues de type A et liquides, sur 25 boues de type A, soit environ 50%. Sur cette base, on peut estimer le volume percolé à 65% du volume admis par jour et 32.5% du volume admis par mois.

Les boues issues des dispositifs non maçonnés présentent une très faible percolation (voire nulle). L'intérêt d'effectuer une filtration sur lits de séchage est donc réduit, sauf à rechercher la réutilisation off-site. Sinon, l'enfouissement semble une option adaptée pour ces boues très concentrées et chargées en matières minérales non fécales. Dans ce cas un sol très perméable permettra de drainer les pluies fortement présentes dans le contexte de Tamatave. L'impact sur le sol et la nappe phréatique seront d'autant plus réduits que ces boues sont très pâteuses et ne percolent que peu ou pas. La réduction de volume après séchage est de l'ordre de 50 % (hors phénomène de compression si la couche est épaisse).

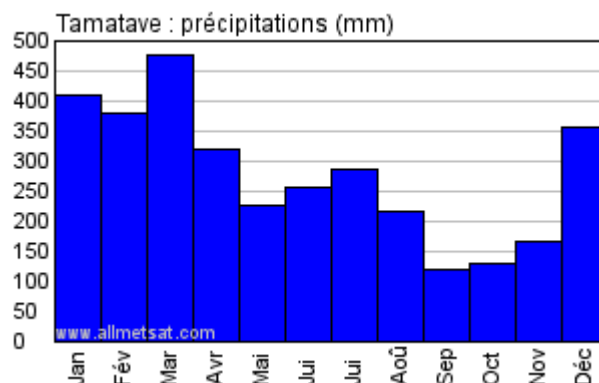
Points appris :

- La quantité de sable ou autre matière minérale rajoutée à la matière fécale influe significativement sur la valeur de siccité correspondant au décollage des boues et donc la charge admissible
- L'impact de la pluie est faible quand elle tombe sur une boue déjà sèche, ce qui est corrélé par l'observation : l'infiltration est visuellement plus importante sur boue craquelée que sur une boue encore flasque
- Le potentiel d'évaporation est paramètre influençant le temps de séchage de manière significative
- La variation du taux d'humidité de l'air à Tamatave apparaît influencer significativement le potentiel d'évaporation selon que le temps soit plutôt sec ou très pluvieux

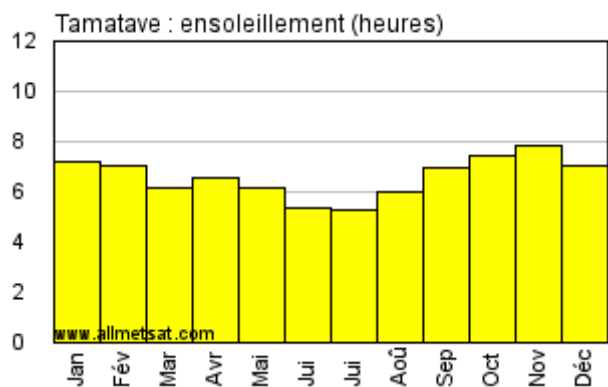
ANNEXE I : Données générales climatiques à Tamatave



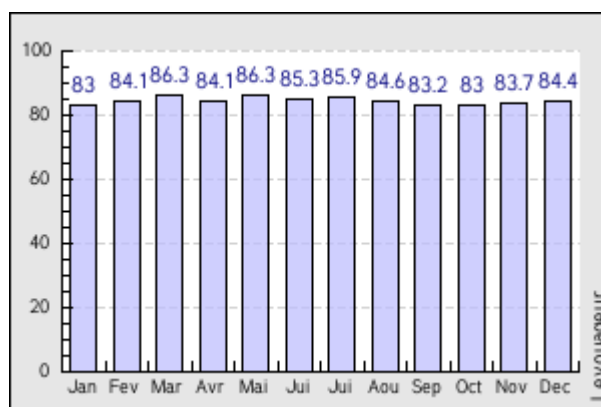
Moyenne mensuelle des températures minimales et maximales quotidiennes (°C)



Moyenne mensuelle des pluies (mm)



Moyenne mensuelle du nombre d'heures de soleil par jour



Moyenne mensuelle des taux d'hygrométrie (%)

Sources :

www.allmetsat.com

www.levoyageur.net

ANNEXE II : Localisation des points de prélèvement

| Date | N° | quartier | Arrond. | Coordonnées géographiques | Nbre usagers | Fréquence de vidange | Fqce d'inondation du terrain | Type du dispositif | Dimension | Profondeur |
|------------|----|--------------|-----------|--|--------------|----------------------|------------------------------|--|---------------------|------------|
| 23/02/2013 | 1 | Salazamay | Ankirihiy | S°18 07,849' E 049° 24.317 Alt 11m | 4 | Jamais | Jamais | Fosse septique | 1,20 m3 | 1 m |
| 23/02/2013 | 2 | Salazamay | Ankirihiy | S°18 07,886' E 049° 24.245 Alt 12m | 8 | Jamais | ? | Latrine traditionnelle | 0,98 m3 | 1,25 m |
| 23/02/2013 | 3 | Salazamay | Ankirihiy | S°18 07,973' E 049° 24.262 Alt 12m | 15 | Jamais | Jamais | Latrine traditionnelle | Deux barils de 250L | 2,40 m |
| 23/02/2013 | 4 | Ambohijafy | Ankirihiy | S°18 07,780' E 049° 24.011' Alt 3m | 15 | 6 mois | Intense pluie | Latrine traditionnelle | 1,2 m3 | 1,50 m |
| 23/02/2013 | 5 | Ambohijafy | Ankirihiy | S°18 07,848' E 049° 24.088' Alt 7m | 10 | Jamais | Jamais | Fosse septique | 1,44 m3 | 1,50 m |
| 25/02/2013 | 6 | Andarnomadio | Ankirihiy | S°18 08,131' E 049° 23.704' Alt 5m | 15 | Jamais | Jamais | Fosse septique | 1,32 m3 | 1,1 m |
| 25/02/2013 | 7 | Andarnomadio | Ankirihiy | S°18 08,112' E 049° 23.732' Alt 3m | 20 | Jamais | Souvent | Latrine traditionnelle (2pneus tracteur) | 0,377 m3 | 0,80 m |
| 25/02/2013 | 8 | Valpinson | Ankirihiy | S°18 08,039' E 049° 24.062' Alt 21m | 12 | Jamais | Jamais | Fosse septique | | 1,40 m |
| 25/02/2013 | 9 | Valpinson | Ankirihiy | S°18 07,936' E 049° 24.067' Alt m | 6 | Jamais | Grande pluie | Fosse septique | 0,144 m3 | 0,7m |
| 26/02/2013 | 10 | Andranomadio | Ankirihiy | S°18 07,980' E 049° 23.895' Alt 16 m | 18 | Jamais | Souvent | Fosse septique | 0,275 m3 | 1,1 |

| | | | | | | | | | | |
|------------|----|----------------|-----------|---|----|------------|---------|---------------------------|----------------------|---------|
| 26/02/2013 | 11 | Andarnomadio | Ankirihiy | S°18 08,012' E 049° 23.895' Alt 13m | 3 | 3 mois | Souvent | Latrine traditionnelle | 1 baril de 250 ml | 1,2 |
| 26/02/2013 | 12 | Cité Haras | Ankirihiy | S°18 08,385' E 049° 23.718' Alt 15m | 7 | Jamais | Jamais | Fosse septique | 0,96 m3 | 2 m |
| 07/03/2013 | 13 | Analankininina | Morarano | S°18 09,598' E 049° 23.577' Alt 15m | 15 | 2ans | Jamais | St Gabriel | | |
| 07/03/2013 | 14 | Analankininina | Morarano | S°18 09,624' E 049° 23.585' Alt 26m | 9 | 3sem-1mois | Jamais | Fosse traditionnelle | 1/2 Baril | 0,60 cm |
| 07/03/2013 | 15 | Analankininina | Morarano | S°18 09,600' E 049° 23.589' Alt -1m | 6 | 6semaines | Jamais | Latrine traditionnelle | 1/2 baril | 0,60 m |
| 07/03/2013 | 16 | Analankininina | Morarano | S°18 09,623' E 049° 23.580' Alt 3m | 10 | 3ans | Jamais | Fosse St Gabriel | | |
| 07/03/2013 | 17 | Ambalakisoa | Morarano | S°18 09,388' E 049° 23.443' Alt 6m | 9 | 6mois | Jamais | Fosse St Gabriel | | |
| 07/03/2013 | 18 | Analankininina | Morarano | S°18 09,388' E 049° 23.450' Alt 15m | 7 | Jamais | Jamais | Fosse St Gabriel | | |
| 07/03/2013 | 19 | Analankininina | Morarano | S°18 09,350' E 049° 23.521' Alt 11m | 3 | Jamais | Jamais | Latrine traditionnelle | 1/2 Baril | 0,60 m |
| 07/03/2013 | 20 | Analankininina | Morarano | S°18 09,356' E 049° 23.540' Alt 18m | 14 | 5 semaines | Jamais | Latrine traditionnelle | 1/2 Baril | 0,60 m |

Annexe III : Protocole d'analyse MS et MV

Après la lecture du protocole d'analyse de boues, provenant du centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, MA. 100-S.T.1.1. et compte tenu de la disponibilité des matériels, le mode opératoire suivant a été établi.

Prélèvement et prise d'essai

Le prélèvement de l'échantillon proprement dit au niveau des fosses étant effectué par des opérateurs à Toamasina (Avec un protocole bien défini). Une fois arrivé au Laboratoire de CNRE, l'analyse des échantillons doivent commencer le plutôt.

Matériel

a. Pour la prise d'essai

- une cuillère plastique de taille normale
- un récipient jaugé à 20ml à son bord
- Balance de précision
- un petite cuillère en plastique pour gratter le récipient
- marker permanent pour numéroter les capsules
- eau distillée

b. Passage à l'étuve à 105°C

- Etuve
- Capsule confectionné en aluminium de diamètre 8,5cm (diamètre permettant une occupation optimum de la surface du four à moufle existant : 6 capsule/bach). Un test à été effectué pour prouver la bonne tenue de la feuille d'aluminium : le résultat est satisfaisant car leur poids reste intact après passage au four à 550°C pendant 5 heures.
- Dessicateur



Echantillons après passage à l'étuve

c. Passage au four à 550°C

- Four
- Pince à longue manche, pour retirer les capsules
- Dessicateur

Modes opératoires

a. Pour la prise d'essai

La représentativité des échantillons est essentielle. Pour cela, les boues brutes doivent être mélangées énergiquement avec une cuillère et la prise d'essai doit être prélevée le plus rapidement possible après le mélange. Les grains de charbon de bois doit être tenu en compte dans cette prise d'essai vu que cela fait partie intégrante de l'échantillon. Un volume de 20ml est ensuite prélevé. Verser toute la quantité contenue dans le récipient de 20ml dans la capsule en aluminium à l'aide de petite cuillère en plastique.

Pour les échantillons provenant du suivi des tests de séchages, il faut être vigilant à la présence de grain de sable dans l'échantillon. En effet, il faut observer la présence de grains de sables au début de la manipulation. La totalité de l'échantillon mis en sachet est analysée et versée dans la capsule en aluminium.

Dans les deux cas, les matières doivent être étalé sur la sur toute la surface de la capsule afin d'avoir une petite épaisseur de boue.

Avant de verser les matières dans les capsules, ces dernières doivent être pesées et bien numérotées. Soit **A**, le poids en g de la capsule vide. Puis, peser de nouveau, le poids de la capsule contenant les matières, notons **B** ce poids.

b. Pour la détermination de MS

La matière étant mise dans la capsule en aluminium, et l'ensemble est introduit dans l'étuve réglée à 105°C. Attendre pendant une nuit, et vérifier que les matières sont entièrement sèches en profondeur et sur toute la surface. Ensuite, déposer les capsules dans le dessiccateur pendant 2h. Puis, peser et noter **C** le poids obtenu.

Ainsi :

$$\text{MS \%} = (\text{C}-\text{A}) \cdot 100 / (\text{B}-\text{A})$$

Ou bien,

$$\text{MS [en mg/L]} = (\text{C}-\text{A}) \cdot 10^6 / 20$$

Remarque : pour les échantillons provenant du suivi du test de séchage, les résultats seront forcément exprimés en %.

c. Pour la détermination de MV

Après leur séchage dans l'étuve, l'ensemble matières-capsule est introduit dans le four pour une durée de 2 heures à 550°C. Puis, on les refroidit 2h dans le dessiccateur et on pèse. Soit **D** ce poids en g.

Donc : $\text{MV (\% MS)} = (\text{C}-\text{D}) \cdot 100 / (\text{C}-\text{A})$

Remarque : pour les échantillons provenant du suivi du test de séchage, les résultats seront forcément exprimés en %.

Annexe IV : Suivi photographique Boue n°9 (phase II)

Caractéristiques initiales : 9% MS, 76% MV



Jour 0



Jour 1



Jour 2



Jour 3



Jour 6



Jour 7



Jour 8



Jour 9 (considéré sec)



Jour 15



Jour 16



Jour 17