

Amélioration technologique de la distillation d'huiles essentielles dans la région de DIANA - Madagascar

Rapport Etat des lieux (L2)

Mission à Madagascar du 10 au 24 Novembre 2019

CONTRAT N° 087/C/PIC2 2/2019 – SalvaTerra SAS



Décembre 2019

Rédacteurs :

- Jean-François ROZIS, Chef de mission, expert biomasse-énergie
- Anis CHAKIB, Backstopping

Sommaire

Liste des figures.....	4
Abréviations	5
Remerciements	6
Résumé exécutif.....	7
1. Contexte et objectifs de la mission	9
1.1. Contexte	9
1.2. Objectifs et limites de la présente mission	10
2. Programme et contenu de la mission « état des lieux » à Madagascar.....	12
3. Principaux types de dispositifs de distillation existants, accessoires et matériaux	14
3.1. Rappels du processus de distillation (cas de l'HE2Y).....	14
3.2. Présentation des trois grands types de dispositifs de distillation existants.....	15
3.3. Présentation des principaux types de cuves et accessoires.....	16
3.4. Classification des performances énergétiques.....	20
3.5. Capitalisation sur les technologies de distillation en contextes similaires et à Madagascar : Dispositifs à feu direct.....	21
3.5.1. Dispositifs à feu direct basique	22
3.5.2. Dispositifs à feu direct amélioré.....	24
3.5.3. Dispositifs à feu à large surface d'échange	26
3.5.4. 3.5.4. Dispositifs à feu direct – ailleurs dans le monde.....	28
3.6. Capitalisation sur les technologies de distillation en contextes similaires et à Madagascar : Dispositifs à génération de vapeur séparée.....	30
3.6.1. Chaudière vapeur 1 à 4 cuves – Tubes d'eau (AIM, autoconstruit Floramad, S2A).....	31
3.6.2. Chaudière vapeur 1 à 3 T/h débit vapeur : Tubes d'eau modèle chinois/	33
Tubes de fumées pour Bionerr	33
3.6.3. Chaudière vapeur mixte (bois/huile vidange) 0,2 T/h - Tubes de fumées	36
3.7. Initiatives sur les combustibles	37
3.8. Conclusion sur l'état des initiatives sur les combustibles	41
4. Eléments de contexte (Madagascar et focus Nosy Be)	42
4.1. Approvisionnement en matière verte	42
4.2. Approvisionnement en combustible	44
4.3. Ressources en eau	46
4.4. Maitrise du procédé de distillation	47
4.5. Services d'appui aux unités de distillation	48
4.6. Rôle des acteurs de la filière aval	49

5.	Identification des pistes pertinentes pour les filières HE à Madagascar	49
5.1.	Cahier des charges d'une unité de distillation d'HE performante en contexte malgache.....	50
5.2.	Besoin d'équipements pour les filières HE à Madagascar	55
6.	Choix opérationnels pour la phase de démonstration.....	56
6.1.	Choix du modèle prioritaire à prototyper	56
6.2.	Choix de l'équipementier pour la construction du prototype	58
6.3.	Choix du site pilote	59
7.	Éléments pour la mission de préparation de chantier	61
8.	Conclusion mission état des lieux	62
	Bibliographie.....	63

Annexes

Annexe 1 : Fiche de présence réunion GEHEM du 11/11/2019

Annexe 2 : Suivi distillation Larissa

Annexe 3 : Note de réflexion vision nationale

Liste des figures

Figure 1. Evolution des exportations d'huile essentielle d'ylang ylang de Madagascar (Source : GADDAS,-PIC2, 2019)	9
Figure 2. Estimation de la consommation en biomasse-énergie liée à la production d'huiles essentielles à Nosy Bé et évaluation des surfaces nécessaires à une production durable (Source : AUTEUR, 2019)	10
Figure 3. Valeurs et proportions relatives des exportations des divers types d'HE de Madagascar en 2018 (Source : GADDAS,-PIC2, 2019)	11
Figure 4. Carte de Localisation des unités de distillation visitées lors de la mission à Nosy Be (Source : AUTEUR, 2019)	13
Figure 5 Cartographie filière HE2Y aux Comores, Pierre Johnson Consulting, 2019.....	14
Figure 6. Schémas des trois grands types de dispositifs de distillation d'HE existants (Source : Enea Consulting).....	15
Figure 7. Tableau de classification des cuves de distillation pour l'HE d'ylang-ylang (Source : AUTEUR, 2019).....	16
Figure 8. Schéma d'une cuve type utilisée pour la distillation de fleurs d'ylang-ylang (Source : AUTEUR, 2019).....	16
Figure 9. Estimations des coûts de tôles en aluminium, inox et cuivre à Nosy Be en 2019 (Source : enquête AUTEUR, 2019).....	18
Figure 10. Données de conductivité et de diffusivité des matériaux acier galvanisé, aluminium, inox et cuivre (Source : AUTEUR, 2019)	18
Figure 11. Schéma de principe de cuve distillation patchouli en Indonésie avec la solution du passage de flamme en bas de cuve noyé dans l'eau d'hydro-vapodistillation (Source : AUTEUR, 2019)	19
Figure 12. Tubes échangeurs soudés en partie basse de cuve aux Comores (Source : AUTEUR, 2019)....	19
Figure 13. Schéma des principes de combustion bois bûche (Source : Winkelmann et Fao).....	30
Figure 14. Schéma de principe d'une chaudière vapeur à tubes d'eau	35
Figure 15. Tableau comparatif des coûts de différents types d'énergie à Nosy Be (Source : AUTEUR, 2019).....	37
Figure 16. Tableau de simulation économique pour la distillation de 100 kg d'ylang-ylang avec trois combustibles différents (Source : AUTEUR, 2019).....	37
Figure 17. Tableau d'analyse des rendements moyens de production de différentes espèces utilisées comme combustible (Source : CIRAD, 2010).....	39
Figure 18. Tableau comparatif des rendements de production et valeurs de production par hectare de différentes plantes à Madagascar (Source : AUTEUR, 2019)	43
Figure 19. Tableau comparatif de la consommation énergétique des distillations pour trois types d'HE à Madagascar (Source : AUTEUR, 2019)	43
Figure 20. Schéma de principe d'une proposition de version mixte par AIM, 2019.....	51
Figure 21 Schéma de principe unité de distillation feu direct à haute performance énergétique.....	57

Abréviations

CASEF : Croissance Agricole et Sécurisation Foncière

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CTHT : Centre Technique Horticole de Tamatave

EBE : Excédent Brut d'Exploitation

ESSA : École Supérieure des Sciences Agronomiques (Université de Tananarive)

FYDECO : Programme Filière Ylang-Ylang – Développement Écoresponsable (Initiative Développement aux Comores)

GEHEM : Groupement des exportateurs d'huiles essentielles de Madagascar

Hb : notation utilisée pour exprimer la teneur en eau du bois sur masse humide en pourcentage

HE : Huiles essentielles

HEFG : Huile essentielle de feuilles de girofle

HE2Y : Huile essentielle d'Ylang Ylang

ID : Initiative Développement

MEDD : Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD).

PIC2 : Pôles Intégrés de Croissance et Corridors

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu l'équipe du PIC2 qui a facilité l'organisation et le déroulement de cette mission d'étude. J'ai aussi fortement apprécié les partages avec le GEHEM qui a montré un réel dynamisme et un souhait de progresser rapidement sur les volets énergétiques.

Concernant le passage à Nosy Be, j'ai eu le plaisir de côtoyer les deux représentants du PIC2 en poste et tout particulièrement Tsiong Ho Tun Ken avec qui j'ai partagé de longs moments de visites et d'échanges. Je le remercie pour sa bonne humeur et son humour à toute épreuve.

Que l'ensemble des opérateurs soient remerciés pour ces moments d'échanges très ouverts et instructifs, pour m'avoir fait part de leur longue expérience et savoir-faire en distillation et tout particulièrement Félicien et Larissa qui ont accepté la réalisation d'un suivi instrumenté demandant un temps de préparation quelque peu fastidieux (pesée intégrale du bois & des fleurs, mesure des débits et températures, etc.) et souvent un flot de questions de mon côté.

Je tiens bien sûr aussi à remercier le bureau d'études SalvaTerra pour m'avoir confié ce travail et à saluer le niveau d'exigence dans le rendu qu'ils se sont fixés au quotidien.

Résumé exécutif

Compte tenu du contexte national particulier pour les filières HE de Madagascar avec l'injonction du MEDD de proposer à court et moyen terme des solutions tangibles pour réduire drastiquement le recours au bois non géré, la mission a donc suivi un double objectif :

- apporter des éléments de réflexion notamment sur les dispositifs pertinents à promouvoir et les pistes sur un approvisionnement durable en lien avec le GEHEM sur la base d'informations déjà disponibles et collectées durant la mission
- proposer une piste technologique pertinente pour le cas de Nosy BE i.e. la filière HE2Y et les modalités de prototypage en lien avec les équipementiers identifiés

Il a été défini un travail en 4 missions d'expertise :

- mission d'état des lieux (national et centré sur Nosy Be) sur une quinzaine de jours
- mission de préparation de chantier pour le prototype à valider à Nosy Be (10 jours)
- mission de construction prototype sur une vingtaine de jours
- mission de validation à Nosy Be et de recommandations pour contexte Nosy Be et national.

La mission a débuté par deux jours à Tananarive (11 et 12 novembre 2019) ayant permis de réaliser :

- une réunion de cadrage avec l'antenne du PIC2 à Tananarive, département *Agribusiness*,
- une réunion avec les représentants du GEHEM,
- une visite de deux unités de distillation : Floramad et Bioesoil.

Elle s'est ensuite poursuivie sur Nosy Be du 13 au 20 novembre 2019, avec un jour dédié à la visite de deux installations à Ambanja. Elle aura permis :

- de visiter et d'échanger avec les responsables d'une dizaine d'unités de distillations d'HE2Y de différentes typologies sur l'ensemble de la partie orientale de Nosy Be,
- de visiter et d'échanger avec les responsables de deux unités de distillation multi-produits sur Ambanja (Biolandes et S2A),
- de réaliser deux suivis instrumentés d'un cycle de distillation (un partiel et un complet),
- de rencontrer deux fabricants locaux de cucurbites en Inox et accessoires d'alambics (essencier, col de cygne et condenseur),
- d'échanger avec le représentant des Eaux et forêts de Nosy Be,
- de collecter des premiers prix de matériaux auprès des quincailleries locales.

La mission s'est ensuite achevée par deux jours ouvrés à Tananarive avec :

- une restitution orale à l'antenne de Tananarive du PIC2 avec production d'une note de recommandations sur stratégie générale à discuter avec MEDD,
- rencontre avec le directeur général du MEDD (M. RAKOTOVOLOLONALIMANANA Herizo) dans ses locaux avec les représentants du PIC2 – pole *Agribusiness*,
- une restitution orale et échanges avec les représentants du GEHEM,
- une visite de l'atelier d'AIM avec le responsable et la chargée commerciale,
- une visite du stand de vente des produits de BIONERR,
- une réunion d'échange avec l'antenne du PIC2 et la directrice Pays d'Initiative Développement Comores et Madagascar sur expérience FYDECO aux Comores.

Il a été possible de présenter les différentes initiatives existantes à Madagascar et en contexte similaire et de réaliser une catégorisation par principe de distillation et capacité de production des unités de distillation existantes pour identifier un pack de 4 grandes familles de dispositifs constructibles à

Madagascar à longue durée de vie et à coût maîtrisé avec leur gamme de puissance et options éventuelles :

- feu direct amélioré avec des performances minimales pour les petits producteurs en phase de professionnalisation (activité secondaire, faible capacité de production annuelle, difficulté à se regrouper)
- feu direct performant pour les producteurs de capacité petite à moyenne déjà professionnalisés (activité principale), rôle moteur sur leur zone (liens avec petits producteurs)
- chaudière vapeur de petite taille performante pour les producteurs de capacité petite à moyenne avec un niveau technologique adapté, préférence pour la vapodistillation ou avec une variété de produits à distiller,
- chaudière vapeur de grande taille optimisée pour les grosses unités avec des procédures d'audits énergétiques et de contrôle à systématiser

Une procédure de sélection multicritère a permis de prioriser le modèle feu direct performant pour la phase de prototypage à venir.

Cette vision est rendue possible (production locale, saut technologique en combustion biomasse) par la présence d'équipementiers expérimentés à capacité d'intervention nationale en lien si besoin avec des fabricants locaux pour la production d'éléments de chaudronnerie, de pièces mécanosoudées ainsi que des équipes d'installateurs à renforcer notamment sur la partie maçonnerie du bâti réfractaire. Cela apporte une garantie de pérennisation du transfert technologique et de la maintenance future des équipements installés.

La prochaine étape est la mission de préparation de chantier pour valider le choix du ou des équipementiers à impliquer dans la construction du prototype ainsi que le choix du premier site pilote où sera testé dans les conditions optimales cet équipement démonstratif pour les distillateurs, les technologues, les décideurs, les concepteurs de projets, etc.

1. Contexte et objectifs de la mission

1.1. Contexte

Le marché mondial des Huiles essentielles (HE) est en croissance durable depuis plus de vingt ans et devrait continuer à croître de 9,6 % entre 2017 et 2022 pour atteindre des valeurs de 27,5 milliards de \$US fin 2022.

La filière huiles essentielles est une des filières économiques du monde agricole les plus porteuses pour la région Diana¹ et à ce titre identifiée comme prioritaire par le Projet PIC2. Un diagnostic de la filière a été réalisé au préalable (cf. rapport Walid GADDAS, 2019) et a mis en évidence la nécessité d'une étude plus approfondie sur les aspects technologiques afin d'améliorer l'efficacité énergétique du processus de distillation.

Au vu de l'intérêt économique et social pour la région de Diana, le programme PIC2 avec son département *Appuis au volet Agribusiness* a décidé de concentrer une partie de ses moyens mobilisables sur l'accompagnement de la filière HE d'Ylang Ylang (HE2Y) sur Nosy Be pour assurer sa pérennisation et accroître son positionnement qualitatif face aux clients potentiels.

Comme l'indique la figure suivante, la production d'HE2Y sur la région de Diana et notamment sur l'île de Nosy Be a augmenté sensiblement ses dernières années, passant d'environ 29 t en 2013 à près de 93 t en 2018.

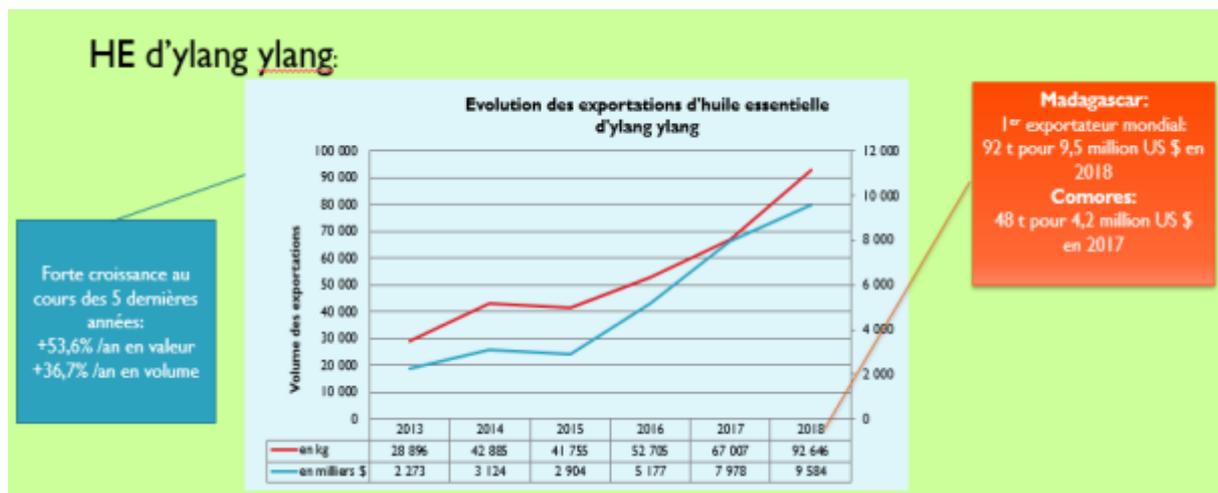


Figure 1. Evolution des exportations d'huile essentielle d'ylang ylang de Madagascar (Source : GADDAS,-PIC2, 2019)

Compte tenu des fortes consommations en bois-énergie évaluées communément, autour d'1m³/L d'HE et du fait que la plupart des prélèvements en bois se font généralement sans gestion durable des forêts naturelles ou plantées, il en découle une pression croissante sur le couvert forestier de l'île.

Avec le niveau de consommation actuel de bois (estimé à 100 000 m³), il faudrait théoriquement consacrer 1/3 du territoire de l'île (soit 10 000 ha) à la production de biomasse-énergie pour un approvisionnement durable.

¹ Région de Diana fait partie des zones géographiques de Madagascar ciblées par le PIC2

La figure ci-dessous présente les données et hypothèses de calculs utilisées.

Nb d'alambics recensés	240
Nb de distillations par semaine, basse saison (mai à octobre)	2
Nb de distillations par semaine, haute saison (novembre à avril)	4
Volume bois consommé par an (fourchette estimative, coef. correctif de 0,9)	100 000 m ³
Surface productive en bois-énergie nécessaire (gestion durable)*	10 000 ha

*Productivité de 10 m³/Ha/an, plantations de 5 à 10 ans, essences tels que l'acacia, le cassia, l'eucalyptus, le gliricidia...

Figure 2. Estimation de la consommation en biomasse-énergie liée à la production d'huiles essentielles à Nosy Bé et évaluation des surfaces nécessaires à une production durable (Source : AUTEUR, 2019)

De plus, la perte progressive du couvert forestier avec des saisons sèches de plus en plus sévères induisent un tarissement des sources d'eau durant la saison sèche ce qui limite la capacité de production d'une grande partie des distillateurs.

D'autre part, à l'échelle nationale, tout le secteur des huiles essentielles se mobilise pour trouver des alternatives afin de réduire sensiblement le recours au bois-énergie non géré sur les sites de distillation suite aux exigences de résultats tangibles à court et moyen terme par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD).

Pour cela, un Groupement des exportateurs d'HE de Madagascar (GEHEM) s'est créé afin de mutualiser les efforts, d'identifier des appuis externes et de lancer des initiatives en ce sens. Il est demandé par le gouvernement au GEHEM d'établir une feuille de route ambitieuse pour réduire sensiblement la pression sur le couvert forestier de ce secteur économique. Le Projet PIC2, compte tenu de l'importance économique de ce secteur, intervient afin de les aider à coordonner leurs efforts de transition énergétique.

C'est dans ce contexte qu'un Appel à manifestation d'intérêts (AMI) a été lancé par le PIC2 pour la réalisation de la présente étude. Le bureau d'études SalvaTerra a été sélectionné pour réaliser cette prestation.

1.2. Objectifs et limites de la présente mission

La prestation confiée par le PIC2 à SalvaTerra sera conduite par un expert sénior : Jean-François ROZIS, ingénieur énergétique spécialisé en transfert technologique.

Les trois principaux objectifs de la prestation sont les suivants :

- **Capitaliser les bonnes pratiques internationales et locales et dresser un état de lieux des principaux procédés technologiques en termes de distillation optimisée et de réduction ou substitution du bois de chauffe.**
- **Elaborer des cahiers de charge des « unités- type » qui seront retenues et des divers procédés de prétraitement et distillation.**
- **Faire fabriquer et tester les prototypes d'alambic identifiés suite à une recherche de développement technologique, permettant l'amélioration des unités de distillation locales et la réduction/substitution de l'utilisation de bois de chauffe.**

L'ensemble de la prestation prévoit un travail en 4 missions d'expertise à Madagascar :

- mission d'état des lieux (national et centré sur Nosy Be) sur une quinzaine de jours,
- mission de préparation de chantier pour le prototype à valider (10 jours),
- mission de construction du prototype sur une vingtaine de jours,
- mission de validation à Nosy Be et de recommandations pour contexte Nosy Be et national.

Le présent rapport « état des lieux » porte uniquement sur le premier objectif et la première mission, à savoir l'analyse du contexte et la capitalisation des bonnes pratiques. Il intègre également des éléments d'analyses comparatives permettant de définir les pistes technologiques (équipements et combustibles alternatifs) les plus pertinentes et appropriables dans le contexte malgache, et en particulier dans le contexte spécifique de la production d'HE2Y à Nosy Be dans un premier temps.

La présente mission doit ainsi déboucher sur :

- un état des lieux durabilité et performance énergétique des unités de distillation à Madagascar suivant leur typologie (taille unité de production, type d'HE produite, ...)
- des recommandations type cahiers des charges de technologies et combustibles alternatifs pour le contexte national avec processus d'identification/sélection à expliciter
- un état des lieux du contexte de Nosy Be suite aux diverses visites de terrain et échanges avec les opérateurs
- l'élaboration d'un premier cahier des charges qui sera finalisé suite mission de préparation de chantier de l'expert constructeur avec processus de d'identification/sélection à expliciter
- des premiers éléments sur les fabricants et matériaux mobilisables, sur le choix possible site pilote et autres recommandations pour faciliter la prochaine mission de préparation

Ce travail demandé sur une mission de 15 jours est particulièrement important. Toutefois, il a été défini en prenant en compte l'expérience et l'expertise antérieure du consultant chef de mission, Jean-François ROZIS, qui a notamment déjà évalué les performances énergétiques (par un protocole instrumenté unifié) de divers sites de production d'HE ces dernières années (HE feuille de giroflier à Fenerive Est, HE géranium Haut Matsiatra, HE patchouli à Sulawesi -Indonésie, HE2Y aux Comores). M. ROZIS intervient notamment en appui sur les volets technologiques et d'évaluation énergétique de l'ONG Initiative Développement sur la filière HE2Y aux Comores (programme FYDECO).

La variété des filières déjà étudiées par le consultant (86% des exportations malgaches en valeur, cf. graphe ci-dessous) doit lui permettre de dresser cet état des lieux national et présenter les pistes de transition exégétique les plus pertinentes avec les performances attendues.

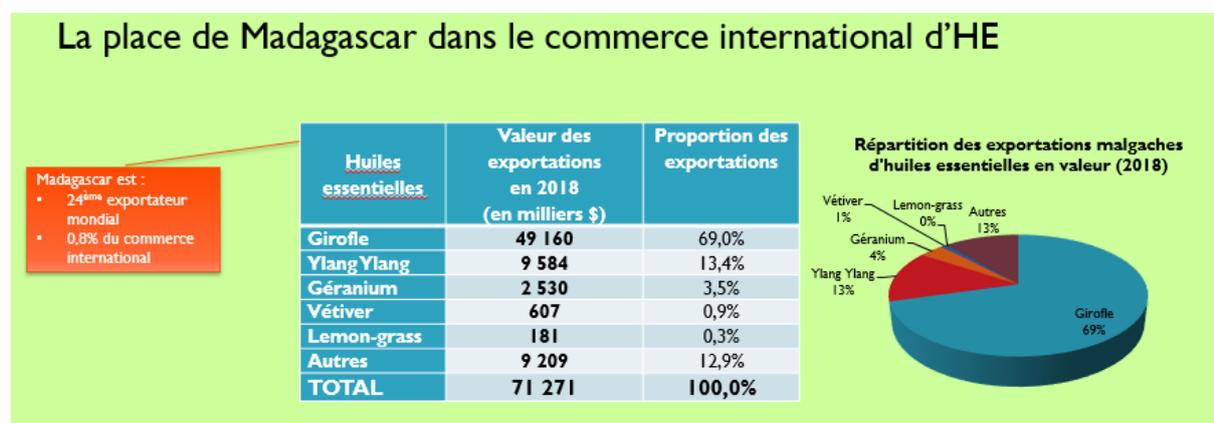


Figure 3. Valeurs et proportions relatives des exportations des divers types d'HE de Madagascar en 2018 (Source : GADDAS,-PIC2, 2019)

Il faut aussi définir les limites de cet exercice compte tenu du temps réduit pour les visites terrain. La valeur statistique des conclusions émises dans ce rapport doit être considérée avec prudence malgré l'attention accordée à une bonne représentativité des sites et acteurs rencontrés.

Les diverses données ont été dans la mesure du possible croisées entre les informations collectées, les études disponibles, les mesures et observations directes. Le principe technologique exploré dans le contexte malgache et similaire est principalement l'entraînement par vapeur d'eau.

2. Programme et contenu de la mission « état des lieux » à Madagascar

L'expert en charge, M. ROZIS, a d'abord réalisé une revue bibliographique en amont de la mission ainsi que divers échanges avec l'équipe du PIC2.

La préparation de la mission de terrain a consisté à :

- identifier une personne pour faciliter le travail sur Nosy Be et Ambanja,
- établir la logistique nécessaire (billets avions, déplacements locaux, réservation hôtel, etc.),
- élaborer le programme prévisionnel de mission (sites à visiter, rencontres à effectuer),
- rassembler l'instrumentation nécessaire,
- préparer les supports de collecte de données (guides d'entretien, supports de suivi de performances et de caractérisation des sites, instrumentation dédiée).

La mission a débuté par deux jours à Tananarive (11 et 12 novembre 2019) ayant permis de réaliser :

- une réunion de cadrage avec l'antenne du PIC2 à Tananarive, département *Agribusiness*,
- une réunion avec les représentants du GEHEM,
- une visite de deux unités de distillation : Floramad et Bioesoil.

Elle s'est ensuite poursuivie sur Nosy Be du 13 au 20 novembre 2019, avec un jour dédié à la visite de deux installations à Ambanja. Elle aura permis :

- de visiter et d'échanger avec les responsables d'une dizaine d'unités de distillations d'HE2Y de différentes typologies sur l'ensemble de la partie orientale de Nosy Be,
- de visiter et d'échanger avec les responsables de deux unités de distillation multi-produits sur Ambanja (Biolandes et S2A),
- de réaliser deux suivis instrumentés d'un cycle de distillation (un partiel et un complet),
- de rencontrer deux fabricants locaux de cucurbites en Inox et accessoires d'alambics (essencier, col de cygne et condenseur),
- d'échanger avec le représentant des Eaux et forêts de Nosy Be,
- de collecter des premiers prix de matériaux auprès des quincailleries locales.

La figure ci-dessous présente la localisation des unités de distillation visitées à Nosy Be au cours de la mission.

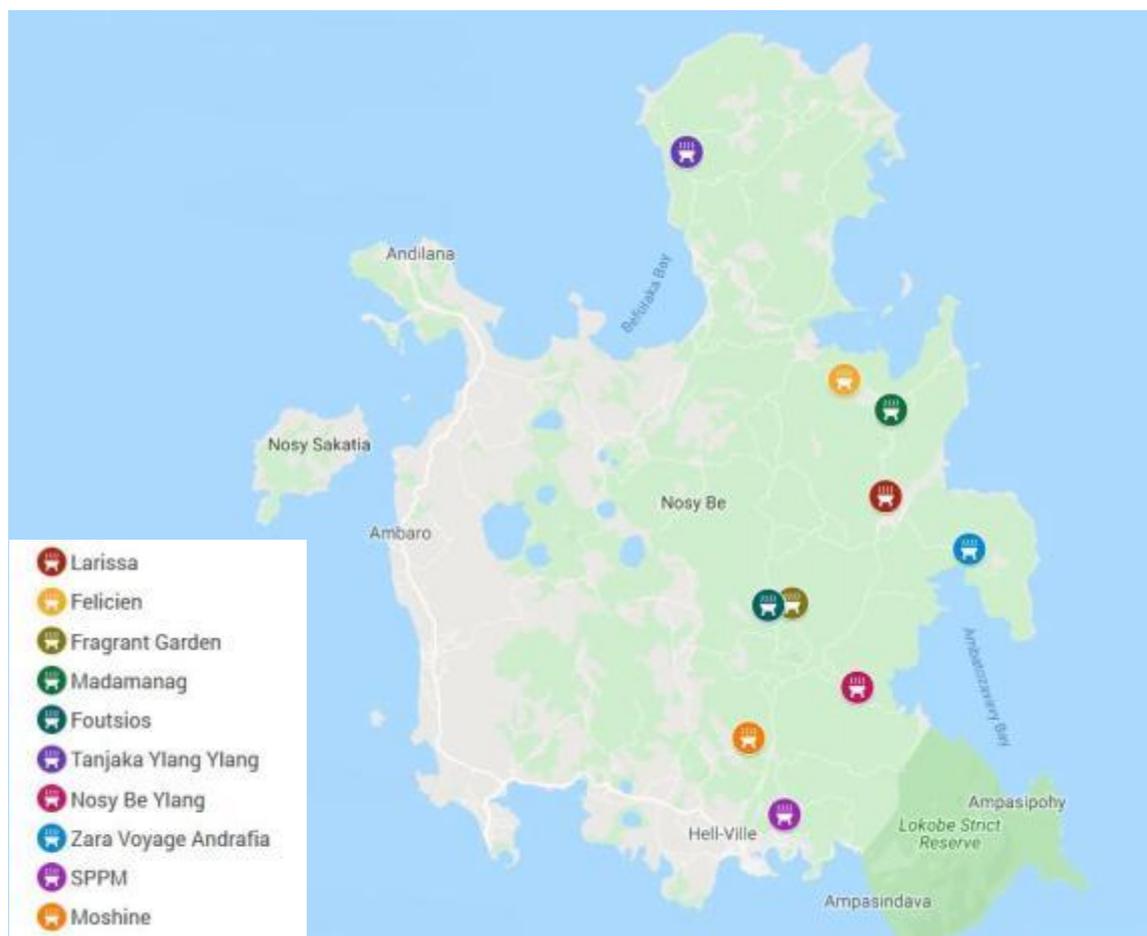


Figure 4. Carte de Localisation des unités de distillation visitées lors de la mission à Nosy Be (Source : AUTEUR, 2019)

La mission s'est ensuite achevée par deux jours ouvrés à Tananarive avec :

- une restitution orale à l'antenne de Tananarive du PIC2 avec production d'une note de recommandations sur stratégie générale à discuter avec MEDD,
- rencontre avec le directeur général du MEDD (M. RAKOTOVOLOLONALIMANANA Herizo) dans ses locaux avec les représentants du PIC2 – pole *Agribusiness*,
- une restitution orale et échanges avec les représentants du GEHEM,
- une visite de l'atelier d'AIM avec le responsable et la chargée commerciale,
- une visite du stand de vente des produits de BIONERR,
- une réunion d'échange avec l'antenne du PIC2 et la directrice Pays d'Initiative Développement Comores et Madagascar sur expérience FYDECO aux Comores.

3. Principaux types de dispositifs de distillation existants, accessoires et matériaux

Cette capitalisation est basée sur une revue bibliographique et des missions d'études de trois filières HE à Madagascar : Ylang Ylang et autres divers (Nosy Be), feuille de girofliers (Fenerive Est) et géranium (Hauts Plateaux). Elle repose également sur la bonne connaissance du contexte de la distillation aux Comores et à Sulawesi – Java en Indonésie.

3.1. Rappels du processus de distillation (cas de l'HE2Y)

Le processus de distillation et donc la qualité finale de l'HE2Y suit un cheminement en 6 étapes :

- La plantation et son entretien,
- La cueillette des fleurs matures,
- Le transport à l'unité de distillation
- L'approvisionnement en combustible pour le besoin de chaleur de l'alambic
- La distillation (respect des procédures)
- Le conditionnement et l'export

La recherche de qualité démarre dès la plantation des ylanguiers (choix des variétés, respect des distances de plantations, absence d'ombre provenant d'autres plantations, sites de plantation avec les caractéristiques du sol, de l'exposition, des microclimats, etc.). Le schéma ci-dessous reproduit les étapes indispensables pour assurer la production et la commercialisation de l'HE2Y (cas des Comores)

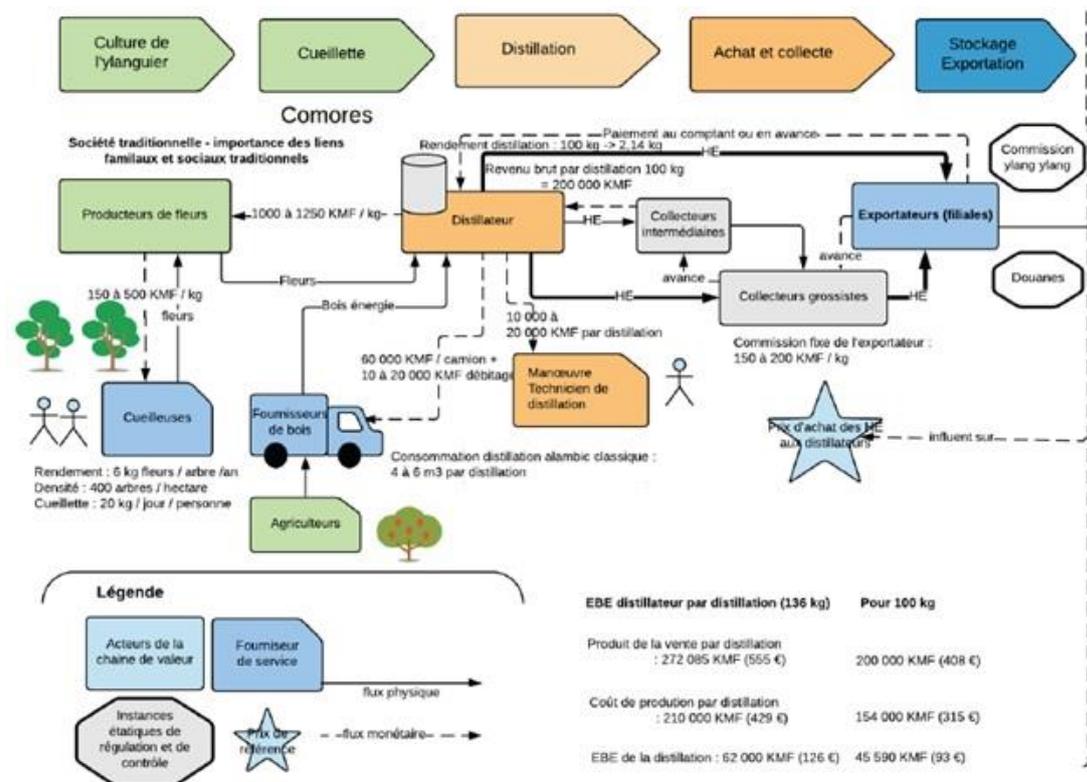


Figure 5. Cartographie filière HE2Y aux Comores, Pierre Johnson Consulting, 2019

L'importance des différentes étapes sera rappelée au paragraphe 4 pour expliciter les éléments de contexte à prendre en compte dans l'élaboration du cahier des charges d'un alambic amélioré.

3.2. Présentation des trois grands types de dispositifs de distillation existants

A l'échelle internationale (dans des contextes similaires) et à Madagascar, trois principes de distillation sont essentiellement utilisés :

- **L'hydrodistillation** (alambics à feu direct, matière verte immergée) ;
- **L'hydro-vapodistillation** (alambics à feu direct, matière verte séparée de l'eau) ;
- **La vapodistillation** (alambics à bain marie & chaudières vapeur).

Les schémas ci-dessous présentent de manière simple les trois grands types de dispositifs existants. Des analyses plus détaillées sont présentées par la suite.

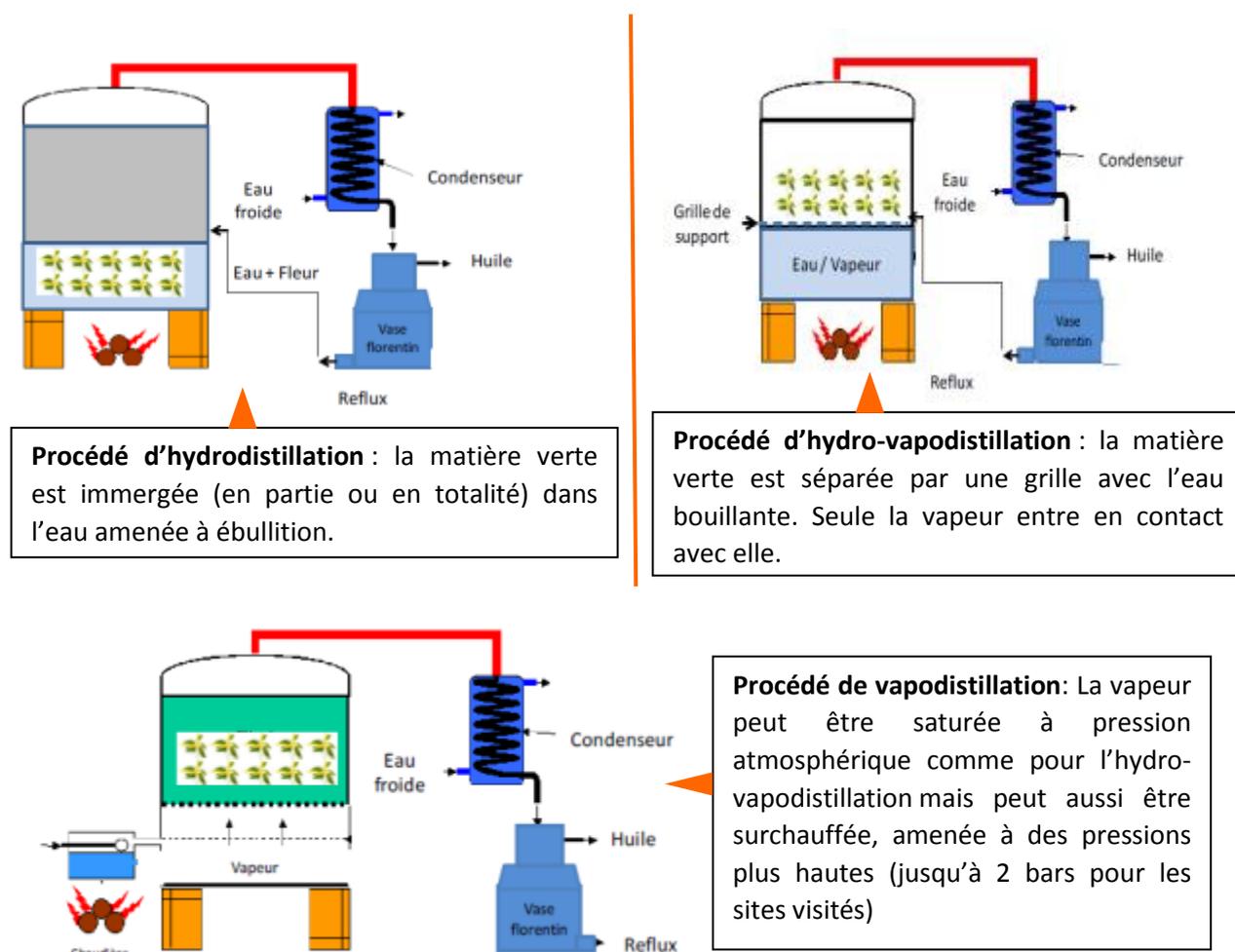


Figure 6. Schémas des trois grands types de dispositifs de distillation d'HE existants (Source : Enea Consulting)

Il convient de noter qu'il existe des variantes à ces trois catégories de dispositifs. Par exemple, on peut très bien réaliser de l'hydrodistillation avec une chaudière vapeur (injection de vapeur dans l'eau à chauffer, nécessaire pour obtenir la 3^{ème} qualité HE2Y par exemple ou pour l'HE de gingembre), ou se situer entre l'hydrodistillation et l'hydro-vapodistillation avec un fond d'eau et une partie de matière verte non immergée (pratique commune chez les petits et moyens distillateurs à Nosy Be par exemple).

3.3. Présentation des principaux types de cuves et accessoires

Les cuves de distillation (appelées aussi cucurbit) sont l'élément central de l'unité de distillation. Elles vont réceptionner la matière verte, travailler à pression atmosphérique ou avec une certaine pression, échanger en partie basse avec les flammes de combustion.

→ Dimension et spécificités des cuves

Il existe une certaine standardisation des tailles de cucurbites.

Pour l'HE2Y, on dépasse rarement 1 mètre de hauteur, la capacité varie alors avec le diamètre. En général, le ratio de capacité de charge en fleurs est de l'ordre de 15% par rapport à la capacité totale de la cuve (150 kg de fleurs pour une cuve de 1 000 L).

Pour les autres matières vertes comme l'HEFG par exemple, on note souvent un ratio d'1,25 entre la hauteur et le diamètre de la cuve (1,25 m de haut pour 1 m de diamètre), mais cela peut aller jusqu'à 2 m (2 m de hauteur pour 1 m de diamètre) pour des HE obtenues par hydrodistillation (HE de gingembre par exemple).

Capacité de charge en fleurs de la cuve	Hauteur de la cuve	Diamètre de la cuve	Volume eau remplissage*	Capacité totale de la cuve
80 kg	1 m	D=0,85m	170 L	570 L
120 kg	1 m	D=1,02m	245 L	815 L
150 kg	1 m	D=1,13m	300 L	1000 L
200 kg	1 m	D=1,30m	400 L	1330 L
250 kg	1 m	D=1,45m	495 L	1650 L

* pratiqué aux Comores avec généralisation grille de séparation. A Nosy Be, remplissage plus faible, on compte 1 L par kilo de fleurs

Figure 7. Tableau de classification des cuves de distillation pour l'HE d'ylang-ylang (Source : AUTEUR, 2019)

Certaines cuves pour les alambics à feu direct disposent de spécificités techniques, comme celles utilisées pour l'ylang-ylang pour faciliter le retour par cohobation de l'hydrolat en sortie d'essencier (maintien automatique du niveau d'eau dans la cuve) mais aussi un tuyau de vidange des eaux résiduelles.

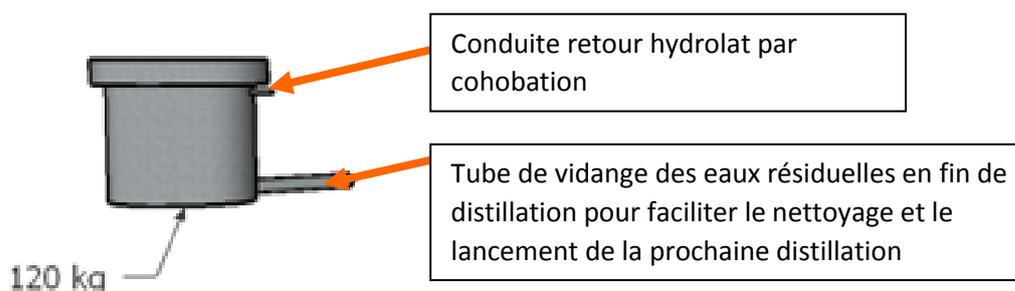
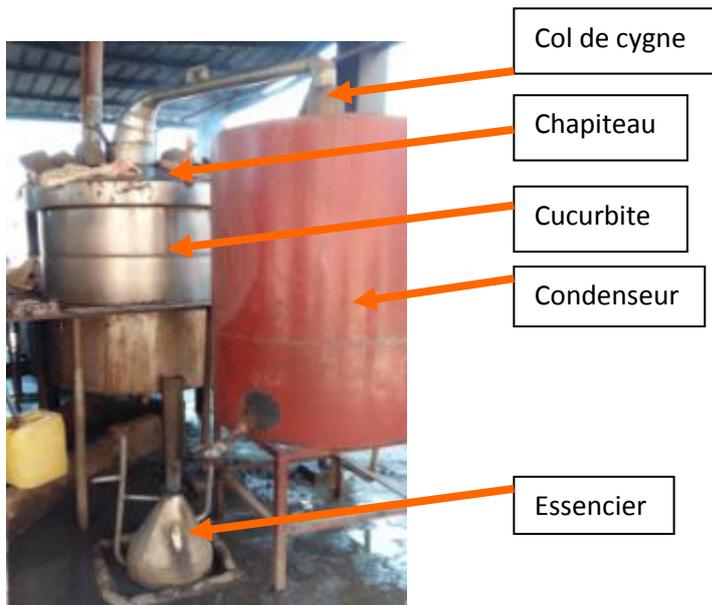


Figure 8. Schéma d'une cuve type utilisée pour la distillation de fleurs d'ylang-ylang (Source : AUTEUR, 2019)

➔ **Accessoires : chapiteau, col de cygne, condenseur et essencier**



Tous les alambics reprennent le même dispositif au dessus de **la cuve** (cucurbite)::

- **un chapiteau** de forme très variable recouvrant de manière la plus hermétique possible la cucurbite
- **le col de cygne** assurant la liaison avec le condenseur
- **le condenseur** permettant d'obtenir un mélange liquide d'eau et d'huile essentielle (arrivée d'eau de refroidissement généralement à contre courant)
- **l'essencier** (pour huile lourde ou légère voire mixte) séparant l'huile essentielle de l'hydrolat

Ces accessoires sont plus ou moins performants c'est-à-dire qu'ils limitent autant que possible la retombée de gouttes en condensation dans la cuve pour accompagner l'ensemble de la vapeur chargée en huile directement vers le condenseur et qu'ils assurent une parfaite étanchéité pour éviter toute perte de vapeur.

Dans l'ensemble, ils sont généralement satisfaisants et les condenseurs sont bien dimensionnés. Les pertes occasionnelles sont dues plutôt à des erreurs de manipulations ou à un manque d'eau de refroidissement.

➔ **Matériau des cuves: qualité de l'HE produite et échange thermique**

En feu direct, il faut que les gaz de combustion échangent avec la plus grande surface possible de la cucurbite, sans brûler la partie de la matière verte non immergée dans le cas d'une hydrovapotillation. C'est la difficulté principale à laquelle doit faire face tout concepteur d'alambic à feu direct performant. On verra plus bas que cela est obtenu actuellement avec plus ou moins de succès.

Pour ce qui est de la nature des matériaux, le premier élément de choix est généralement le meilleur rapport qualité/prix prenant en compte la durabilité et le prix initial de la cuve.

On trouve principalement 4 matériaux utilisés, avec des avantages et inconvénients :

- **l'acier galvanisé** : peu cher, mais durée de vie réduite
- **l'aluminium** : coût abordable et bonne transmission de la chaleur
- **l'innox** : cher et peu conducteur de chaleur
- **le cuivre** : très cher, excellent conducteur de chaleur

L'acier galvanisé tend à disparaître de par sa faible tenue dans le temps au profit notamment de l'innox comme sur l'île de Nosy Be ou de l'aluminium sur la zone Fenerive Est (savoir-faire spécifique des artisans soudeurs locaux).

Les épaisseurs standards sont 20/10 (2 mm) pour les parois latérales et de 30/10 (3 mm) pour le fond de cuve.

La figure suivante présente les prix unitaires par m² de tôle de trois matériaux vendus à Nosy Be. On note que l'aluminium est vendu autour de 225 000 Ariary/m² tandis que l'inox est en moyenne près de 2,5 fois plus cher et le cuivre plus de 10 fois plus cher. L'aluminium représente donc un compromis assez intéressant en termes de coût.

	Aluminium	Inox	Cuivre
Prix tôle 20/10 en €/m ²	56	139	633
Prix tôle 20/10 en Ar/m ²	225 000	550 000	2 500 000

Taux conversion 1 € = 3 950 Ar, chiffres 2019 Nosy Be

Figure 9. Estimations des coûts de tôles en aluminium, inox et cuivre à Nosy Be en 2019 (Source : enquête AUTEUR, 2019)

→ Conductivité et diffusivité thermique des matériaux :

Ce sont des grandeurs physiques des matériaux explicitant leur comportement en régime stabilisé (permanent) ou transitoire c'est à dire sous l'effet d'un flux thermique constant ou variant dans le temps (phase de mise en chauffe ou de maintien à température par exemple). La figure ci-dessous présente les données de conductivité et de diffusivité pour quatre matériaux utilisés pour la fabrication de cuves de distillation (acier galvanisé, aluminium, inox et cuivre. On note une forte disparité entre les matériaux. L'acier galvanisé et l'inox ont des conductivités et diffusivité basses tandis que les données sont beaucoup plus hautes pour l'aluminium et le cuivre.

	Acier galvanisé	Aluminium	Inox	Cuivre
Conductivité (W/m.K)	45	237	15	386
Diffusivité (10 ⁻⁶ m ² /s)	12	99	4	117

Figure 10. Données de conductivité et de diffusivité des matériaux acier galvanisé, aluminium, inox et cuivre (Source : AUTEUR, 2019)

La conductivité (thermique) caractérise la capacité des matériaux à diffuser la chaleur sous l'effet d'un gradient de température. La valeur de la conductivité représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin (ou 1 degré Celsius) par mètre.

La diffusivité (thermique) caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle varie en fonction de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique volumique).

Le comportement thermique des différents métaux sera similaire dans les échanges à régime stabilisé entre les gaz de combustion et la plaque du fond de la marmite par exemple. L'amélioration de l'échange se joue surtout sur la température des gaz (combustion de qualité avec bois sec) et le régime turbulent des gaz (vitesse d'écoulement). En effet, la résistance thermique de la plaque métallique et celle de la couche limite entre la plaque et l'eau de la marmite sont négligeables en comparaison avec celle de la couche limite entre les gaz de combustion et la plaque métallique.

Par contre, en régime transitoire (rapidité de mise en chauffe) ou pour faciliter la diffusion de la chaleur entre les zones chauffées et les autres zones de la cuve, il est préférable d'utiliser soit de l'aluminium soit du cuivre, source de meilleur échange thermique in fine et donc d'économie de combustible.

La seule méthode pour pallier la mauvaise conductivité de l'inox sera donc outre d'améliorer la qualité de combustion et l'usage de bois sec (haute température des flammes), d'augmenter sensiblement la surface d'échange avec les gaz de combustion.

➔ Tubes échangeurs bas de cuve V4.1 aux Comores – ou « passage de flammes » en Indonésie

Afin d'accroître cette surface d'échange une des solutions communément rencontrée est le recours à des tubes échangeurs en base de cuves (aux Comores notamment) ou de véritables passages de flammes comme pratiqué en Indonésie. Les figures ci-dessous présentent ces deux dispositifs rencontrés aux Comores et en Indonésie.

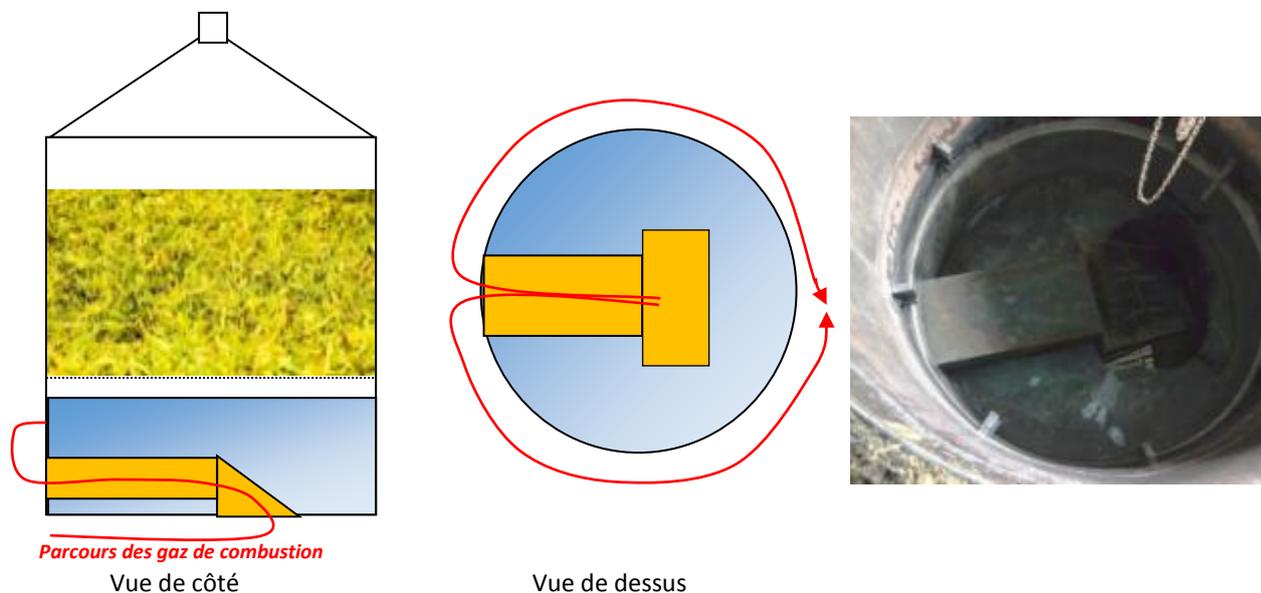


Figure 11. Schéma de principe de cuve distillation patchouli en Indonésie avec la solution du passage de flamme en bas de cuve noyé dans l'eau d'hydro-vapodistillation (Source : AUTEUR, 2019)



Figure 12. Tubes échangeurs soudés en partie basse de cuve aux Comores (Source : AUTEUR, 2019)

→ Qualité des HE et nature des matériaux

Le cuivre dispose de la meilleure appréciation chez les distillateurs notamment chez ceux qui produisent de l'HE2Y (odeur et couleur orangée appréciée).

Il est ensuite difficile de vérifier les assertions entendues comme un goût de bouilli dû à l'usage de l'inox dans les cycles de distillation prolongées pour l'HE2Y 3^{ème} qualité.

3.4. Classification des performances énergétiques

→ Notion de rendement énergétique

Le **rendement énergétique** exprimé en pourcentage est le rapport entre l'énergie utile et l'énergie fournie, apportée par le combustible dans notre cas. L'énergie utile pour la distillation par entraînement de vapeur est l'énergie nécessaire à chauffer l'eau à la température d'ébullition (dépendant de la pression vapeur recherchée) et la chaleur latente nécessaire à son changement d'état (liquide à vapeur).

Le rendement est amélioré si on réduit l'énergie utile (la quantité de biomasse-énergie) pour une même production d'HE (réduction du temps de distillation et donc de besoin en vapeur, procédé non énergivore de préchauffage de l'eau, etc.).

L'énergie fournie sert à produire l'énergie utile plus les pertes liées au dispositif. Plus ces pertes sont réduites moins la quantité d'énergie à fournir sera importante, et donc le rendement sera amélioré. Réduire la consommation de bois par deux revient à améliorer le rendement énergétique par deux.

→ Classification énergétique des dispositifs de distillation

Pour éviter tout relativisme dans la classification énergétique des dispositifs de distillation d'huiles essentielles, nous gardons une classification communément applicable pour différents contextes d'usage :

- **basique** : rendement énergétique de 15 à 45%
- **intermédiaire** : rendement énergétique de 45 à 75%
- **performante** : rendement énergétique de 75 à 95 %

Lorsqu'on analyse la performance énergétique d'une distillation, il est également important de considérer la qualité de combustion de la biomasse-énergie utilisée. Cette qualité de combustion est généralement estimée par la valeur de la concentration de monoxyde de carbone dans les gaz de combustion à puissance nominale (2 heures après phase de démarrage, température des fumées stabilisée, charge de bois enfournée depuis plus d'un quart d'heure).

Il est important de ramener la valeur mesurée à un taux de référence de l'oxygène présent dans les fumées appelé aussi taux de dilution. Nous prendrons 10% utilisé pour les mesures d'émission dans les chaudières.

- **mauvaise** : au-delà de 5000 ppm de CO pour O₂ à 10%
- **acceptable** : entre 1000 et 5000 ppm de CO pour O₂ à 10%
- **bonne** : entre 50 et 1000 ppm de CO pour O₂ à 10%

3.5. Capitalisation sur les technologies de distillation en contextes similaires et à Madagascar : Dispositifs à feu direct

Nous présentons ci-dessous chaque type de dispositif en décrivant le principal général et en analysant les avantages et inconvénients de chaque type.

Ce sont les dispositifs les plus communs de par un coût d'investissement plus bas comparativement à l'acquisition supplémentaire d'un générateur de vapeur. Ils représentent ainsi la quasi-totalité des producteurs d'Huiles essentielles de feuilles de girofles (HEFG) (mis à part GIVAUDAN) et une très grande partie des producteurs d'HE2Y sur Nosy Be.

On distingue 4 principaux types de dispositifs à feu direct existants à Madagascar ou dans des contextes similaires à travers le monde:

- **Dispositifs à feu direct basique** : *totalité HEFG côte Nord-Est, majorité HE2Y Nosy Be.*
- **Dispositifs à feu direct amélioré** : *vu à Nosy Be coopérative Tanjika Ylang Ylang, Larissa et Comores.*
- **Dispositifs à feu direct à large surface d'échange** : *modèle UDAFE V4.1 (ONG Initiative Développement) aux Comores et chez Moshine à Nosy Be, modèle Swiss Contact à Sulawesi (HE de patchouli).*
- **Autres dispositifs à feu direct** : *dispositif d'économie d'énergie à Fenerive Est (CTHT-CIRAD-ESSA), alambics bain-marie pour l'HE de lavande dans le Sud-Est de la France qui n'est plus utilisé, modèle commercialisé actuellement en France à titre d'exemple.*

Nous présentons ci-dessous chaque type de dispositif en décrivant le principal général et en analysant les avantages et inconvénients de chaque type.

3.5.1. Dispositifs à feu direct basique

Principe général

Feu direct, avec ou sans grille, pas de porte d'enfournement, cheminée inexistante ou rudimentaire, bâti autour marmite en maçonnerie standard, tôle ou semi-enterrée.

Présence non systématique d'un abri de protection

Absence d'hangar de stockage du bois

Absence d'instrumentation de contrôle mis à part la visualisation du débit de condensat



Avantages

Faible coût d'investissement

Construction et maintenance locales

Qualité production satisfaisante pour filière aval

Inconvénients

Forte pénibilité et impacts sur la santé (chaleur ambiante, fumées, enfournement du bois, ...)

Retours de flamme, non maîtrise du tirage

Faible zone d'échange avec la marmite

Rendement énergétique : 15 - 25 %

Qualité de combustion : mauvaise

Coût installé:
capacité 100 à
300 kg, **600 à**
2 000 €

Impact qualité huile :

Difficulté maintenance puissance nominale (fortes fluctuations)

Répartition des pertes - audit instrumenté

Retour de flammes : 15 %

Inertie thermique chambre combustion non valorisée : 20 %

Pertes dans les fumées (sensible et mauvaise combustion) : 45 %

Pertes surfaciques incluant zone rayonnement vers extérieur chambre combustion : 20 %

Photos : Feu direct basique



Foyer de combustion sans grille placé sous la cuve.

Nécessite une surveillance constante, beaucoup de pertes par rayonnement vers l'extérieur, retour de flammes fréquents lors des chargements ou usage de petits bois ou de bambous, nécessité enlèvement des braises bouchant la chambre de combustion.

Cheminée souvent inexistante

Sortie du conduit de fumées enterré, pratique pour les alambics HEFG à Fenerive ou conduit court sortie sur la jupe métallique entourant la cuve formant la chambre de combustion pour les alambics à Nosy Be (ne permettant pas un tirage suffisant pour éviter les retours de flammes)



3.5.2. Dispositifs à feu direct amélioré

Principe général

Des essais d'amélioration ont été initiés sur base d'échanges avec d'autres distillateurs, des choses vues sur Internet...

On voit donc des essais de chambre de combustion maçonnées, de porte d'enfournement, d'ajout de conduit de fumées.

Présence d'un abri de protection

Présence non systématique d'un hangar de stockage du bois

Absence instrumentation de contrôle mis à part la visualisation du débit de condensat



Avantages

Faible surcoût d'investissement

Limitation des retours de flammes

Construction et maintenance locales

Réduction pénibilité pour le manoeuvre

Inconvénients

Pénibilité (encore présence de fumées mais dans une moindre mesure, enfournement du bois, ..)

Tenue dans le temps des parties métalliques et maçonnées (prévoir maintenance tous les 3 ans)

Faible zone d'échange avec la marmite

Rendement énergétique : 20 - 35 %

Qualité de combustion : mauvaise

Coût Installé :
capacité 100 à
300 kg, **2000 -
3000 €**

Impact qualité huile :

Difficulté maintenance puissance nominale (fortes fluctuations)

Répartition des pertes - audit instrumenté

Inertie thermique chambre combustion non valorisée : 20 %

Pertes dans les fumées (sensible et mauvaise combustion) : 70 %

Pertes surfaciques autour chambre combustion + évacuation régulière de braises : 10 %

Température des gaz de combustion en bas du conduit de fumée : 400 – 700 °C

Photos : Feu direct amélioré



La mauvaise conception des grilles entraîne une chute de braises qui s'accumulent. Ce problème d'accumulation de braises peut aussi se produire par un mauvais réglage d'air primaire sur des chambres de combustion plus avancées.

Les problèmes de tenue de maçonnerie sont récurrents (absence de matériaux réfractaires, parties métalliques exposées à la flamme ou à la chaleur, contraintes thermiques sans possibilité de dilation, etc.)



Les conduits de fumées métalliques non isolés souvent de forme carrée faute de rouleuse présentent quelques défauts.

Ils nécessitent une température moyenne dans le conduit assez haute (et donc des pertes thermiques) pour permettre un tirage suffisant (minimum de 250°C) et présentent un risque de brûlure (plusieurs cas rapportés).

Sur ce modèle, la partie horizontale est à proscrire (dépôt de suie-créosote, risque d'incendie). Un chevêtre étanche à travers le toit en tôle aurait dû être posé pour éviter ce coude horizontal.

3.5.3. Dispositifs à feu à large surface d'échange

Principe général

Outre une chambre de combustion maçonnée généralement à partir de briques réfractaires, l'ajout d'une porte d'enfournement et d'un conduit de fumées, le dispositif bénéficie d'une cuve avec grande surface d'échanges (cf. paragraphe 3.2.)

Présence d'un abri de protection

Présence non systématique d'un hangar de stockage du bois

Absence instrumentation de contrôle mis à part la visualisation du débit de condensat



Avantages

Construction et maintenance locales

Réduction pénibilité pour le manoeuvre

Réduction sensible de consommation de bois

Réduction temps total de distillation

Inconvénients

Pénibilité (encore présence de fumées mais dans une moindre mesure, enfournement du bois, ..)

Tenue dans le temps des parties métalliques et maçonnées (prévoir maintenance tous les 3 ans)

Nettoyage rendu difficile en bas de cuve

Rendement énergétique : 40 - 65 %*

Qualité de combustion : mauvaise à acceptable par intermittence

Coût installé:

capacité 100 à 300 kg, **3000 à 4000 €**

Impact qualité huile :

amélioration qualité mais toujours risque de fluctuations de la puissance

Répartition des pertes – audit instrumenté

Inertie thermique chambre combustion non valorisée : 15 %

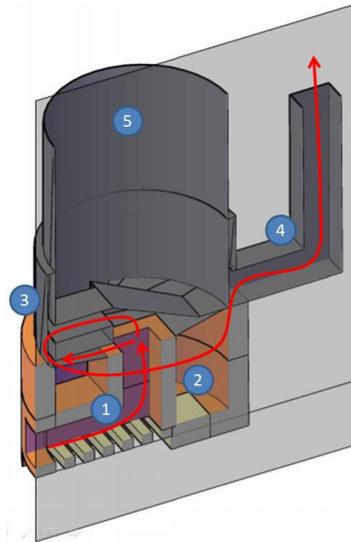
Pertes dans les fumées (sensible et mauvaise combustion) : 65 %

Pertes surfaciques : 20 %

Température des gaz de combustion en bas du conduit de fumée : 250 - 300 °C

*65% uniquement pour le modèle développé en Indonésie, cf. schéma de principe ci-dessous, JF Rozis 2017.

Photo/schéma : Feu direct à large surface d'échange



- Airflow
- 1 Rocket Stove
- 2 Ash Insulation
- 3 Metal Skirt
- 4 Chimney
- 5 Boiler

Modèle développé à Sulawesi pour la distillation du patchouli avec l'appui de l'ONG SwissContact et la fondation Givaudan.

Outre le passage de flamme allongé, la très faible inertie de la chambre de combustion et les faibles pertes surfaciques expliquent ce bon rendement énergétique. Il n'y a bien sûr plus aucun retour de flamme (tirage adapté à la puissance délivrée)

Besoin de travail d'amélioration de la conception du modèle comorien pour réduire les effets de contrainte thermique sur la structure maçonnée.

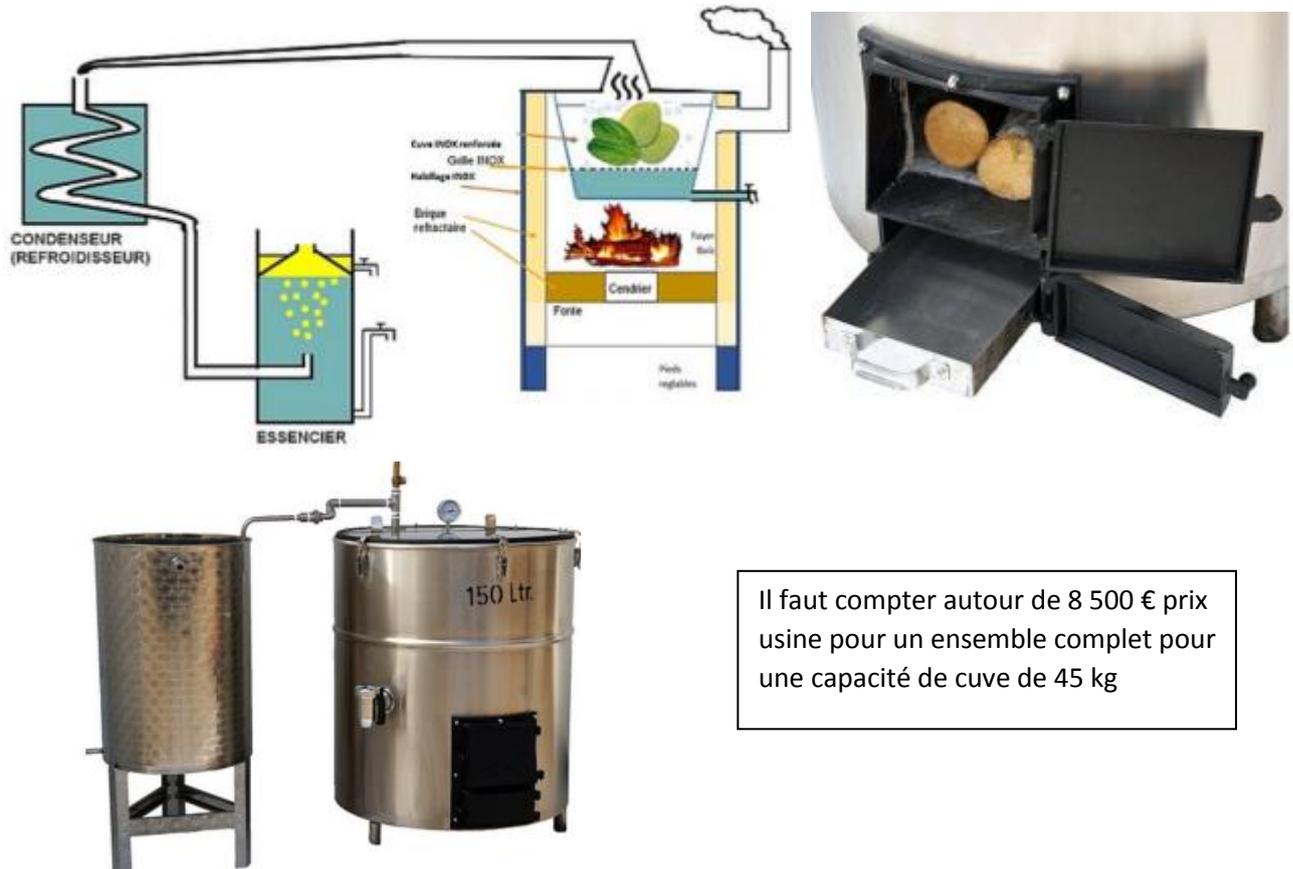
Fissures apparaissant après les premiers cycles de distillation entraînant à terme une baisse des rendements.



3.5.4. Dispositifs à feu direct – ailleurs dans le monde

Il est possible de trouver des modèles produits à l'étranger mais généralement à des coûts bien supérieurs et ne présentant pas en l'état d'intérêt soit technologique soit économique pour le contexte malgache.

➔ Alambic feu direct au bois – Aura Industrie



➔ Dispositif de réduction d'énergie utile mise en œuvre par CIRAD-ESSA-CTHT

On peut mentionner ici le dispositif utilisé pour réduire le besoin en énergie de chauffage de l'eau (eau ajoutée dans la cucurbitte entrant vers 80°C au lieu de 35°C). Il a été utilisé pour réduire les consommations dans les alambics pour l'HEFG. Cela permet de baisser autour de 6% le besoin en énergie utile (soit d'autant la consommation en bois) sans changement de technologie.



Tube d'amenée eau chaude du condenseur vers la cucurbitte.

La pratique de la cohobation a donc été abandonnée pour des fins énergétiques. On suppose que des essais ont validé ce choix (inutilité cohobation)

Arrivée eau froide partie opposée non visible par tuyau en partie basse du condenseur pour assurer un échange à contre-courant.

→ Une solution mixte entre le feu direct et la chaudière séparée : alambic bain marie

Ces équipements au bois ou à la paille de lavande distillée de la veille font maintenant partie du patrimoine et ont été remplacés par des chaudières à vapeur séparées. Toutefois, il faut souligner l'ingéniosité de ces dispositifs permettant de fournir une vapeur basse pression sèche. On peut noter sur le schéma ci-dessous le principe adopté par le CIRAD-ESSA-CTHT avec l'usage de l'eau chaude en partie haute du condenseur. Des pompes manuelles de marque Japy étaient utilisées pour injecter cette eau chaude dans les tubulures en bas de cuve, ces pompes manuelles sont toujours fabriquées.

Le système de bain-marie permettait d'éviter les risques de surchauffe de la matière verte, l'usage d'un manomètre était rendu indispensable ainsi qu'un contrôle du niveau d'eau dans le bain marie.

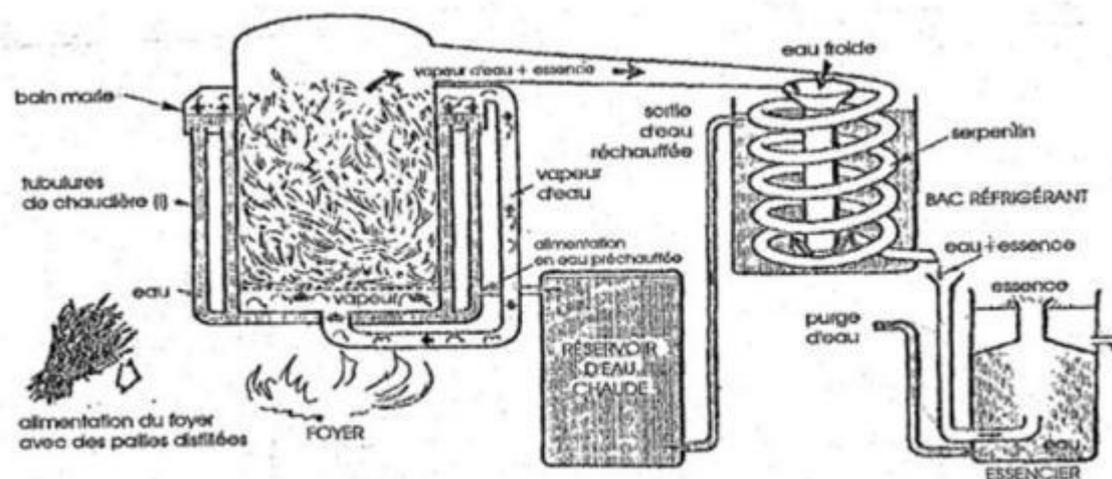


Schéma d'un alambic à vapeur pour extraire l'essence de fleurs



Alambic Rabain 400 litres à bain-marie, non basculant, construit à Grasse vers 1925 par Alfred Rabain.

Il a fonctionné jusque dans les années 60 à Castellane (04). Il est en acier, triple enveloppes, (Plantes, Bain-Marie, Foyer).

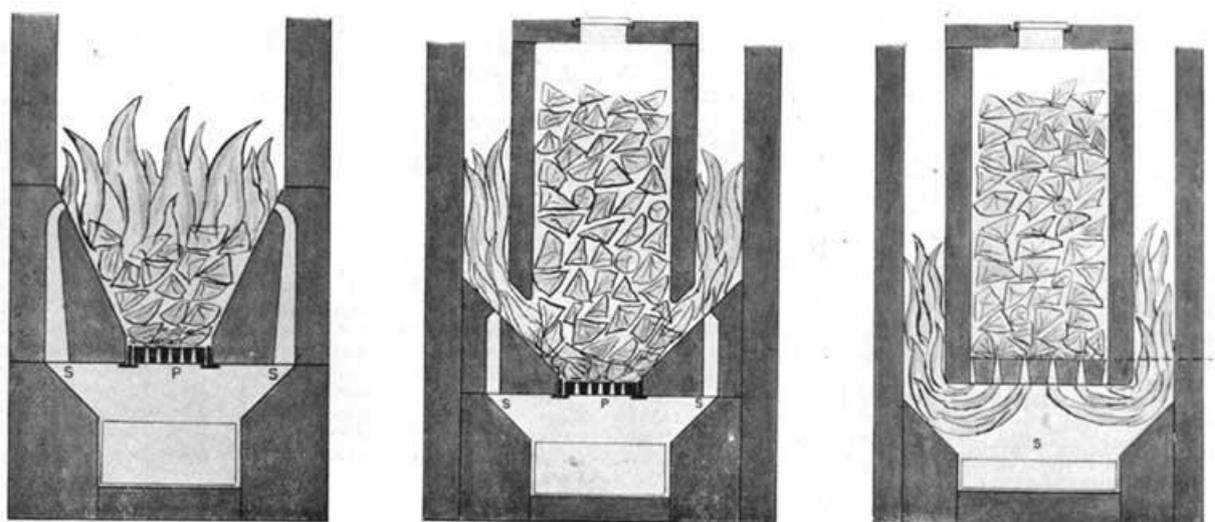
Son chauffage était au bois ou au charbon minier, doté de tubes générateurs de vapeur, assurant une pression de l'ordre de 0,2 – 0,3 bar.

3.6. Capitalisation sur les technologies de distillation en contextes similaires et à Madagascar : Dispositifs à génération de vapeur séparée

L'évolution technologique au début du vingtième siècle a vu l'avènement des chaudières vapeurs permettant plus de souplesse de fonctionnement dès que l'unité disposait de plusieurs cuves.

L'autre évolution plus récente sur la combustion du bois bûche a été introduite par les chaudiéristes devant respecter des normes sur la pollution : « réduction des émissions de particules fines et de monoxyde de carbone (CO) », marqueur de la qualité de combustion.

A été abandonnée au fur et à mesure la technologie de combustion montante au profit de la combustion inversée (très courante) et latérale (plus occasionnelle) avec une réelle séparation physique de la chambre de pyrolyse sans aucune flamme (la chaleur des braises entretenues par l'air primaire chauffe le bois qui atteint sa température de pyrolyse et libère les gaz combustibles) de la chambre de développement de la flamme (injection d'air secondaire, principe d'un brûleur gaz).



Combustion montante

Combustion latérale

Combustion inversée

Symboles : P : air primaire, S air secondaire.

Figure 13. Schéma des principes de combustion bois bûche (Source : Winkelmann et Fao)

➔ Le grand avantage énergétique des chaudières vs alambics feu direct

Sans modifier les cuves existantes (ajout de passages de flammes), une chaudière bien conçue va disposer d'une très grande surface d'échange avec l'eau à chauffer tout en conservant une très grande compacité. Une technologie simple en termes de construction et très efficace sur le plan énergétique est le recours à des échangeurs tubulaires. Pour maîtriser la circulation des gaz et faciliter le nettoyage, il est préféré la circulation des fumées dans les tubes et la circulation de l'eau à l'extérieur des tubes.



Pour illustrer ce gain de surface d'échange avec une grande compacité, faisons un calcul sur cette chaudière pour 4 cuves en construction vue sur le site Zara Voyage à Andrafia (Nosy Be). La partie échangeur est une cuve cylindrique de 2 m de long pour un diamètre d'1 m. Les fumées vont circuler dans 81 tubes de 6 cm de diamètre. On obtient donc une surface d'échange de 30 m² pour 4 cuves. Les surfaces d'échange des alambics à feu direct pour une cuve varient seulement entre 0,5 et 3 m² d'après les modèles visités.

Au-delà de deux cuves de distillation, le choix d'une chaudière vapeur performante à coût maîtrisé est donc pertinent (performance, facilité de gestion avec un seul poste de chauffe et gain de place). Nous allons maintenant lister les types de chaudières en usage à Madagascar.

3.6.1. Chaudière vapeur 1 à 4 cuves – Tubes d'eau (AIM, autoconstruit Floramad, S2A)

Principe général

La chaudière est généralement construite par le biais d'une double enveloppe renfermant l'eau avec une série de tubes internes situés sur le passage des gaz de combustion montant par tirage naturel vers le conduit de fumées.

Présence d'un abri de protection

Présence non systématique d'un hangar de stockage du bois

Instrumentation de contrôle : un manomètre obligatoire pour ceux travaillant jusqu'à 2 bars et visualisation du débit de condensat



Avantages

- Construction et maintenance locales
- Réduction pénibilité pour le manoeuvre
- Gestion plusieurs cuves plus facile et puissance délivrée plus régulière avec un seul poste de chauffe,
- Idéal pour multi-produits.
- Pas besoin d'électricité.
- Réduction temps total de distillation

Inconvénients

Pénibilité (encore présence de fumées mais dans une moindre mesure, enfournement du bois, ..)

Qualité de l'eau (dureté) influe sur entartrage et besoin d'entretien régulier

Rendement énergétique : 30%*- 45%

Qualité de combustion : mauvaise

Coût installé: 1 cuve, alambic complet : entre **3000 et 5 000 €**

Impact qualité huile : amélioration qualité mais toujours risque de fluctuations de la puissance

Répartition des pertes – audit instrumenté

Inertie thermique chambre combustion non valorisée : 5 %

Pertes dans les fumées (sensible et mauvaise combustion) : 70 %

Pertes surfaciques et retours de flammes : 25 %

Température des gaz de combustion en bas du conduit de fumée : 250 - 450 °C*

* mesure JF Rozis, 2018



Vue sur le foyer de combustion de la chaudière auto-construite sur le site de S2A à Ambanja. Débit vapeur 0,8 T/h pression max 8 à 10 bars

On voit les tubes d'eau entourant la chambre de combustion, certains en partie basse servant de grille de support pour le bois bûche.

On note l'absence de portes d'enfournement, de système de réglage des entrées d'air et un usage de bois de gros diamètre non refendu.

Vue sur l'intérieur d'une chaudière au dessus du foyer de combustion sur le passage des gaz de combustion.

L'eau est contenue dans une double enveloppe cylindrique. Les tubes d'eau relient ces deux enveloppes afin de récupérer l'énergie des gaz de combustion montant vers le conduit de fumées en partie supérieure



Foyer de combustion bois bûche construit en briques terre cuite en partie basse de la chaudière vapeur.

On note l'absence de porte d'enfournement, de véritable grille bien dimensionnée et un tirage insuffisant conduisant à des retours de flammes quasi permanents.

3.6.2. Chaudière vapeur 1 à 3 T/h débit vapeur : Tubes d'eau modèle chinois/ Tubes de fumées pour Bionerr

Principe général

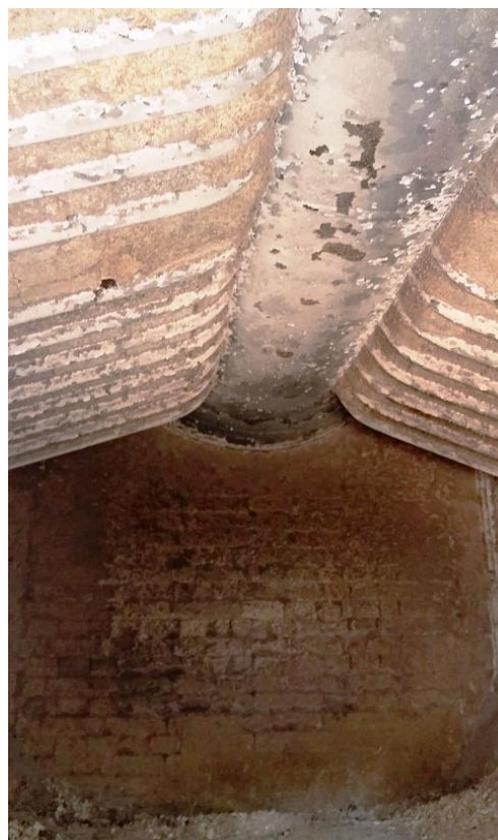
Le modèle de chaudière à tubes d'eau se caractérise par une grande chambre de combustion horizontale sur grille fixe en briques réfractaires encadrée de tubes d'eau verticaux sur les parois latérales se rejoignant vers un tube de grand diamètre en partie haute. Présence d'un ventilateur pour air comburant en dessous de grille et extracteur pour les fumées.

Instrumentation de contrôle : un manomètre obligatoire pour ceux travaillant jusqu'à 2 bars sur cuves et jusqu'à 5 à 7 bars dans le circuit de distribution.

Présence d'un abri de protection

Présence systématique d'un hangar de stockage du bois

Organes de sécurité : soupapes, vannes de purge, etc.



Avantages

Maintenance locale, gestion simplifiée
Réduction pénibilité pour le manoeuvre

Gestion plusieurs cuves plus facile et puissance délivrée plus régulière avec un seul poste de chauffe

Réduction temps total de distillation

Inconvénients

Pénibilité (enfournement du bois, ..)
Maintenance annuelle, entretien régulier suivant dureté de l'eau, contrôle organes de sécurité annuelle obligatoire (spécialiste)
Perte de rendement aux faibles demandes de puissance

Rendement énergétique : 55 - 70 %*
Qualité de combustion : mauvaise à acceptable par intermittence

Coût installé:

??

Impact qualité huile :
amélioration qualité

Répartition des pertes – audit instrumenté

Inertie thermique chambre combustion non valorisée : 15 %
Pertes dans les fumées (sensible et mauvaise combustion) : 65 %
Pertes surfaciques : 20 %

Température des gaz de combustion en bas du conduit de fumée : 250 °C

*D'après chiffres de consommation spécifique fournis



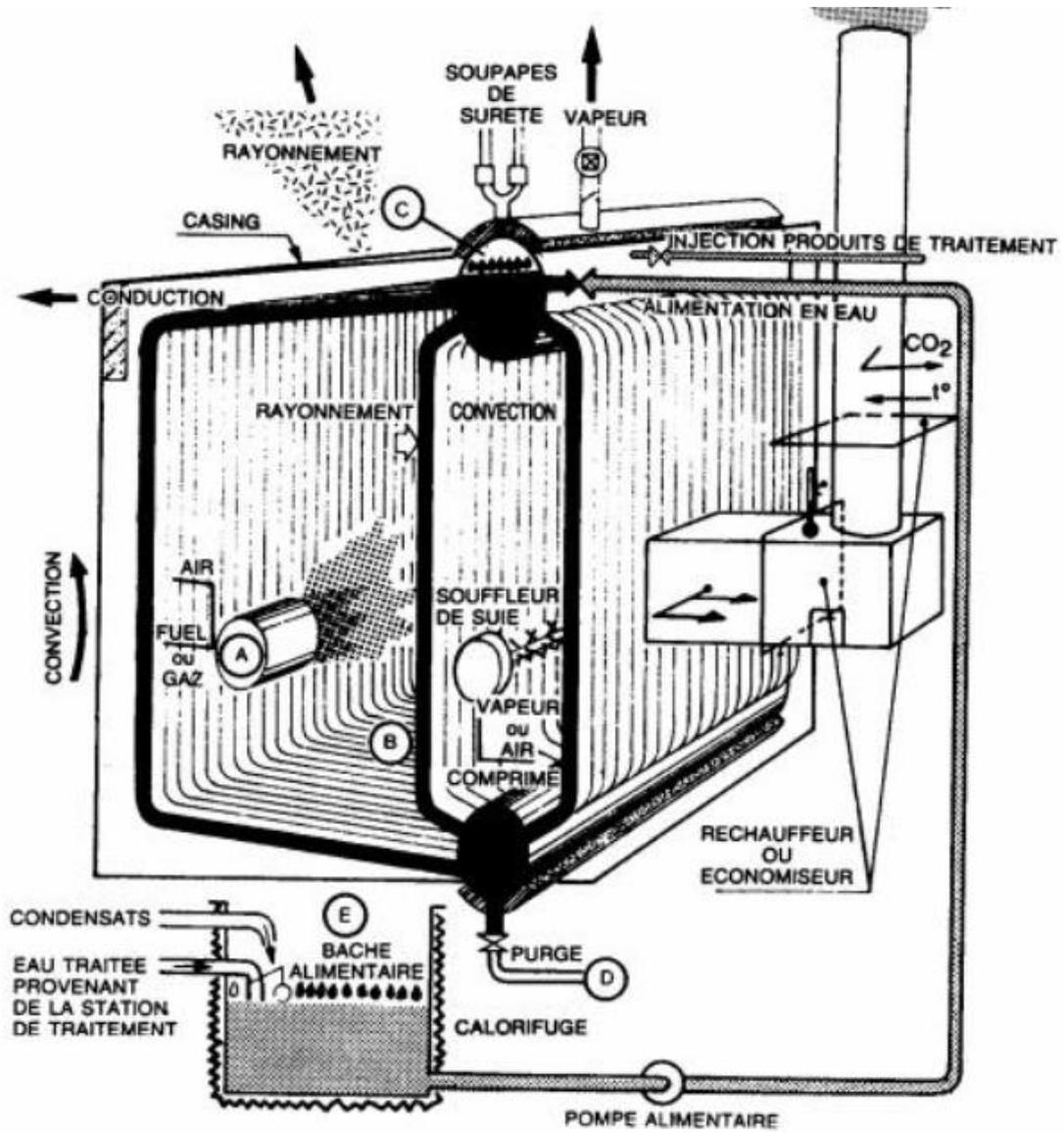
Modèle 4t/h fabriqué en Chine. Ventilateur pour injection air comburant sous la grille stationnaire.



Chaudière Bionerr installée chez Biolandes – Ambanja.
Audit énergétique demandé, isolation chambre combustion à renforcer. A priori chaudière cylindrique tube des fumées, infos complémentaires à récupérer.



Chaudière d'occasion importée utilisée à Grasse. Grille amovible actuellement fixe. Porte d'enfournement position haute en permanence.
Usage bois rondin et sciure



Source : mémoire fin d'études de Christian Mohamady, université d'Antananarivo

Figure 14. Schéma de principe d'une chaudière vapeur à tubes d'eau

3.6.3. Chaudière vapeur mixte (bois/huile vidange) 0,2 T/h - Tubes de fumées

Principe général

La chaudière se caractérise par une réserve d'eau cylindrique parcourue par une série de tubes de fumées dans le sens de la longueur. Dans l'installation visitée en cours de construction le foyer de combustion accueillera un brûleur à huile de vidange et un brûleur à bois bûche en cas de pénurie d'huile.

Instrumentation de contrôle : un manomètre.

Présence d'un abri de protection

Présence systématique d'un hangar de stockage du bois.

Organes de sécurité : soupapes, vannes de purge, etc.



Avantages

Maintenance locale, gestion simplifiée

Réduction pénibilité pour le manoeuvre

Gestion plusieurs cuves plus facile et puissance délivrée plus régulière avec un seul poste de chauffe

Réduction temps total de distillation

Inconvénients

Pénibilité (enfournement du bois, ..) moindre avec huile de vidange

Maintenance annuelle, entretien régulier suivant dureté de l'eau

Perte de rendement aux faibles demandes de puissance

Rendement énergétique : 60 - 65 %

Qualité de combustion : mauvaise à acceptable par intermittence

Coût installé (chaudière):

25 000 €

Impact qualité huile :

amélioration qualité

Répartition des pertes – estimation

Inertie thermique chambre combustion non valorisée : 20 %

Pertes dans les fumées (sensible et mauvaise combustion) : 65 %

Pertes surfaciques : 15 %

Température des gaz de combustion en bas du conduit de fumée : 250 - 300 °C



Chaudière en cours d'installation sur le site de Zara Voyage à Andrafia (Nosy Be). Le parcours des gaz de combustion passera d'abord en dessous de la cuve cylindrique et fera un demi-tour à travers les tubes de fumées pour être évacués par le conduit de fumées en arrière plan de la photo.

3.7. Initiatives sur les combustibles

Le bois est un combustible extrêmement abordable actuellement à Madagascar, autour de 1,5 à 3 centimes d'euro par kilogramme. Toutefois son prix augmente rapidement du fait de sa raréfaction comme observé sur les 3 dernières années à Nosy Be (doublement du prix entre 2016 et 2019).

	Bois Hb 30*	Huile vidange	Gasoil	GPL	électricité
Prix unitaire (€/kg)	0,015	0,26	0,86	1,363	
Contenu énergétique (kWh/kg)	3,4	9,5	12,5	13	
Prix au kWh (€/kWh)	0,004	0,027	0,069	0,105	0,304**
Hypothèse rendement énergétique	25%	60 %	60%	60%	90%
Prix au kWh fourni (€/kWh utile)	0,019	0,046	0,115	0,175	0,338

*humidité moyenne observée, cf. 4.2 pour plus d'explications, **prix minimal électricité par groupe électrogène (données Nicolas Livache, 2019)

Figure 15. Tableau comparatif des coûts de différents types d'énergie à Nosy Be (Source : AUTEUR, 2019)

Bien que les rendements énergétiques des dispositifs identifiés à Madagascar fonctionnant au bois soient en grande majorité faibles, le bois-énergie reste une énergie extrêmement compétitive en comparaison avec les autres énergies.

Il est en effet difficile pour un distillateur malgache d'utiliser une autre énergie. Il représente déjà de 10 à 30% des charges de production suivant le type de matière verte à distiller.

➔ Simulation économique pour une cuve de 100 kg d'Ylang Ylang à Nosy Be (chiffres fin 2019)

Charges (en Ariary)	bois	%	Huile	%	gasoil	%
Amortissement - maintenance	12 000	2%	12 000	2%	12 000	1%
Amortissement surcoût			12 000	2%	12 000	1%
Matière Verte	400 000	82%	400 000	66%	400 000	50%
Manœuvre	10 000	2%	10 000	2%	10 000	1%
Combustible	60 000	12%	165 900	27%	364 980	45%
Divers	5 000	1%	5 000	1%	5 000	1%
Total	487 000	100%	604 900	100%	803 980	100%
Vente HE	592 500		592 500		592 500	
RBE* par distillation	105 500	18%	-12 400	-2%	-211 480	-26%

*Résultat Brut d'Exploitation, Hypothèse rendement énergétique bois : 25%, huile de vidange et gasoil : 60%

Figure 16. Tableau de simulation économique pour la distillation de 100 kg d'ylang-ylang avec trois combustibles différents (Source : AUTEUR, 2019)

Un petit distillateur d'HE2Y (majorité des distillateurs) gagne donc 26 euros par distillation actuellement (avec une centaine de distillations par an). S'il passe à un autre combustible même avec de meilleur rendement énergétique facilement atteignable autour de 60%, il ne pourra pas dégager de bénéfice.

Pour les distillateurs de HEFG, ce bénéfice se situe autour de 13 euros par distillation (une cinquantaine de distillations par an).

Les prix des HE fluctuent (actuellement à la baisse pour l'Ylang Ylang) ce qui limite la capacité de prise de risque des distillateurs (nouveaux investissements, changement de technologie). Une marge de 18% à 20% (part revenant au distillateur sur le prix de vente) est actuellement possible pour les distillateurs, ce qui est un minimum pour une activité de petit volume.

→ Les initiatives en lien avec les combustibles

Pour limiter la pression sur le couvert forestier et donc l'usage de bois non géré par les unités de distillations, plusieurs initiatives ont été entreprises.

- *Reboisement avec essences endémiques à croissance rapide*



Plusieurs initiatives de reboisement se mettent en place. A côté des plantations d'eucalyptus majoritaires sur les hautes terres, on va retrouver une préférence pour d'autres essences à croissance rapide préférées pour une meilleure préservation des sols.

- *Usage d'essences invasives : bambou, avocat marron -litsea glutinosa, grevillea banksii...*



Une autre piste est de tirer profit de la présence de plantes considérées comme invasives. Elles constituent un excellent combustible une fois façonnées et séchées. On peut citer le cas de l'entreprise Jacarandas (Tamatave) qui utilise quasi exclusivement du bambou sur son site de distillation.

- *Agroforesterie*

Les actions de reboisement sont difficilement compatibles avec des zones à forte densité de population agricole. Il est alors privilégié des techniques agroforestières en utilisant l'arbre pour ces qualités fruitières, fourragères, de fertilisants des sols. On peut citer les essences suivantes les plus couramment utilisées (*acacia mangium*, *cassia siamensis*, *khaya*, *gliricidia specium*, etc.).



C'est une approche que cherche à privilégier des entreprises de taille moyenne à grande auprès des petits producteurs en facilitant l'accès à des plants avec des pépinières dédiées (approche suivie par Fragrant Garden sur Nosy Be par exemple, photo ci-contre)

- *Plantations spécifiques avec forte production de biomasse*

Certaines plantes présentent une forte productivité notamment en climat tropical. On peut citer le cas du miscanthus (herbe à éléphant). Ce type de plante permet une forte densité à l’hectare. Une récolte annuelle est possible avec un taux de productivité autour de 20 tonnes à l’hectare. Son séchage comme le bambou est bien plus rapide que le bois rondin. On peut citer l’exemple de l’entreprise *Green Elephant* en Ouganda qui déploie plusieurs pistes de valorisation du miscanthus.

Le CIRAD a notamment étudié la possibilité de valoriser des variétés de cannes à sucre (genre *saccharum*) à forte croissance intéressantes pour leur biomasse (cf. tableau ci-dessous).

Genres	Espèces	Continent	Rdt moyen Observée en plantation T de MS/ha/an	Rdt moyen espéré T de MS/ha/an
Pinus	radiata	Amérique du Sud	10	14
	taeda	Amérique du N et C.	4	4
	radiata	Océanie	8	9
	patula.elliottii	Afrique	6	8
	sylvestris	Europe	4	6
	massoniana	Asie	4	7
<i>Moyenne</i>			6	8
Eucalyptus	spp.	Amérique du Sud	14	22
	globulus	Océanie	9	10
	grandis	Afrique	10	12
	grandis	Asie	4	8
<i>Moyenne</i>			9.25	13
Acacia	nilotica	Afrique	7	8
	mangium	Asie	12	16
<i>Moyenne</i>			9.5	12
Populus	spp.	Amérique du Sud	5	7
		Amérique du N et C.	7	12
		Europe	10	12
		Asie	5	8
<i>Moyenne</i>			6.75	9.75
Pongamia		Asie	3	5
Sorghum		Amérique du N et C.	12	30
		Afrique	6	15
		Europe	13	30
		Asie	15	45
<i>Moyenne</i>			11.5	30
Zea	mays	Amérique du N et C.	25	15
		Afrique	6	
		Europe	20	45
		Asie	12	30
<i>Moyenne</i>			15.75	26.25
Panicum	virgatum	Amérique du N et C.	10	20
		Europe	10	20
<i>Moyenne</i>			10	20
Miscanthum	sinensis	Amérique du N et C.	10	20
			12	20
<i>Moyenne</i>			11	20
Saccharum	officinarum	Amérique du Sud	30	50
			30	50
<i>Moyenne</i>			30	50

Figure 17. Tableau d’analyse des rendements moyens de production de différentes espèces utilisées comme combustible (Source : CIRAD, 2010)

- *Valorisation des agro-résidus*

Une autre piste possible est la valorisation de résidus agricoles ou de procédés agro-alimentaire notamment (balle de riz, paille, coque de noix de cajou, coque d’arachide, tourteaux d’oléagineux, etc.).

Pour cela, l’expérience acquise en contexte similaire favorise la densification de ces biomasses diverses pour proposer un combustible unifié et réaliser des formulations (mélange de matières) permettant de

pallier les défauts de certains résidus (taux de cendre, présence de silice, d'huile comme dans la coque de noix de cajou, etc.)

Il est alors possible de concevoir des chambres de combustion standardisées très performantes pour des briquettes ou des palets densifiés.



Modèle de presse mécanique. Les premières capacités de production se situent autour de 400 kg/h pour les résidus agricoles (diamètre bûchettes/palets de 60 mm), avec une pression de 2 T/cm² produisant des briquettes densifiées de haute qualité (tenue mécanique, contenu énergétique) parfaitement adaptées pour un usage dans les unités de distillation.

Modèle de presse mécanique

La seule initiative mentionnée dans le milieu des unités de distillation est celle de l'entreprise Symrise avec la production de bûches densifiées à base de balles de riz. Le chauffage externe du tube d'extrusion est actuellement assuré par des résistances électriques entraînant un coût d'usage élevé. Les retours d'expérience sont mitigés pour une formulation avec uniquement de la balle de riz sur la tenue des aciers face à la forte abrasion engendrée par le taux de silice de cette biomasse entraînant des coûts de maintenance élevés.

- *Besoin de plateforme bois avec équipements adéquats (fendeuse notamment)*

L'absence de plateforme bois-énergie est un réel handicap pour une modernisation des équipements bois-énergie à Madagascar.



Présence de bois rondin de diamètre trop important pour une combustion de qualité avec temps de séchage 3 à 4 fois plus long que du bois refendu.

Mauvaise aération des stocks limitant la vitesse de séchage

Pratiques de stockage-séchage améliorables à faible coût d'investissement ou d'organisation



Ne pas disposer d'un bois façonné et suffisamment séché est un lourd handicap pour améliorer sensiblement les performances des installations. Un gain en rendement permettrait d'absorber le surcout dû au façonnage – séchage tout en créant une activité locale.

Sur l'île de Nosy Be, une seule fendeuse a été identifiée (site de SAB). On peut citer une expérience en cours aux Comores avec l'implantation d'une véritable plateforme bois afin de démontrer la viabilité de cette approche.

Fendeuse hydraulique de marque Rabaud



Modèle de recoupeuse robuste (prix usine 800 €) pour la préparation de bois d'élagage (diamètre maxi de 10 cm) pouvant être utilisée efficacement dans des chambres de combustion adaptées aux palets compressés (conditionnement et séchage facilités)

Recoupeuse à connecter à la prise de force d'un tracteur (contexte Nosy Be)

3.8. Conclusion sur l'état des initiatives sur les combustibles

Cette section du rapport a permis de balayer les initiatives à Madagascar et en contexte similaire que ce soit sur l'offre en biomasse durable en soulignant la difficulté du recours à d'autres énergies plus coûteuses compte tenu du contexte de production (majorité de petits producteurs) mais aussi sur l'étendue de la gamme des dispositifs de distillation avec des indications sur leurs performances et leurs coûts.

Au vu de cet état des lieux, on peut mettre en avant que Madagascar dispose de nombreux atouts pour faire face de manière durable et qualitative aux risques environnementaux et donc à termes sociaux et économiques liés à un usage de bois non géré qui est généralisé dans les filières de distillation d'HE.

Pour cela, il s'agira de s'appuyer sur trois piliers indispensables et indissociables :

- généraliser les **pratiques de gestion et de valorisation durables** de la biomasse disponible et potentielle
- faciliter la **diffusion de technologies plus performantes** suivant les typologies d'unités de distillation
- mettre sur pied les **conditions de démonstration, de formation, de capitalisation d'expériences** afin de faciliter l'accès à l'information objective et mesurée, de mener des recherches appliquées spécifiques, de disposer d'une génération de techniciens formés aux bonnes pratiques et à la conduite de ces équipements performants.

Avant de formuler les propositions pour la prochaine phase de l'étude en cours, nous allons revenir sur les éléments de contextes afin de bien définir la catégorisation nécessaire des équipements à développer.

4. Eléments de contexte (Madagascar et focus Nosy Be)

Sur la base de missions d'études antérieures de trois filières HE d'Ylang Ylang (Nosy Be)-HE2Y, de feuille de giroflier (Fenerive Est)-HEFG et de géranium (Hauts Plateaux)-HEG, nous allons dresser un premier constat des éléments suivants :

- Approvisionnement en matière verte
- Approvisionnement en combustible
- Ressources en eau
- Maîtrise du procédé
- Services d'appui aux unités distillation
- Rôle filière aval

4.1. Approvisionnement en matière verte

La maîtrise de la qualité finale de l'huile essentielle ainsi que le rendement de production (quantité d'HE par kilo de matière verte) et la consommation spécifique d'énergie (quantité de kWh/LHE) se jouent dès la collecte et les opérations de prétraitement de la matière verte si besoin avant le passage en alambic.

En effet, plus la matière verte sera chargée en huile (atteinte de maturité), plus le rendement de production sera haut.

Dans le cas de la feuille de giroflier par exemple, il a été noté que les feuilles au stade juvénile sont les plus chargées en huile. En outre, le rendement en essence augmente avec la durée de séchage allant de 2% pour un séchage de feuilles de 1 jour à 2,6% pour un séchage de plus de 4 jours (Gaylor Razafimamonjison, ESSA, 2013 & 2014).



Concernant les fleurs d'ylang-ylang, il est admis qu'il faut les collecter très tôt le matin à la température la plus basse, uniquement celles arrivées à maturité (couleur jaune).

Les opérateurs disposant de leurs propres champs et en recherche de haute qualité garantissent respecter cette condition. Je n'ai jamais pu visualiser de telles cueillettes mais plutôt comme la photo ci-contre un mélange de fleurs à différents stades de maturité.

L'argument avancé est qu'il n'est pas possible de refuser de tels lots car les producteurs de fleurs se tourneraient alors vers d'autres opérateurs moins scrupuleux.

On retrouve généralement dans la gestion d'unités ayant fait le choix de la qualité des agronomes de formation avec suffisamment de capacités opérationnelles (propres plantations dédiées).

L'autre point important est l'impact environnemental lié aux plantations dédiées. On peut citer l'exemple du géranium sur les Hauts Plateaux sur des zones de fortes pentes sans techniques antiérosives (maintien de haies sur courbes de niveaux, etc.), l'absence de jachères avec la poursuite d'un front pionnier et des pratiques de brûlis. Les techniques culturales à fort impact environnemental sont un point de vigilance souvent négligé.

Cependant, a contrario, on peut citer le cas des plantations d'ylang-ylang avec un impact plutôt positif.

Extrait du rapport Analyse de la filière ylang-ylang à Anjouan, Comores, Initiative Développement, 2014 : « Les paysans anjouanais signalent que la culture d'Ylang Ylang est bonne pour le sol (Félix 2009). Ainsi selon eux, la culture d'ylang-ylang est un bon précédent cultural. Si le prix des fleurs n'est plus intéressant, ils peuvent décider d'ététer leurs pieds d'ylang-ylang pour planter des cultures vivrières comme le manioc ou la banane qui leur donneront de bons rendements pendant les deux ans nécessaires à la reprise de la production florale. La plantation de pieds d'ylanguiers peut régénérer des sols devenus infertiles en 4 à 5 ans. »

On peut mentionner aussi les recherches menées par l'ESSA, le CIRAD, le CTHT pour identifier les bonnes pratiques culturales ainsi que les méthodes de collecte et de préparation avant distillation.

→ Valeur reportée à l'hectare planté

Les chiffres disponibles permettent de dresser le tableau suivant

Matière verte	Rendement production	Production HE par hectare planté	Valeur production/Ha
Girofle*	1,5%-2,5%	15-25 kg	150 – 250 €
Ylang Ylang*	2 % - 2,7%	30-50 kg	2 250 – 3 750 €
Vétiver**	1 % - 1,5%	10-30 kg	1 960 - 5 880 €
Citronnelle**	0,2%-0,5%	60-150 kg	1 860 - 4 650 €
Géranium*	0,1% - 0,2%	8 -10 kg	800 – 1 000 €

* chiffres études antérieures JF Rozis, ** chiffres filière HE à Madagascar – PIC 2019-

Figure 18. Tableau comparatif des rendements de production et valeurs de production par hectare de différentes plantes à Madagascar (Source : AUTEUR, 2019)

Le chiffre bas à l'hectare pour la filière girofle explique la production d'huile essentielle comme une activité complémentaire, de soudure en complément de la production des clous. Pour les autres cultures, il s'agit souvent de la source de revenus principale pour les producteurs concernés.

→ Données d'extraction par litre d'HE

Pour ce qui concerne ce rapport, il s'agit ici de bien discerner le comportement durant la distillation des différentes matières vertes. Concernant les trois filières HE2Y, HEFG, HEG, on peut dresser le tableau suivant

Ratio	HE2Y	HEFG	HEG
Durée distillation	16 -24h	15 -19 h	2 h
Rendement de production (extraction)	2 % – 2,7%	2,2 - 2,5%	0,1 – 0,2 %
Energie utile /LHE*	165 kWh/LHE	106 kWh/LHE	350 kWh/LHE
Consommation spécifique (départ à froid)	710 kWh/LHE	451 kWh/LHE	1040 kWh/LHE

*d'après suivi instrumenté, JF Rozis, 2018-2019

Figure 19. Tableau comparatif de la consommation énergétique des distillations pour trois types d'HE à Madagascar (Source : AUTEUR, 2019)

On voit ainsi que la distillation d'HE de géranium va demander de par ses spécificités d'extraction (faible rendement de production) 2 à 3 fois plus d'énergie utile que l'extraction d'HE2Y ou d'HEFG malgré un temps court de distillation.

Les consommations spécifiques mesurées tiennent compte, elles, du rendement énergétique des installations représentatives suivies (entre 23 et 34 %).

FOCUS sur NOSY BE

Les ylanguiers sont plantés sur tous types de terrain à une densité généralement comprise entre 400 et 600 pieds par hectare. La productivité moyenne serait de 1 à 1,2 t de fleurs fraîches à l'hectare par an. Une personne peut cueillir entre 3 et 16 kg de fleurs par jour. Le prix des fleurs est en baisse actuellement, la filière aval est en recul sur l'achat d'HE2Y.

La qualité des HE2Y à Nosy Be ne permet pas de produire en quantité de l'extra supérieur et de l'extra contrairement aux Comores (génétique et effet terroir des ylanguiers).

La norme AFNOR - NF ISO 3063 - Août 2005, reconnaît 2 types d'ylang ylang : Comores-Mayotte et Madagascar

Qualité de l'huile essentielle	Densité	% dans les HE malgaches	% dans les HE comoriennes
Extra Supérieure (ES) et Extra (E)	950°-970°	3%	24%
Première	934°-945°	20%	10%
Deuxième	920°-932°	17%	8%
Troisième	900°-916°	60%	58%

IFEAT 2006

- En résumé, on peut noter une forte marge de progression concernant la production de matière verte, que ce soit dans la vigilance sur les impacts environnementaux des pratiques culturales (érosion, front pionnier, ratio des superficies plantées par zone, ...) ou que ce soit dans le besoin en énergie nécessaire à la distillation dépendant des spécificités ou de la cueillette et du mode de préparation de la matière verte.

4.2. Approvisionnement en combustible

L'énergie majoritairement utilisée pour la production des huiles essentielles à Madagascar quelle que soit la taille de l'unité de distillation est le bois énergie. Ce bois de chauffe est exclusivement du bois collecté sans plan de gestion spécifique. Cela ne veut nullement dire du bois à 100% non renouvelable, raccourci simpliste des modélisations en lien avec la finance carbone.

Néanmoins, le déséquilibre entre une production durable en bois-énergie et la superficie dédiée sur des zones délimitées (comme dans le cas de Nosy Be par exemple), montre un besoin de gestion plus soutenue en lien avec une forte réduction de la consommation (amélioration énergétique des installations).

→ Le bois combustible

Le bois combustible dans la gamme de puissance qui nous concerne, c'est à dire entre 50 et 150 kW, dispose de caractéristiques propres :

- forme adaptée à une combustion de qualité (diamètre maximal autour de 15 cm, longueur adaptée à la chambre de combustion, réduite pour des sections non rectilignes),
- humidité en dessous de 30% sur base humide idéalement autour de 20%.

Les mesures de teneur en eau durant la mission (actuellement fin de saison sèche) se sont situées entre 30 et 45% en base humide. On utilise la notion Hb pour la teneur en bois en base humide (Hb), un bois avec 30% d'eau sur sa masse totale (masse humide) sera défini bois Hb30.

Le contenu énergétique du bois chiffré en kWh dépend de sa composition et de sa teneur en eau. La seule méthode pour connaître le contenu énergétique d'un tas de bois est, à minima, de le peser, d'estimer sa teneur en eau et de connaître son pouvoir calorifique anhydre caractéristique de son essence (sinon à déterminer avec une bombe calorimétrique, une mesure d'humidité et une analyse élémentaire pour connaître le pourcentage massique d'hydrogène dans le combustible participant à la formation de vapeur d'eau).

Essence feuillus (France)	PCI anhydre (kWh/kg)
Chêne	5,040
Hêtre	5,140
Châtaignier	5,190
Charme	4,970
Frêne	5,090
Bouleau	5,020
Acacia	5,270
Aulne	4,910
Peuplier	4,890
Orme	5,170
Moyenne	5,070
Ecart maximum	380 soit 8%
Essence résineux (France)	PCI anhydre (kWh/kg)
Pin maritime	5,350
Sapin	5,320
Epicéa	5,260
Pin sylvestre	5,350
Douglas	5,290
Moyenne	5,330
Ecart maximum	60 soit 1%

On utilise dans le cas d'équipement sans possibilité de récupération de l'énergie de condensation contenue dans les fumées de combustion la notion de **pouvoir calorifique inférieur (PCI)**.

On définit généralement des classes de bois comme les feuillus durs, les résineux avec des gammes de PCI anhydre très proches.

Pour connaître ensuite le contenu énergétique de son tas de bois, il suffit d'appliquer la formule suivante connaissant la teneur en eau de son bois :

$$\text{PCI humide} = \text{PCI anhydre} * (100 - \text{Hb})/100 - 6,78 * \text{Hb en kWh/kg}$$

Un kilo de bois Hb45 ne contient que 2,5 kWh contre environ 4 kWh pour un kilogramme de bois Hb20.

Certains rétorquent que compte tenu de la perte en eau, faire sécher du bois de 45% d'humidité à 20% d'humidité ne permet qu'un gain de 9% en énergie à masse initiale équivalente. Il y a juste un oubli important, un bois humide va abaisser fortement la température de flamme et donc les échanges thermiques c'est-à-dire le rendement énergétique global. Entre 45 % et 20% de teneur en eau, ce sont 30 à 35 points de rendement qui sont gagnés par une chambre de combustion bien conçue du seul fait de la teneur en eau. Une faible teneur en eau du combustible bois est donc primordiale pour réduire les

consommations de bois. C'est un point tout aussi important que la technologie elle-même et souvent passé à tort en second plan.

➔ **Unité de mesure des consommations**

Une des difficultés de comparaison des performances avec le bois combustible est le besoin de mesurer et le poids et la teneur en eau du tas de bois utilisé lors d'un cycle de distillation dans notre cas.

Les pesées effectuées lors du suivi sur le site de Larissa à Nosy Be, à même teneur en eau ont montré des différences notables entre des tas de petits bois (diamètre de 3-5 cm) et des tas de diamètres intermédiaires (6-14 cm) à gros (15 – 30 cm). On a obtenu 250 Kg / m³ pour le petit diamètre contre 350 kg/m³ (avec une teneur en eau de 45%).

On est donc loin des standards habituels de 500 kg/m³ de bois sec couramment utilisé.

Tout ceci pour dire que fournir des comparaisons de consommation sur la base de m³ ne permet en aucun cas de conclure sur les économies réalisées, la marge d'erreur est bien trop importante.

On ne peut se passer d'un audit instrumenté sur une base méthodologique unifiée.

FOCUS sur NOSY BE

L'approvisionnement en bois s'effectue à l'aide de tracteurs. Le prix au m³ se situe autour de 20 000 Ar/m³ soit environ 1,5 ct€/kg.

Fournir du bois géré durablement Hb20 de qualité à 6 ct€/kg (4 fois plus cher) serait sans effet sur le chiffre d'affaire dans un dispositif de distillation à 80% de rendement énergétique comparativement à la situation actuelle !!

Les essences agroforestières type *Acacia mangium*, *Cassia siamensis* ou *Khaya* sont préférées à l'eucalyptus pour les efforts de reboisement par les petits et moyens producteurs sur leurs zones de plantation.

Il n'y a pas de déchets de biomasse non valorisés sur l'île pour servir d'alternatives. Possible sur la grande terre en zone d'Ambanja. Néanmoins, une étude d'opportunités reste nécessaire pour en valider la faisabilité.

- ▶ Il y a une nécessité forte de progresser dans la gestion durable du bois et son façonnage-stockage-séchage. Le bois-énergie utilisé dans les unités de distillation ne doit plus être considéré comme une calamité par les divers parties prenantes mais une opportunité pour maintenir un couvert boisé notamment par le biais d'essences agroforestières pour disposer d'une énergie abordable sur le long terme, poursuivre la protection des sites naturels en conservant des zones tampon gérées durablement, permettre la création et le maintien d'emplois locaux, accroître le captage de l'eau des sols et la lutte contre l'érosion, lutter contre le tarissement des sources d'eau.

4.3. Ressources en eau

La ressource en eau conditionne le choix de la localisation de l'unité de distillation. Les débits mesurés pour l'eau de refroidissement sont autour de 20 L/min.

Il sera aussi privilégié une eau de source à faible dureté pour ceux ayant fait le choix d'une chaudière vapeur pour réduire les problèmes d'entartrage. Certains sont obligés d'arrêter la production chaque mois (site de Foutsios) et de retirer la couche de tartre formée pour conserver des bonnes performances de production de vapeur. D'autres ont recours à des dispositifs d'adoucissement de l'eau (Fragrant Garden).

ZOOM sur NOSY BE

La distillation des 3 000 t de fleurs d'ylang ylang a nécessité cette année :

- 3 000 m³ d'eau pour la production de vapeur
- 600 000 m³ d'eau de refroidissement.

Avec des saisons sèches de plus en plus sévères, beaucoup de sources se tarissent ce qui réduit la possibilité de poursuite de l'activité de distillation. La ressource en eau devient le problème le plus important pour les petits distillateurs.

Des systèmes de récupération sont de plus en plus utilisés pour les eaux de refroidissement dans un réservoir en contrebas. Une pompe après refroidissement de cette eau permet de remplir de nouveau le réservoir amont pour la prochaine distillation.

En contrepartie, les sites très boisés comme visité chez SPPM bénéficie d'une eau abondante toute l'année. Le lien entre conservation d'un couvert forestier et captage de l'eau est ici clairement établi.

- ▶ En résumé, l'approvisionnement en eau sur toute l'année à coût moindre est un facteur limitatif important. Le lien entre tarissement et maintien du couvert forestier a été clairement établi sur Nosy Be. Il s'agit d'un risque important sur la filière HE2Y à Nosy Be.

4.4. Maitrise du procédé de distillation

Nul ne peut nier la très longue expérience des opérateurs traditionnels disposant de plusieurs décennies de pratiques. Ce savoir-faire empirique se voit renforcer notamment par l'arrivée d'une nouvelle génération d'agronomes malgaches compétents dans le secteur à la tête de nouvelles unités avec une recherche de qualité.

Des rapprochements réguliers se font avec le milieu universitaire. On peut citer le travail d'optimisation du procédé sur base de la méthodologie des plans d'expériences factoriels effectué chez SPPM en lien avec l'université d'Antananarivo, les divers travaux de l'ESSA sur les facteurs influençant la qualité des HE, etc.

Les facteurs influents sont nombreux comme le niveau de chargement de la cuve, le niveau et la régularité du débit de condensat, la pression de vapeur, la forme de la cuve, le matériau de la cuve, la spécificité de la matière verte et sa préparation avant distillation, etc.

L'expérience du distillateur est de définir le meilleur compromis pour maintenir la qualité demandée par la filière aval en fonction de ses contraintes économiques, d'approvisionnement, technologiques, etc. Tel distillateur se voit contraint d'accepter des fleurs non mures de crainte de perdre sa source d'approvisionnement.

A l'opposé de ces distillateurs professionnels, on note un nombre important de petits et moyens opérateurs ne disposant pas de ce savoir-faire sur ces bonnes pratiques : peu d'implication du gérant, absence de formation dédiée du technicien de distillation relégué au simple rang de manœuvre en charge de l'enfournement du bois. On assiste alors au non contrôle des débits de condensats, à des pertes de vapeur chargées en huile, au non contrôle de la température du condensat, ...

Cette situation est très commune sur les filières où l'activité de distillateur n'est pas réellement professionnalisée mais plutôt opportuniste assurant une partie non majoritaire des revenus du distillateur (exemple sur la filière HE des feuilles de giroflier). Les gestes et pratiques sont alors peu optimisés.

L'autre point rarement évoqué dans les échanges est la situation préoccupante pour les manœuvres en charge de la distillation exposés à des températures élevées (impressionnant sur le site de Madamanag à Nosy Be) et des ambiances chargées en particules fines nocives et monoxyde de carbone avec, en sus, une forte pénibilité (charges lourdes des billots de bois non façonnés).

Certains sites d'opérateurs de taille respectable (une dizaine de cuves) sont indignes de ce point de vue alors que certains ont fait de réels efforts (exemple chez Larissa, Foutsios, Zara Voyage, Fragrant Garden pour le cas de Nosy Be) avec des hangars très aérés ou des conduits de fumées opérationnels.

- ▶ Il est évident que les filières des HE à Madagascar disposent de plusieurs décennies de savoir-faire empirique qui ont permis à certains opérateurs d'accumuler un savoir-faire solide. Toutefois, l'absence de centre de formation dédié (sur le modèle des écoles de métiers) voire de centre de ressources (cf. modèle du CRIEPPAM dans le Sud-Est de la France) permettant de diffuser des informations objectives validées par l'expérimentation et accessibles à tous fait perdurer des pratiques non optimisées sur les plans énergétiques (matière verte peu chargée en huile, maîtrise de l'enfournement de bois rarement calibré, cohobation non justifiée, l'absence de contrôles comme la température du condensat, du débit de condensat, un temps de distillation extrêmement long, etc.). L'absence d'instrumentation minimale ne facilite pas cette maîtrise du procédé.

4.5. Services d'appui aux unités de distillation

Les services d'appui aux unités de distillation sont limités. Il a été mentionné sur Nosy Be pour les chaudières de grande capacité un contrôle annuel de la fiabilité des systèmes de sécurité.

Les gérants n'ont que peu de ressources pour faire progresser sur les plans énergétiques leurs installations. Certains grands opérateurs ont insisté sur le besoin d'audits énergétiques de leurs installations, mettant en avant un manque d'expertise dans ce secteur.

Sur Nosy Be, il est attendu un laboratoire d'analyse des HE dédié à la région de Diana pour ne pas dépendre de Tananarive pour exporter et contrôler la qualité produite, expérimenter de nouveaux dispositifs et procédés.

4.6. Rôle des acteurs de la filière aval

Nous avons vu précédemment le lien fort entre exigence de qualité des HE et économies de combustible. Le rôle de la filière aval est donc prépondérant pour exiger ce niveau de qualité et refuser des HE de basse qualité. Dans la réalité, il n'en est rien. La filière aval est en capacité d'identifier un débouché commercial pour tout type d'huile même frelaté comme mentionné pour l'HE2Y aux Comores.

Ceci est quelque part une malchance pour la fleur d'ylang ylang qui peut fournir pendant 24 heures de distillation une troisième qualité qui trouve preneur à un coût suffisamment motivant pour les distillateurs. L'extraction des dernières heures compte tenu du faible débit de production d'huile essentielle est à la limite de la rentabilité. Au prix actuel du bois sur Nosy Be, le débit d'extraction peut toutefois descendre jusqu'à 20 g/h de troisième qualité.

Néanmoins, on a pu assister ces dernières années à une prise de conscience de la filière aval sur l'impact de l'usage de biomasse non gérée sur le rythme de la déforestation visible dans certaines zones.

Il y a une crainte d'une image écornée notamment chez les représentants de l'industrie du luxe auprès de la société civile en Europe ou aux Etats Unis si un lien est établi entre déforestation et élaboration de parfums d'exception.

Des initiatives ont été mises en place. On peut citer par exemple, les projets de la Fondation Givaudan sur la filière HEFG sur Fenerive ou à Sulawesi sur la filière patchouli (amélioration énergétique des alambics, plantations d'arbres à croissance rapide en lien avec les distillateurs,...).

Certains labels existent pour encadrer la répartition de la chaîne de valeur et les actions au bénéfice des communautés sur les sites de production (matière verte et distillation). On peut citer le label « Fair for Life » sur la filière HEFG en lien avec Ecocert.

Toutefois, ce type de label montre ses limites et ne garantissent nullement la limitation de la déforestation par l'usage excessif de bois non géré notamment en bordure de sites naturels.

Le Projet PIC2 dispose d'un savoir-faire dans l'encadrement de règles commerciales entre la filière aval et la filière productrice à Madagascar de par son expérience sur la filière cacao en région de Diana. Il est vrai que la filière aval pour le cacao fin est bien mieux structurée pour répondre à ce besoin d'établissement des règles du jeu avec le souhait d'un maintien de la qualité.

- ▶ On note ici aussi une grande marge de progression pour que la filière aval s'implique davantage dans le respect d'une offre qualitative des HE de Madagascar tout en limitant les externalités négatives (déforestation, érosion, pollution, impact sanitaire pour les manœuvres notamment, etc.)

5. Identification des pistes pertinentes pour les filières HE à Madagascar

Après ce balayage des solutions existantes en contexte similaire ainsi que les contraintes spécifiques et contextuelles dans la production des HE à Madagascar, il est maintenant possible de :

- définir un cahier des charges d'un dispositif répondant aux attentes de performances et aux contraintes contextuelles d'usage
- d'établir une liste de dispositifs adaptés à chaque typologie d'unité de distillation
- de choisir celui qui semble le plus pertinent à prototyper dans cette phase de démonstration

5.1. Cahier des charges d'une unité de distillation d'HE performante en contexte malgache

Avant de prendre en compte les déclinaisons contextuelles, dressons le cahier des charges d'un alambic performant adapté au contexte malgache.

Les éléments à considérer sont listés comme suit :

- A) Niveau d'investissement
- B) Choix du principe feu direct vs chaudière vapeur
- C) Niveau de puissance
- D) Niveau et pérennité de la performance énergétique
- E) Durée de vie et maintenance
- F) Construction locale vs modèles importés
- G) Adapté à un combustible solide à faible coût
- H) Moyens de contrôle, sécurité et facilité d'usage
- I) Ergonomie et environnement de travail

- **A) Niveau d'investissement**

Le niveau d'investissement fixe le choix des matériaux, la qualité finale et souvent la longévité de l'équipement. L'expérience acquise en matière de large diffusion d'équipements énergétiques en contexte similaire montre une limite de subventions autour de 30% en phase initiale pour faciliter la dynamique de diffusion.

Cette subvention peut alors ne plus être nécessaire pour déclencher l'acquisition (exemple expérience aux Comores avec le modèle UDAFE). Au-delà de 30%, de nombreux projets ont connu des échecs sur la durée lorsque le niveau de subvention a dû être réduit.

L'autre élément de calcul avec ou sans subvention est de se fixer un temps de retour sur investissement par le gain en qualité /quantité des HE et la réduction de la consommation de combustible. Il s'agirait de se situer sur un temps de retour maximal de 2 ans du surcoût généré par la solution améliorée qui, après cette période, commencera à générer un gain de revenus pour le distillateur.

La fluctuation du marché des HE ne facilite pas l'allongement de ces temps de retour (visibilité insuffisante, risque d'arrêt de l'activité si la rentabilité des unités de distillation diminue trop fortement). Ces considérations seront à étudier par le PIC2 pour pérenniser l'éventuel mécanisme d'appui financier à l'investissement.

Il est donc très important de lier le surcoût final du dispositif amélioré avec la réalité économique de l'activité et le niveau de professionnalisation du bénéficiaire (nombre minimal de distillations par an, activité principale génératrice de revenus). Le niveau d'investissement pourra être d'autant plus élevé que l'équipement sera utilisé au plus près de sa capacité nominale de charge tout au long de l'année.

▪ B) Choix du principe feu direct vs chaudière vapeur

A ce stade, il n'est pas possible de trancher entre ces deux technologies. Chacune dispose de son intérêt dans son contexte d'usage :

- 1 cuve ou plusieurs cuves
- Maîtrise technique suffisante pour usage/entretien de chaudière vapeur
- Mono production ou multi produit
- Spécificité de distillation de la matière verte (vapodistillation obligatoire ou non)

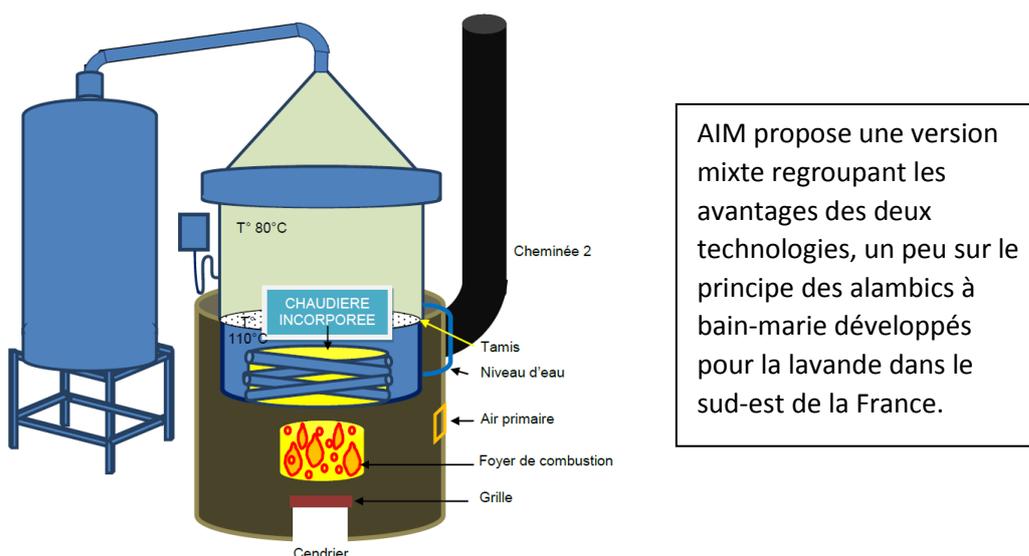


Figure 20. Schéma de principe d'une proposition de version mixte par AIM, 2019

▪ C) Niveau de puissance

En combustion bois performante, on fixe cette puissance nominale et on peut moduler dans une moindre mesure (environ +/- 30% autour de cette puissance nominale) pour garder une bonne qualité de combustion avec un tirage adapté. Si un besoin de puissance est très différencié, il faudra opter pour un équipement à plusieurs brûleurs.

Le niveau de puissance est déterminé dans notre cas par le débit de condensat visé (et la pression de vapeur recherchée). Ce débit optimal est connu par l'expérience des distillateurs. Il faudra donc contextualiser cette puissance suivant les cas et donc aboutir à une gamme de puissance pour chaque typologie d'équipement.

La grande majorité des sites sont de petite taille (une seule cuve de 80 kg à 200 kg de MV) à moyenne (jusqu'à 1 000 kg de MV composés de plusieurs cuves).

▪ D) Niveau et pérennité de la performance énergétique

On peut d'ores et déjà fixer un rendement énergétique minimal pour les futurs équipements, rendement à assurer sur la durée (tenue des matériaux, qualité de la construction, facilité d'entretien).

C'est le point principal qui fait défaut sur la majorité des installations visitées.

On peut donc viser un rendement minimal de 60% pour les équipements les plus basiques et les moins coûteux (usage de bois Hb30 maxi, absence retours de flammes à l'enfournement, maîtrise des entrées

d'air, tirage adapté à la puissance, faibles pertes surfaciques, surface d'échange suffisante, température bas de conduit de fumées maximale de 250°C, etc.).

Pour les dispositifs à feu direct, seul le modèle indonésien présenté ci-dessus a montré la faisabilité de ce niveau de rendement minimal. La tenue dans le temps des parties maçonnées et de la grille reste à améliorer pour garantir la pérennité de ce niveau de rendement.

Pour les équipements d'une gamme performante, avec des surcoûts maîtrisés sur la base d'un savoir-faire en technologie de combustion bois bûche récent, l'usage de bois sec, on peut viser un rendement énergétique au-dessus de 80%, proche de 90%.

Concernant les chaudières importées, le surcoût de modèles performants rend difficile leur amortissement sauf pour les unités de très grande taille. Les modèles importés de Chine visités lors de la mission état des lieux sur Nosy Be disposent d'une technologie très basique de combustion bois bûche. Elles nécessiteraient un audit énergétique et une expertise technique pour s'assurer du respect de ce rendement minimal (maîtrise réglage entrée d'air, gestion du bois, procédures d'entretien et de nettoyage régulier, ajout instrumentation réglage entrée air et température de fumées voire à terme régulation ventilateur entrée d'air et extracteur, rationalisation de la gestion des flux vapeur en lien avec le débit production).

A cette condition, cette gamme d'équipements existants peut déjà remplir le cahier des charges minimal pour maîtriser les niveaux de consommation de bois-énergie dans les filières HE de Madagascar.

▪ **E) Durée de vie et maintenance**

La durée de vie des équipements est généralement faible mis à part la cuve (intervention lourde entre 3 à 4 ans pour reconstruire la partie chambre de combustion). Entre temps, les rendements énergétiques ont grandement chuté.

Le coût d'investissement initial est donc une donnée insuffisante pour comparer économiquement les dispositifs. Il faut préférer une comparaison sur une durée de 10 ans qui privilégiera les dispositifs à longue durée de vie bien construits, avec des matériaux à bonne tenue dans les temps face aux contraintes thermiques imposées par les cycles de distillation. Meilleure est la combustion et donc le rendement énergétique, plus haute est la température de flammes et donc les contraintes thermiques dans cette zone.

Cette méthode de conception initiale des équipements est plus proche de la réalité économique bien que l'on soit sur un temps d'analyse plus long.

Il est proposé de fixer un objectif de durée de vie à fonctionnement nominal sans intervention lourde de 10 ans ce qui sera très innovant dans le contexte actuel.

▪ **F) Construction locale vs modèles importés**

Pour la gamme des dispositifs à feu direct, il est clair que l'importation d'équipements clés en main n'est pas tenable économiquement. Pour les chaudières de grande taille, la comparaison peut être envisagée, choix déjà réalisé par certains opérateurs.

Madagascar a toutefois des atouts à prendre en compte dans la possibilité d'appropriation technologique pour déployer une gamme d'équipements de bonne qualité et à hautes performances pour la distillation des HE.

Deux équipementiers se sont positionnés sur le marché :

- **AIM** avec 20 ans de développement technologique dédié,
- **Bionerr** très avancé sur la production et l'assemblage d'éléments réfractaires en construction maçonnée (fours, chambre de combustions, etc.).

Les niveaux d'équipements/outillages, la maîtrise technique des ateliers de construction en chaudronnerie, l'existence de chaudronniers industriels comme Someto, démontrent une réelle capacité de production de qualité dans le pays.

Il est donc proposé de réfléchir à appuyer ces équipementiers pour faciliter l'émergence d'une filière de production, d'installation, de maintenance et d'audit d'unités de distillation d'HE de bon niveau de performance énergétique comme défini ci-avant.

Les modalités sont à définir pour faciliter cette appropriation : centre de démonstration-formation dédié, procédure de brevet national pour permettre la neutralité du transfert technologique et garantir la pérennisation des acquis technologiques.

▪ **G) Adapté à un combustible solide à faible coût**

Comme démontré, il semble très compliqué en prenant en compte la marge de progression de la chaîne de valeur des HE, le niveau de structuration de la filière et la prédominance d'unités de petites et moyennes tailles de trouver une alternative à la biomasse.

Cela veut dire une capacité des parties prenantes à utiliser exclusivement à terme du bois géré et/ou à utiliser les biomasses disponibles (plantes invasives, résidus agricoles ou de procédés agroalimentaires, etc..). Cela devra se traduire par un autre travail de transfert technologique pour produire des palets et briquettes compressées de qualité, standardisés, à coût compétitif face au bois non géré, aptes à valoriser une large gamme de résidus. Des contacts sont déjà établis avec des structures référentes dans le domaine.

La standardisation des combustibles sous forme compressée ou de bois rondin ou recoupé permettra une standardisation et donc une réduction des coûts de production des chambres de combustion tout en garantissant une grande homogénéité des performances.

▪ **H) Moyens de contrôle, sécurité et facilité d'usage**

L'absence de moyens de contrôle limite la compréhension du comportement énergétique des installations. A minima, il semble pertinent de recommander l'usage de thermomètre en bas de conduit de fumées pour vérifier le bon usage du dispositif et vérifier la dérive dans le temps de la qualité de l'échange thermique (besoin d'entretien, réglages).

Pour les équipements performants, cela peut aller jusqu'à un contrôle de température de flamme ou de taux d'oxygène dans les fumées (sonde lambda) pour ajuster les réglages air primaire et air secondaire.

Lors d'un travail au-dessus de la pression atmosphérique ou de l'usage d'une chaudière vapeur, en sus du dispositif de contrôle du niveau d'eau, il est recommandé de généraliser l'usage de manomètre.

Les dispositifs de sécurité (soupape de sûreté et de décharge) doivent être systématisés et contrôlés régulièrement.

L'amélioration technologique doit se traduire par une plus grande facilité d'usage (combustion de bois plus régulière ne nécessitant plus l'intervention constante du manoeuvre) ce qui est le cas avec les systèmes de combustion bois performants (chambre de pyrolyse avec grande capacité de stockage aucune intervention avant plusieurs heures). Le manoeuvre se concentre donc exclusivement sur la qualité du processus de distillation (contrôle débit & température du condensat, fractionnement des qualités, etc.). Il devient un réel technicien de distillation et garantit un respect de la qualité des HE.

▪ **1) Ergonomie et environnement de travail**

L'amélioration technologique passe généralement par un gain d'énergie réduisant la pénibilité pour le technicien de distillation comme explicité ci-avant.

Le minimum requis sera donc la fin d'un environnement de travail :

- contaminé par de fortes concentrations en particules fines et monoxyde de carbone quelle que soient les conditions extérieures (vent, pluie, etc.),
- avec de fortes températures rayonnantes (amas de braise, absence de portes d'enfournement, retours de flammes).

Tableau récapitulatif

Critères	Choix
Niveau d'investissement	Temps de retours sur économie combustible et gain productivité maximal de 2 ans, coût sur 10 ans prenant en compte maintenance/éléments à changer
Choix du principe feu direct vs chaudière vapeur	Non défini à ce stade (choix contextuel)
Niveau de puissance	Gamme de puissances en lien avec débits de condensat nominal, possibilité multi brûleurs si nécessaire
Niveau et pérennité de la performance énergétique	Mini 60%, objectif performance 85-90%
Durée de vie et maintenance	10 ans sans maintenance lourde, facilité entretien
Construction locale vs modèles importés	Construction locale privilégiée
Adapté à un combustible solide à faible coût	Standardisation pour bois bûche et bois recoupé/palets & bûchettes compressées
Moyens de contrôle, sécurité et facilité d'usage	Indicateurs température fumées, manomètres, soupapes de sûreté et de décharge pour chaudière
Ergonomie et environnement de travail	Absence de fumées et de chaleur rayonnante, enfournement facilité

5.2. Besoin d'équipements pour les filières HE à Madagascar

L'analyse antérieure des différentes filières d'HE ainsi que les visites durant la mission sur les sites multi-produits fonctionnant avec vapeur jusqu'à 2 bars, permettent de dresser une liste de 4 équipements pour réduire sensiblement les consommations de biomasse énergie. Les caractéristiques principales présentées ci-dessous sont en complément de celles identifiées comme génériques, mentionnées dans le tableau récapitulatif en 5.1. : durée de vie de 10 ans, maintenance-entretien facilité, standardisation.

A. Alambic feu direct à faible coût - filières HEFG, HE2Y petit producteur individuel

Les caractéristiques principales sont :

- coût habillage cuve inox ou aluminium suivant contexte et accessoires autour de 1000 à 1500 €
- rendement minimal de 60 %
- puissance autour de 65 kW pour cuve 100 kg (gamme suivant taille marmite)
- conduit de fumées isolé température maximale 250°C en bas de conduit
- bois Hb 30 maxi, qualité de combustion intermédiaire
- recours artisans locaux à former

► **Consommation de bois divisée par 3 à 4 suivant contexte** (*estimation 70 % des opérateurs*)

B. Alambic feu direct performant à coût maîtrisé pour unité de production de taille moyenne (minimum 2 marmites de 100 kg en production régulière) -

Les caractéristiques principales sont :

- Coût adaptation cuve traditionnelle (échangeur calculé partie basse) et accessoires autour de 2000 à 3000 €,
- rendement minimal de 80 %,
- puissance autour de 50 kW pour cuve de 100 kg (gamme suivant taille marmite)
- conduit de fumées isolé, température maximale 150 °C
- bois Hb 20 maxi, qualité de combustion haute
- appel à des équipementiers spécialisés

→ Option chambre combustion pour palets de résidus agricoles compressés ou petit bois recoupé.

→ Option tirage assisté (extracteur mécanique) pour ceux disposant d'électricité en continu ou d'une installation photovoltaïque avec batterie (50 à 100 W maxi).

► **Consommation de bois divisée par 2 à 4 suivant contexte.** (*estimation 20 % des opérateurs*)

C. Chaudière vapeur à coût maîtrisé pour 2 à 4 cuves de 100 kg, pression de service max 2 bars, débit 0,1 à 0,25 T/h producteur taille moyenne toutes filières

Les caractéristiques principales sont :

- Coût de 5 à 6 000 €
- rendement minimal de 80 %,
- choix technologie tubes de fumées (à privilégier en combustion bois)
- puissance minimale de 100 kW (gamme suivant demande identifiée)
- bois Hb 20 maxi, qualité combustion haute
- conduit de fumées isolé, température maximale 150 °C
- appel à des équipementiers spécialisés

► **Consommation de bois divisée par 2 à 3 suivant contexte** (*estimation 9 % des opérateurs*)

D. Chaudière vapeur pour 10 cuves mini de 100 kg, débit max 3T/h, pression de service max 14 bars

Les caractéristiques principales sont en sus de celles génériques mentionnées dans le tableau récapitulatif en 5.1. :

- Coût de 25 000 € - 30 000 €
 - rendement minimal de 70 %, température maximale fumées sortie chaudière 250 °C
 - puissance minimale de 1000 kW (gamme suivant demande identifiée)
 - bois Hb 30 maxi, qualité combustion intermédiaire
- **rendement mini 70%** (déjà importé de Chine ou produite localement Bionerr), (*estimation 1 % des opérateurs*), besoin d'audit énergétique des installations existantes pour réduire pertes surfaciques, gestion vapeur et régler les paramètres de combustion avec usage bois sec.

6. Choix opérationnels pour la phase de démonstration

Une fois cette étape de diagnostic réalisée sur les technologies à promouvoir dans le contexte malgache des huiles essentielles, il s'agit de définir les choix opérationnels pour la phase de démonstration incluse dans cette étude, à savoir :

- Choix du modèle prioritaire à prototyper
- Choix du constructeur à impliquer pour la réalisation du prototype
- Choix du site pilote le plus pertinent

Pour cela, nous allons utiliser la méthode des matrices multicritères pour établir un choix le plus argumenté et objectif possible.

6.1. Choix du modèle prioritaire à prototyper

Les critères de sélection sont listés comme suit :

- Attente des producteurs identifiés comme professionnels engagés sur la qualité
- Approprié pour une diffusion standardisée
- Facilite la modernisation de la structuration de la filière (regroupement, coopératives, ...)
- Degré d'innovation/pertinence pour les équipementiers malgaches
- Niveau risque/difficulté première phase de prototypage
- Impact sur la consommation en bois par unité de distillation
- Impact sur la consommation de bois à l'échelle nationale

Critères	Coefficient pondération	Feu direct amélioré	Feu direct performant	Chaudière vapeur tubes de fumées	Chaudière vapeur grande puissance
Attente des producteurs	3	2	4	4	2
Niveau standardisation	1	2	4	4	3
Participe modernisation filière	1	2	4	4	4
Intérêt équipementiers nationaux	3	1	4	4	3
Niveau de risque/difficulté	2	3	3	2	1
Impact conso pour unité	1	4	4	4	4
Impact conso échelle nationale	3	4	3	2	1
Total		35	51	46	31
Note sur 20		12,5	18,2	16,4	11,1

Note de 1 à 4 pour éviter note moyenne, coefficient de pondération de 1 à 3

Selon les critères retenus, il ressort nettement l'intérêt pour le modèle n°2 qui d'après les retours producteurs et équipementiers malgaches visités est le modèle le plus attendu et qui participerait à enclencher une réelle modernisation de la filière des HE.

Outre le fait de montrer qu'une technologie abordable à base de biomasse énergie peut atteindre des rendements énergétiques au-dessus de 80%, elle permettrait d'enclencher une dynamique de modernisation chez les unités de taille petite à moyenne qui sont la grande majorité de l'existant. Ce savoir-faire pourra aussi être transféré vers d'autres filières de transformation agroalimentaire (cuisson, étuvage, torréfaction, séchage, etc.).

Un modèle n°3 de chaudière vapeur arrive en second plan et reste tout aussi attendu notamment par le GEHEM. Il correspond aux unités distillant une gamme étendue de produits sur toute l'année, avec des besoins de vapeurs de la pression atmosphériques à des pressions autour de 2 bars. Un chaudiériste est spécifiquement positionné sur ce type d'équipements, AIM.

Ce modèle est toutefois plus complexe à prototyper dans cette première phase de travail avec les équipementiers et présente aussi un plus faible impact sur la consommation de bois énergie à l'échelle nationale. Le budget actuel et le temps imposé ne permettent pas un travail sur les deux équipements en simultanément, il sera réfléchi à des pistes possibles pour poursuivre ce transfert technologique en fin de mission.

Nous retenons donc le modèle de feu direct performant pour la phase de démonstration. Son cahier des charges sera affiné durant la mission de préparation de chantier.

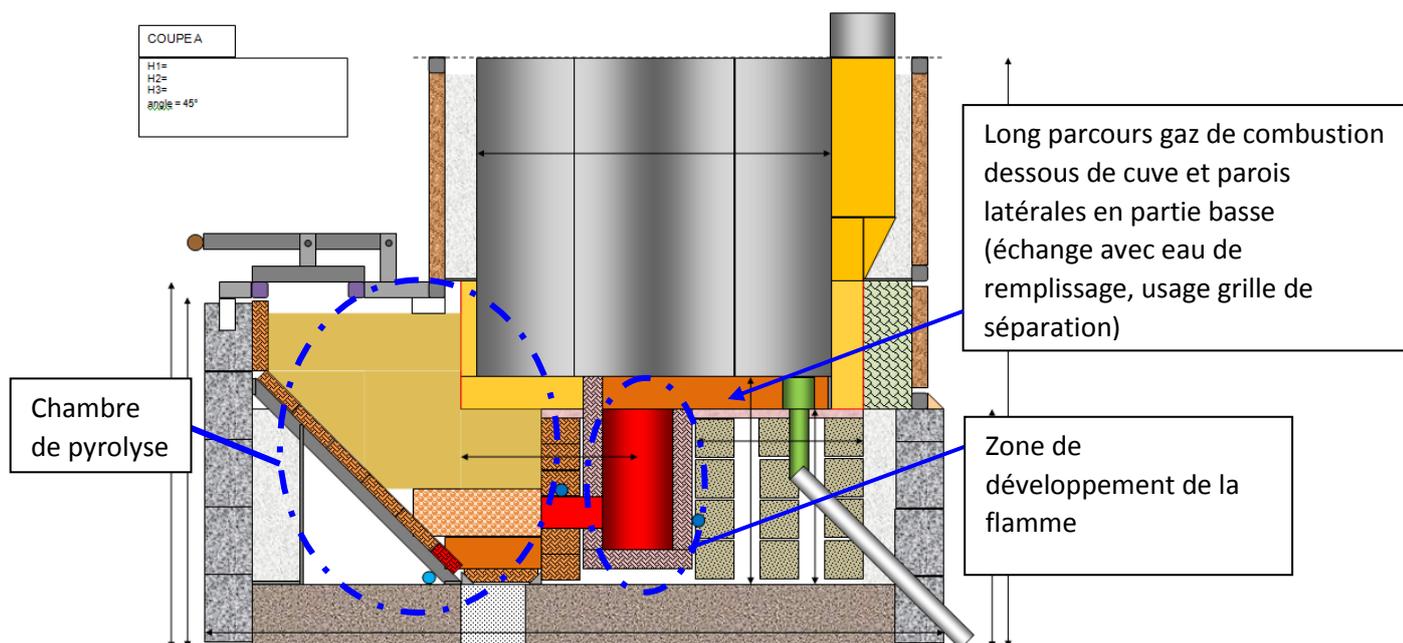


Figure 21 Schéma de principe unité de distillation feu direct à haute performance énergétique

6.2. Choix de l'équipementier pour la construction du prototype

Le choix à Madagascar est relativement limité à ce stade en lien avec le modèle retenu.

Deux équipementiers pertinents en lien avec la construction du modèle n°2 ont été identifiés :

- AIM Sarl : Appareillage Industriel de Madagascar
- Bionerr Sarl (filiale de BIONEXX)

▪ AIM

Il s'agit d'une entreprise de conception et de production d'équipements destinés à la production agricole, à la transformation agroalimentaire et à la production d'énergies renouvelables. Elle a ainsi produit une centaine d'alambics depuis une vingtaine d'années d'une contenance de 50 à 3 500 litres pour différents produits.



Ses atouts principaux pour ce qui nous concerne est un intérêt fort dans la gamme de puissance du modèle n°2, une réflexion de solution envoyée après notre visite (chaudière intégrée en dessous de cuve de distillation), un savoir-faire reconnu en chaudronnerie.

Ses faiblesses sont un manque de savoir-faire en assemblage d'éléments réfractaires (maçonnerie spécifique) afin de réduire sensiblement le coût final de l'équipement (réduire le recours aux parties métalliques) et garantir une longue durée de vie sans intervention lourde avant une dizaine d'années.

▪ BIONERR

L'entreprise est spécialisée dans les énergies renouvelables. Elle a notamment participé à des programmes d'électrification rurale par l'installation d'équipements de gazéification de la biomasse.

Elle dispose d'un savoir-faire en production de chaudières de grande puissance à tubes de fumées (installations chez Biolandes par exemple) et dans la construction maçonnée à base de briques réfractaires (fours, équipements divers).



A l'heure de la rédaction de ce rapport, nous n'avons pas encore pu échanger sur leur intérêt pour un travail de prototypage et de validation d'un équipement à feu direct performant pour l'unité de distillation de taille petite à moyenne.

- ▶ **Nous ne pouvons donc pas conclure à ce stade sur le choix final de l'équipementier qui sera impliqué dans la construction du prototype.** il faudra attendre les visites/échanges lors de la mission préparation de chantier pour finaliser ce choix, voire considérer un travail réparti sur les deux entités, partie chaudronnerie avec AIM, partie construction maçonnerie-assemblage avec Bionerr.

6.3. Choix du site pilote

L'autre choix opérationnel pour la phase prototypage est le choix du site de construction dénommé site pilote.

Il doit répondre à plusieurs objectifs :

- intérêt du propriétaire distillateur
- niveau engagement du propriétaire distillateur sur la réduction de la consommation en bois et préparation-stockage
- pertinence avec la production du site pilote
- minimum de risque de perturbations extérieures
- facilité d'accès (échelle nationale) pour visites ultérieures (décideurs, pairs, opérateurs, etc..)
- facilité de construction /logistique (proximité équipementier, ouvriers qualifiés/hébergements au besoin équipe constructeurs)
- possibilité poursuite expérimentation

D'autre part, suite aux échanges avec le GEHEM, il serait pertinent qu'il soit en lien avec la dynamique de mise en place d'un centre de ressources (sites de démonstration, capitalisation, expérimentation) dédié aux filières HE de Madagascar pour diffuser efficacement de nouveaux savoirs et pratiques.

La validation d'un prototype doit se faire dans un cadre protégé pour déboucher sur une version finale prête à la large diffusion. Cette compréhension doit être bien établie en début de travail avec les parties prenantes.

Le contexte de Nosy Be pour cette phase expérimentale est bien moins favorable que la zone autour de Tananarive : absence de constructeurs expérimentés, absence de structure relais identifiée pour faciliter la mise en place du chantier, pas d'équipementiers, absence de matériaux dédiés (briques réfractaires, ciment réfractaire, etc..), une réelle complexité logistique qui se rajoute du caractère insulaire. Le choix de Nosy Be pour valider un premier prototype induit une prise de risque élevée difficile à justifier.

Afin de pouvoir établir une comparaison entre un site proche de Tananarive et un site sur Nosy be, il est proposé de réaliser une analyse multicritères sur les deux sites les plus promoteurs identifiés :

- **Floramad proche de Tananarive :**

Le gérant est membre actif du GEHEM, grande capacité d'accueil non valorisée sur le site pour évolution future en centre de démonstration-formation-expérimentation, ouverture et bon niveau technique du gérant (pas d'a priori sur les choix technologiques qui pourront être faits), fort intérêt sur réduction consommation de bois (prix double par rapport à Nosy Be), suffisamment de place pour un site de stockage-façonnage du bois dans des conditions optimales, intérêt certain pour seconde phase

expérimentale sur un prototype de chaudière performante pour améliorer son installation et avoir ainsi réuni sur même site deux technologies (embryon centre de démonstration-formation)



- **Larissa- Nosy be**

Une des premières exportatrices d'HE2Y de Nosy Be avec des qualités de femme d'affaires et de gestion d'entreprise indéniables. Le site correspond bien pour une phase début de diffusion car fort impact visible sur les niveaux de consommation, la qualité de l'environnement du poste de travail, la qualité de l'huile obtenue, etc.



Mais il présente des risques indéniables en phase prototypage. Il y a moins de garantie sur l'accessibilité sur le moyen et long terme aux visites extérieures en tant que site pilote, une forte adhésion sur les choix technologiques proposés (a priori technologiques). Il s'agit d'un site extrêmement pertinent pour une phase de prédiffusion mais plus risqué pour une phase de prototypage.

Analyse multicritères choix du site pilote

Critères	Coefficient pondération	Floramad proche Tana	Larissa Nosy Be
Intérêt du propriétaire distillateur	3	3	3
Engagement sur gestion approvisionnement du bois	2	4	3
Pertinence avec la production du site pilote	3	2	4
Minimum de risques de perturbations extérieures	1	4	2
Facilité d'accès (vision nationale)	2	4	2
Facilité de construction /logistique	2	4	2
Possibilité poursuite expérimentation	1	4	1
Total		51	31
Note sur 20		18,2	11,1

Il apparaît clairement que le site de Floramad sous réserve d'acceptation de son gérant propriétaire correspond plus aux critères de sélection d'un site pilote pour valider une technologie dans de bonnes conditions et faciliter l'accueil de décideurs, pairs, techniciens, etc.

Celui de Larissa reste très pertinent pour initier un programme de diffusion et d'accompagnement de la filière HE2Y dans sa modernisation (approvisionnement en bois durable, technologie standardisée pour les petits et moyens producteurs, formation technicien de distillation, mécanismes financiers, aide à la commercialisation, aide à la structuration/regroupement des petits distillateurs, etc.).

Dans le cadre budgétaire de cette étude, il peut être proposé un aménagement pour valider chez Floramad le premier prototype et organiser la construction d'un modèle, sur la base d'une première expérience de construction, à Nosy Be et donc sur le site de Larissa.

7. Eléments pour la mission de préparation de chantier

La mission de préparation de chantier devra :

- valider l'équipementier ou les équipementiers à impliquer dans la construction du prototype
- finaliser le CDC en fonction des informations complémentaires sur les matériaux et échanges avec les constructeurs à impliquer
- finaliser le choix du site pilote

Concernant le CDC final du prototype, il faudra arbitrer sur :

- prépondérance maçonneries ou tôles pour réduire éléments façonnés (impact sur prix final, modalité diffusion ultérieure)
- chambre de combustion (hybride, spécialisée sur bois bûche ou petit bois/bûchette compressée)
- échange facilité par principe de tubes de fumées ou par plaques (lames de fumées)
- tirage naturel ou assisté (plus simple à diffuser et coût inférieur, facilité d'usage, maintien des performances)

Les modalités de contractualisation (équipementier, site pilote) seront évoquées et à finaliser avant la phase de construction.

8. Conclusion mission état des lieux

Compte tenu du contexte national particulier pour les filières HE de Madagascar avec l'injonction du MEDD de proposer à court et moyen terme des solutions tangibles pour réduire drastiquement le recours au bois non géré, la mission a donc suivi un double objectif :

- apporter des éléments de réflexion notamment sur les dispositifs pertinents à promouvoir et les pistes sur un approvisionnement durable en lien avec le GEHEM sur la base d'informations déjà disponibles et collectées durant la mission ;
- proposer une piste technologique pertinente pour le cas de Nosy BE i.e. la filière HE2Y et les modalités de prototypage en lien avec les équipementiers identifiés.

Il a été possible de présenter les différentes initiatives existantes à Madagascar et en contexte similaire et de réaliser une catégorisation par principe de distillation et capacité de production des unités de distillation existantes pour identifier un pack de 4 grandes familles de dispositifs constructibles à Madagascar à longue durée de vie et à coût maîtrisé avec leur gamme de puissance et options éventuelles :

- feu direct amélioré avec des performances minimales pour les petits producteurs en phase de professionnalisation (activité secondaire, faible capacité de production annuelle, difficulté à se regrouper) ;
- feu direct performant pour les producteurs de capacité petite à moyenne déjà professionnalisés (activité principale), rôle moteur sur leur zone (liens avec petits producteurs) ;
- chaudière vapeur de petite taille performante pour les producteurs de capacité petite à moyenne avec un niveau technologique adapté, préférence pour la vapodistillation ou avec une variété de produits à distiller ;
- chaudière vapeur de grande taille optimisée pour les grosses unités avec des procédures d'audits énergétiques et de contrôle à systématiser.

Une procédure de sélection multicritère a permis de prioriser le modèle feu direct performant pour la phase de prototypage à venir.

Cette vision est rendue possible (production locale, saut technologique en combustion biomasse) par la présence d'équipementiers expérimentés à capacité d'intervention nationale en lien si besoin avec des fabricants locaux pour la production d'éléments de chaudronnerie, de pièces mécanosoudées ainsi que des équipes d'installateurs à renforcer notamment sur la partie maçonnerie du bâti réfractaire. Cela apporte une garantie de pérennisation du transfert technologique et de la maintenance future des équipements installés.

La prochaine étape est la mission de préparation de chantier pour valider le choix du ou de équipementiers à impliquer dans la construction du prototype ainsi que le choix du site pilote où sera testé dans les conditions optimales cet équipement démonstratif pour les distillateurs, les technologues, les décideurs, les concepteurs de projets, etc.

Bibliographie

- Walid GADDAS, 2019, Rapport de Diagnostic de la chaîne de valeur huile essentielle dans la région Diana, PIC
- Anis CHAKIB, 2018, « Mission d'analyses pour la sélection et l'identification d'appuis à des filières agricoles porteuses dans les zones d'intervention du Projet PIC2 à Madagascar », PIC
- Jean-Noël Salomon, 1979, « Une culture semi-industrielle à Madagascar : les plantes à parfum »,
- DAAF Mayotte, 2016, Ylang –Ylang : état des lieux de la filière – Mayotte
- Christian MOHAMADY, 2016, Optimisation du procédé d'hydrodistillation des fleurs d'ylang-ylang par plan d'expériences - application de la méthode de Taguchi - au sein de la société SPPM
- Trade Impact for Good, 2012, YLANG YLANG OIL – The essential oil of the flowers of *Cananga odorata*
- Cirad, QualiReg, plan stratégique 2015-2020
- JF Rozis, 2017, rapport mission évaluation ex ante et conception projet FFEM – Filière Ylang Ylang, Initiative Développement, Comores
- JF Rozis, 2018, rapport mission état des lieux filière HE géranium Haut Matsiatra, Gret, Madagascar
- JF Rozis, 2017, rapport mission état des lieux filière patchouli et validation diffusion technologie améliorée d'unité de distillation, Sulawesi, SwissContact, Indonésie
- JF Rozis, 2018, rapport mission état des lieux filière HE feuilles de giroflier & conception projet d'introduction technologique, Givaudan, Fenerive Est, Madagascar
- Isa, Cirad, UR HORTYST, 2015, document de travail afs4food n° 20, enquête sur la production d'huile essentielle de girofle : le point de vue des propriétaires d'alambics dans la région de Fenerive-Est
- Supagro, CTHT, Cirad, 2015, analyse technico-économique de la filière amont de production d'essence de girofle à Fénériver- est, Madagascar : de la feuille à l'alambic
- ESSA, CTHT, Cirad, 2016, Pour l'optimisation de la qualité des produits du giroflier de Madagascar (clous et huiles essentielles) : étude des facteurs de leurs variabilités
- Pierre Johnson, 2019, Évaluation du programme FY-DAFE 2
- Ong 2mains, 2014, AFD, Etude et expérimentation d'énergies alternatives pour la distillation d'essence d'ylang ylang en Union des Comores

Annexes

Annexe 1 : Fiche de présence réunion GEHEM du 11/11/2019

Annexe 2 : Suivi distillation chez Larissa

Annexe 3 : Note de réflexion vision nationale

Annexe 1 : fiche de présence réunion avec le GEHEM du 11/2019



Fiche de présence

Date : 11 Novembre 2019 Heure : 14^h Lieu : RC
 Objet : Réunion sur "Etude Technologique huile Essentielle" - GEHEM - JF120215

Nom & prénom	Organisme	Fonction	Téléphone	Email	Emargement
Rakotoarivelo Fanny	Symrise ORIGINES	R & D	03205 220 78	fanny.rakotoarivelo@symrise.com	
CAFOSSE Kilian	Jacarandas	Responsable HE	034 14 074 66	Kilian.jacarandas@gmail.com	
Winnie Lauren	GEHEM	SE	0344495809	gehemgie@gmail.com	
RANDEVOSON Malala	FLORIBIS	resp. filières	0344601576	filières.flora@floribis-mg.com	
Razafinohamabe Andy	RANDRANOANAN	Resp. Tonc & ventes	0345136100	tetrafruits@gmail.com	
Razafimbelo Haingy	PIC	Resp. Agrib.	0331200445	haingy.m@pic.mg	
ROZIS JEAN-FRANCOIS	PLANETE Bois	Ingénieur Projet	0033652916138	rozisjf@del-internat.fr	
Narindra RAKOTARISANA	PIC	AT. Agrib. Urbanisation CAV	0342851433	narindra.n@pic.mg	



Fiche de présence

Date : 11 Novembre 2019

Heure : 14h

Lieu : Pic

Objet : _____

Nom & prénom	Organisme	Fonction	Téléphone	Email	Emargement
RAKOTOHANGA Maïna	BIOESOIL membre GEHEM.	Gérant	0341717725	bioesoil@gmail.com	
RAKOTOAN Ninina Anger	Président GEHEM	?	0340838743	gehemgie@gmail.com	
ZAFITSIMALOU NT Ella	TOARI GREEN	Resp. Huic essentielle	0320782242	ella.zafitnimaloungy@toari-green.com	

Annexe 2 : Suivi distillation Larissa

Nom proprio	Larissa	Localisation	Proche aéroport	Date : 18 /11/2019		Température air	32 °C
Nom opérateur	Employé de Larissa	Latitude	-13,31334 S	Nbre cycles depuis dernier entretien	NA	Température initiale Eau (30 L)	32 °C
Nom testeur	JF Rozis	Longitude	48,30757 E	Jours depuis dernière distillation	2 jours	Hb bois	45 % en moyenne
<i>Bois uniquement</i>							
Temps	Action	Débit condensat	Température condensat	Température fumées	Remarques/observations		
11h21	Début allumage avec 30 L eau						
11h52	Ebullition – ajout de fleurs	0,5 L/mn	°C	600 °C	Cohobation		
12h00	Fermeture chapiteau	0,5 L/mn	°C	650 °C	Puissance max, très peu d'échanges avec bas de marmite		
12h10	Début de condensat	0,5 L/mn	42 °C	650 °C	Fermeture de la porte enfournement non opérationnelle		
12h15	Ouverture eau de refroidissement	0,5 L/mn	37 °C	700 °C			
12h42	125 ml 1 ^{er} qualité	0,5 L/mn	37 °C	700 °C			
13h 00	125ml 1 ^{ère} qualité	0,5 L/mn	°C	650-700 °C	Fin des fumées visibles sortie conduit de fumées		
13h33	125ml 1 ^{ère} qualité	0,5 L/mn			Evacuation amas braise		
14h16	125ml 1 ^{ère} qualité	0,5 L/mn	°C	650-700 °C	Alterne entre petit bois et bois moyen pour conserver		
15h18	125ml 2 nd qualité	0,5 L/mn	°C	650-700 °C	suffisamment de puissance		
16 h	Rajout 30 L eau entrée cohobation (eau bas condenseur à 37°C)	0,5 L/mn	37 °C	650-700 °C			
02h00	Ajout 40 L eau	0,5 L/mn		550-600 °C			
7 h 39	Fin distillation	0,5 L/mn		550-600 °C	Total eau de cohobation : 100 L		
		Débit moyen			Total eau de refroidissement autour de 10 m ³		
Temps total depuis premier condensat	19h	Temps total	20h 20 min		Qté totale HE2Y	2,5 L	

Pesage MP

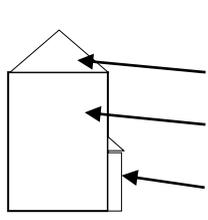
Sac 1	Sac 2	Sac 3	Sac 4	Sac 5	Sac 6	Sac 7	Sac 8	Sac 9	Sac 10	Sac 11	Sac 12	Sac 13	Sac 14	Sac 15	Sac 16	Sac 17	Sa	
20	22	22	20	16														

TOTAL feuille ylang ylang : 100 kg

Pesage bois vs type de biomasse (kg),

	HB	Consommé
Petit bois (< 5 cm)	45	149,4
Bois moyen(<10 cm)	45	311,4
Gros bois (<20 cm)	45	250,8
	Total	711,5 kg

TEMPERATURES DE SURFACE



Surface Temp/ time	0 h	1 h	2 h	3h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h
Chapeau	°C	80 °C	95 °C									
Cucurbite externe	°C	80 °C	95 °C									
Côté mur frontal	°C	32 °C	35 °C	40 °C	50 °C	60°C						

Ratios calculés

- Consommation énergie spécifique : 711 kWh/ L HE, départ à froid,
- Rendement de production : 2,5 %
- Total eau remplissage utilisée : 100 L
- Ratio eau totale remplissage/kg ylang ylang enfourné : 1 L/kg
- Ratio L eau remplissage/ L HE produite : 40 L eau/L HE
- Energie utile : 410 kWh (faible débit de condensat)
- Energie utile /L HE : 164 kWh/L HE (kg bois HB 20/ L HE)
- Energie fournie : 1778 kWh (d'après mesures Hb)
- Rendement énergétique : 23 %
- Puissance moyennée : 80 kW

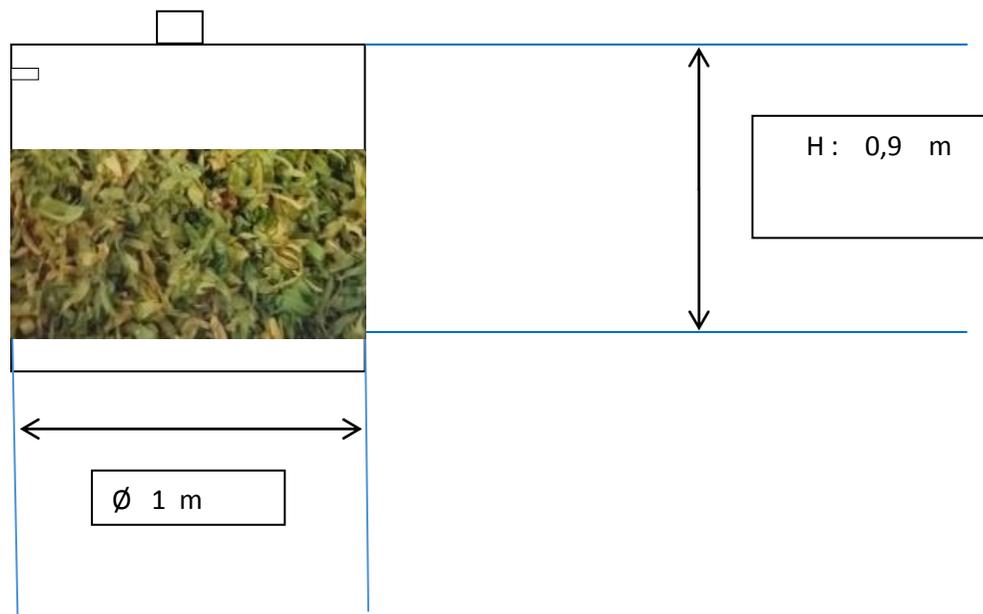


Cuve alambic 100 kg, capacité L

Matériau: fond cuve: inox 30 /10

Parois latérales : inox 20 /10

Volume de la matière première introduite: 0,4 m³



Annexe 3 : Note de réflexion vision nationale

Recommandations sur filières HE à Madagascar

Oui, il y a un besoin d'évolution sur l'usage du bois-énergie dans les filières HE à Madagascar :

- Besoin de gestion durable de l'approvisionnement en bois
- Besoin d'améliorer les pratiques culturales (pb érosion, amélioration rendement production)
- Besoin de formation des techniciens de distillation
- Besoin d'évolution technologique des équipements de combustion bois

Mais capacités d'évolution plus ou moins rapides suivant les filières et la taille des distillateurs. Les moyens et grands distillateurs (à partir d'une capacité de 400 kg de matière verte) est la partie émergée, la majorité sont de petits distillateurs avec une seule cuve autour de 100 kg de matière verte et des capacités d'investissement réduites (quasi-totalité de la filière HE de feuilles de giroflier par exemple).

Quelques recommandations :

Actions à court terme pour les unités utilisant le bois de chauffe (conversion)

- Fixer une limite basse de rendement énergétique pour les unités de capacité de 400 kg de matière verte et plus à 60%, température des fumées partie basse du conduit de fumées au maximum 250°C à puissance nominale (chaudière vapeur ou feu direct).
- Mettre en place un système d'audit énergétique rapide à coût réduit sur une méthodologie unifiée à l'échelle nationale avec un fonds dédié (en lien avec GEHEM), définition d'une étiquette de performance énergétique et environnementale, produire un état des lieux actualisé tous les 2 ans sur les efforts mis en place par les filières HE.
- Interdire le recours à certaines essences forestières comme combustible (bois d'œuvre, bois précieux...)
- Encourager le recours à des plantes identifiées comme invasives sur les zones de distillation
- Faciliter la mise en place de véritables plateformes bois locales permettant de fournir du bois géré durablement devant être refendu au-dessus de 15 cm de diamètre et à une humidité de 20% maximal prêt à l'emploi.
- Encourager les efforts sur la gestion de l'eau de refroidissement (cuve de récupération aval avec système de rehausse)
- Encourager la conversion à un autre combustible quand le contexte le permet (faisabilité économique, disponibilité énergie/technologie à faible impact environnemental comme des chaudières à huile de vidange avec des brûleurs de qualité)
- Sur les zones à fort gisement de résidus agricoles, faciliter la mise en place d'unités de taille suffisante pouvant produire des bûches/briquettes/palets compressés à prix compétitif face au le bois local (étude du gisement, du marché potentiel, localisation site production, plan d'affaires suivant le volume de production et la technologie choisie)
- Créer un fonds dédié avec une part subvention et une part à rembourser à taux préférentiel sur un temps 1 à 5 ans suivant la qualité-performances des investissements choisies

Actions à moyen terme (formation opérateurs, appropriation technologique par les fabricants locaux)

- Mettre en place un centre de ressources² en lien avec le GEHEM sur l'usage efficace du bois énergie (sites pilotes, parcours formation, agrément des techniciens de distillation, observatoire avec base de données dédiée actualisée sur les consommations énergétiques et les efforts de la filière, etc..)
- Accompagner les efforts de replantations sur les zones de distillation (suivi de l'évolution des plantations, échanges de bonnes pratiques, mise en place de pépinières, ...)
- Faciliter la diffusion d'équipements de distillation destinés aux petits producteurs sur des standards par filière agréés par le centre de ressources visant à réduire par deux à trois les consommations actuelles sur une échelle de 5 à 10 ans suivant les filières (crédit dédié, formation, incitation au regroupement, incitation des bailleurs internationaux à appuyer de telles initiatives, évaluation par le centre de ressources en lien avec le GEHEM pour capitaliser les acquis, ...)

Remarques sur le bois-énergie

C'est l'une des énergies renouvelables les moins impactées sur les plans environnementaux dans la mesure où elle est gérée durablement : préservation de la ressource en eau par sa capacité de captage, lutte contre l'érosion, neutralité carbone, faibles externalités négatives sur tout son cycle de vie (construction dédiée comme des barrages hydro-électriques ou raffineries et stockage-transport pour le gaz en bouteille non pris en compte dans les calculs de GES sur la finance carbone).

D'autre part, elle permet la multiplicité d'activités génératrices de revenus pour les populations les plus démunies en zone rurale notamment. Elle participe grandement à la création de plus-value dans l'économie malgache et sur le plan macro-économique, elle permet de ne pas fragiliser la balance commerciale par l'achat d'énergie fossile. Elle pardonne aussi les erreurs une fois la prise de conscience enclenchée sur le besoin de replantation, de meilleures pratiques ce que ne permet pas les énergies fossiles sur des volants de régénération de plusieurs dizaines de millions d'années. D'autre part, Madagascar dispose d'un climat exceptionnel pour la production de biomasse.

Les filières HE ont fait des efforts, plusieurs initiatives existent. Il s'agit de les encourager, faciliter leurs duplications. Elles ont toutes intérêt à pérenniser l'accès un bois-énergie local à coût maîtrisé et donc durable, elles sont donc les premières intéressées à améliorer leurs pratiques. Il s'agit donc de définir les contraintes et appuis nécessaires à cette évolution des pratiques. Il y a un besoin d'évolution technologique, de formation, de démonstration qui peut être relativement rapide du moment qu'un cap par étapes a été fixé et validé entre le gouvernement et le GEHEM.

² Exemple de centre similaire, le CRIEPPAM, <http://www.crieppam.fr/>