

Rapport final :

Valorisation du potentiel énergétique des plantes aquatiques prolifératrices nuisibles au Mali

Phase II avant-projet détaillé



Auteur(s):

Jean-Loup Robineau, Planair SA
Pierre Renaux, Planair SA
Roger Michel, ERA International

Date du rapport: 07.02.2020	Numéro du contrat: 2016.10
Institution: Planair SA	Pays: Mali

Elaboré par:

Planair SA

Crêt 108a, CH- 2314 La Sagne
Tél: +41 32 933 88 40
Fax: +41 32 933 88 50
E-mail : info@planair.ch
Site Internet : www.planair.ch

PLANAIR
Ingénieurs conseils en énergies et environnement

O.N.G ERA International

Baco-Djicoroni-Aci
Rue 638 – PT 13
Bamako
Mali

ERA International

Dr Roger Michel
CP 1450
1211 Genève 1

Avec le soutien de la

Plate-forme REPIC

c/o NET Nowak Energie & Technologie AG
Waldweg 8, CH-1717 St. Ursen

Tél: +41(0)26 494 00 30, Fax: +41(0)26 494 00 34, info@repic.ch / www.repic.ch

La plate-forme REPIC est un mandat des offices fédéraux suivants :

Secrétariat d'Etat à l'économie SECO
Direction du développement et de la coopération DDC
Office fédéral de l'environnement OFEV
Office fédéral de l'énergie OFEN

Le ou les auteurs de ce rapport portent seuls la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.



Table des matières

1. Résumé.....	4
2. Abstract	5
3. Situation initiale.....	6
4. Objectifs.....	6
5. Revue du projet	6
5.1. <i>Mise en œuvre du projet</i>	6
5.2. <i>Atteinte des objectifs et résultats</i>	7
5.3. <i>Mise en place du projet et répliquabilité</i>	7
5.4. <i>Impacts, durabilité</i>	8
6. Perspectives, suites à envisager	8
7. Enseignements tirés du projet, conclusion.....	9
8. Rapport d'étude.....	9

1. Résumé

La jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) est une plante aquatique provenant d'Amérique du Sud qui a été introduite comme plante ornementale dans de nombreux pays, notamment en Afrique de l'Ouest. Echappée de cultures, elle est devenue très envahissante sur les plans d'eau et les cours d'eau hors de sa zone d'origine. Dans le fleuve du Niger, la jacinthe d'eau est un véritable fléau où elle menace la biodiversité et impacte négativement les activités humaines. En effet, sa prolifération entrave les activités de pêche, de transport, d'irrigation des cultures et de production d'hydroélectricité et accélère l'évaporation de l'eau. Au Mali, le combat contre la jacinthe d'eau est devenu une priorité nationale.

Après une première étude de faisabilité réalisée en 2010 qui a démontré l'intérêt technique et économique de valoriser le potentiel énergétique des plantes aquatiques invasives au Mali, REPIC a décidé de prolonger le financement pour réaliser l'étude d'avant-projet détaillé. L'objectif visé était de préparer un dossier « bancable » pour les institutions financières, telles que la Banque Mondiale ou la Banque Africaine de Développement, afin de démontrer la crédibilité technique, financière, juridique, administrative et logistique du projet. Le présent rapport présente les résultats de la phase d'avant-projet détaillé et rassemble les éléments en vue de la recherche de fonds.

Au vu des résultats de l'analyse du potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau réalisé par un laboratoire européen indépendant, un projet d'usine de méthanisation d'environ 500 kWél utilisant la jacinthe d'eau comme substrat principal est difficilement rentable en se basant uniquement sur la vente d'électricité comme seule source de revenus. Toutefois, une telle installation pourrait devenir rentable avec un temps de retour inférieur à 10 ans si la récolte des jacinthes (opération de récoltes sur le fleuve et de transport jusque dans l'usine) était majoritairement subventionnée par un autre moyen (par exemple à l'aide d'un budget consacré à la sauvegarde du fleuve, tel qu'il existe à l'Office du Niger). Le fait de subventionner cette récolte a un sens, car le désengorgement du fleuve apporte de nombreux bénéfices (pêche, agriculture, barrages hydroélectriques, navigation). La monétisation de ces bénéfices sort du cadre de projet, mais devra faire l'objet de demandes complémentaires.

Quelques incertitudes, tant au niveau de la production de biogaz (les analyses scientifiques faites par le laboratoire européen fournissent des valeurs en deçà des valeurs disponibles dans la littérature), que d'autres considérations techniques, économiques et humaines, nous ont amenés à recommander l'implémentation d'une installation pilote de plus petite taille (75 kWél). Cette installation permettrait dans un premier temps de valider un certain nombre d'hypothèses, mais également à former du personnel local, à mesurer les obstacles à l'implémentation de cette technologie, à trouver des solutions pour les surmonter et à créer un centre de compétence sur la biomasse à Bamako. Ce projet pilote sera également l'occasion de permettre à Bamako de devenir le centre de référence en Afrique de l'Ouest pour le combat contre la jacinthe d'eau et la valorisation de la biomasse en général. A ce titre, il sera important d'impliquer l'université de Bamako.

La prochaine étape est donc de fonder une association pour la réalisation du projet pilote et trouver des fonds pour le financer. Il faut également convaincre les autorités et acteurs locaux (gouvernement, EDM, université, etc.) de l'intérêt du projet et s'assurer de leur coopération et participation. Enfin, il faudrait trouver rapidement un terrain à Bamako proche du fleuve pour l'implantation de l'installation pilote, et obtenir les autorisations nécessaires. Selon les nombreux contacts que nous avons eus sur place, les indicateurs sont au vert pour obtenir ces appuis. M. Boubacar Keita, Directeur général de EDM, est prêt à s'investir pour une telle opération.

2. Abstract

Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) is an aquatic plant originating from South America that has been introduced as an ornamental plant in many countries, particularly in West Africa. Escaping from the cultivated areas, it has become highly invasive on water bodies and streams outside its native area. In the Niger River, water hyacinth has become a real issue as it threatens biodiversity and has a negative impact on human activities. Indeed, its proliferation hinders fishing, transport, crop irrigation and hydroelectricity production and accelerates water evaporation. In Mali, the fight against water hyacinth has become a national priority.

After a first feasibility study carried out in 2010 which demonstrated the technical and economic feasibility of harnessing the energy potential of invasive aquatic plants in Mali, REPIC decided to extend the funding to carry out the detailed preliminary project study. The objective was to prepare a "bankable" project for financial institutions, such as the World Bank or the African Development Bank, in order to demonstrate the technical, financial, legal, administrative and logistical credibility of the project. This report presents the results of the detailed pre-project phase and brings together the elements for fund raising.

In view of the results of the biomethane potential tests carried out on water hyacinth by an independent European laboratory, an anaerobic digester plant of around 500 kW_{el} using water hyacinth as the main substrate is not profitable based solely on the sale of electricity as the only source of income. However, such a plant could become profitable with a payback time of less than 10 years if the hyacinth harvest (which includes the harvest of the water hyacinth in the river per se and the transport up to the plant) were to be subsidised in some other way (for instance with a budget dedicated to the preservation of the river, such as it exists in the Office of Niger). Subsidizing this harvest makes sense, as there are many benefits (fishing, agriculture, hydroelectric dams, navigation) to be gained from relieving the river's congestion. Monetization of these benefits is beyond the scope of the project, but should be the subject of further funding requests.

Uncertainties remain, both in terms of biogas production (the tests carried out by a European lab show lower biomethane potential values compared to the literature) and other technical, economic and human considerations. This has led us to recommend the implementation of a smaller pilot plant (75 kW_{el}) as a first step. This installation would make it possible to validate a certain number of assumptions, but also train local personnel, identify the obstacles to the implementation of this technology, find solutions to overcome them and create a competence centre on biomass in Bamako. This pilot project will also be an opportunity for Bamako to become the reference centre in West Africa for the fight against water hyacinth and valorisation of biomass in general. To this end, it will be important to involve the University of Bamako.

The next step is therefore to set up an association to implement the pilot project and find funds to finance it. It is also necessary to convince local authorities and actors (government, EDM, university, etc.) of the interest of the project and ensure their cooperation and participation. Finally, land in Bamako close to the river should be found in the near future for the pilot plant and the necessary authorizations obtained. According to the numerous contacts we have had locally, all green lights are on to obtain this support. Mr Boubacar Keita, CEO of EDM, is ready to invest in this operation.

3. Situation initiale

La jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) est une plante aquatique provenant d'Amérique du Sud qui a été introduite comme plante ornementale dans de nombreux pays, notamment en Afrique de l'Ouest. Echappée de cultures, elle est devenue très envahissante sur les plans d'eau et les cours d'eau hors de sa zone d'origine. L'espèce fait d'ailleurs partie des 100 pires espèces invasives selon l'UICN.

Dans le fleuve du Niger, la jacinthe d'eau est un véritable fléau où elle menace la biodiversité et impacte négativement les activités humaines. En effet, sa prolifération entrave les activités de pêche, de transport, d'irrigation des cultures et de production d'hydroélectricité et accélère l'évaporation de l'eau. Au Mali, le combat contre la jacinthe d'eau est devenu une priorité nationale.

4. Objectifs

Le projet « Valorisation du potentiel énergétique des plantes aquatiques prolifératrices nuisibles au Mali » vise à participer à l'assainissement des cours d'eau en utilisant la jacinthe d'eau comme substrat principal d'une usine de méthanisation. Le biogaz produit sera valorisé dans une installation de cogénération produisant de l'électricité qui sera ensuite injectée dans le réseau électrique. Le digestat (résidu solide de la méthanisation) sera valorisé sous forme d'engrais naturel.

Le projet a déjà fait l'objet d'un premier financement REPIC pour la phase d'étude de faisabilité (Projet no. 2009.05). Cette première étape, finalisée en 2010, a permis de conclure sur la faisabilité technique et la rentabilité économique du projet de construction et d'exploitation d'une usine de méthanisation.

Faisant suite à cette étude de faisabilité, REPIC a renouvelé son soutien en finançant l'avant-projet détaillé qui a pour objectif de préparer un dossier « bancable », c'est-à-dire que l'on peut présenter auprès d'un financeur potentiel. Le dossier doit prouver la crédibilité technique, financière, juridique, administrative et logistique du projet. L'objectif de ce rapport est de présenter les résultats de la phase d'avant-projet détaillé et de rassembler tous les éléments en vue de déposer une demande de financement.

5. Revue du projet

5.1. Mise en œuvre du projet

Le projet est le fruit d'une collaboration entre les 3 partenaires suivants : la société suisse Planair SA, l'ONG ERA International et la compagnie malienne EDM (Energie du Mali). Il est à noter que ERA International bénéficie d'un accord-cadre avec le gouvernement malien, ce qui permet de consolider le cadre juridique du projet.

Dans un premier temps, des études complémentaires ont été réalisées afin de répondre à certains points critiques du projet, notamment :

- Caractériser les propriétés de la jacinthe d'eau, notamment en termes de potentiel méthanogène,
- Evaluer et comparer différentes sources de cosubstrat pour l'usine de méthanisation,
- Trouver une solution pour la logistique de la récolte des jacinthes d'eau,
- Définir la solution technique à mettre en place pour l'usine de méthanisation,
- Identifier les sujets à traiter lors de l'étude d'impact environnemental et social.

En parallèle, l'étude se penche sur les moyens d'optimiser les retombées du projet, notamment au niveau de la formation et de l'emploi de la main d'œuvre locale, mais également en étudiant les différentes filières possibles de valorisation de la jacinthe d'eau (compost, chaleur, etc.). Cette main-d'œuvre sera mise en valeur notamment pour l'exploitation de l'usine et la conduite des bateaux faucardeurs pour la récolte des jacinthes.

Les études complémentaires ont également permis de fournir les informations nécessaires au plan d'affaires qui a été réalisé en fin de projet. Le plan d'affaires se base d'une part sur les offres des fournisseurs pour l'usine de méthanisation et les bateaux faucardeurs, mais également sur de nombreuses données collectées sur place ou obtenues dans la littérature et dont la plausibilité a été contrôlée avec rigueur.

Enfin, nous avons tissé des liens tout au long du mandat avec les institutions locales (gouvernements, commune, Energie du Mali) afin d'ancrer le projet dans les conditions locales et garantir l'intérêt des partenaires. Cette manière de procéder facilite aussi l'obtention des autorisations nécessaires.

5.2 Atteinte des objectifs et résultats

Les études complémentaires et la réalisation du plan d'affaires ont permis de répondre à de nombreuses questions identifiées lors de l'étude de faisabilité précédente, et de préciser les aspects techniques, économiques, légaux et sociétaux du projet. Par ailleurs, nous avons obtenu l'accord des partenaires sur place pour la réalisation du projet (y compris une autorisation du maire de la commune de Koulikoro pour implanter l'usine sur un terrain identifié). En ce sens, les objectifs ont été atteints.

Toutefois, les résultats démontrés par l'analyse économique (valeurs limites en fonction des hypothèses de travail), mais également les incertitudes concernant le traitement des jacinthes d'eau nous ont conduits à proposer une installation pilote de plus petite taille (75 kWél) avant de lancer les travaux pour une installation plus importante de 500 kWél. Les éléments nécessaires au montage du dossier de recherche de fonds pour l'implémentation de cette installation sont disponibles dans le rapport d'étude ci-dessous.

5.3 Mise en place du projet et répliquabilité

Afin d'assurer le bon déroulement et la répliquabilité du projet qui devra voir le jour après la phase pilote, nous faisons les recommandations suivantes :

- Faire de Bamako, par le biais de ce projet-pilote de 75 kWél un centre de référence international pour le combat contre la jacinthe d'eau et pour la méthanisation de biomasse en général,
- Capitaliser sur le retour d'expérience à toutes les étapes du projet (la conception, la construction, la mise en service et l'exploitation, notamment la collecte et le traitement des jacinthes d'eau), dans un premier temps dans le cadre de l'installation pilote. Il faudra notamment prendre soin de documenter tous les éléments sensibles rencontrés et les solutions trouvées pour les résoudre,
- Communiquer sur le projet au Mali, la Communauté Economique des Etats Afrique de l'Ouest (CEDEAO) et plus largement dans les autres pays d'Afrique affectés par la jacinthe d'eau via la presse (y compris en ligne), la télévision, la radio, les réseaux sociaux et l'organisation de conférences et séminaires internationaux,
- Utiliser cette première installation comme outil pédagogique dans le cadre de la formation des futurs ingénieurs et techniciens, et également des exploitants de la future usine. Dans ce cadre, il faudra notamment profiter de la proximité avec l'Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR-IFRA), par exemple via des offres de stages et des visites d'étude.

5.4 Impacts, durabilité

Non relevant car il s'agit d'une étude d'avant-projet détaillé. Toutefois, les indicateurs renseignés dans le tableau ci-dessous correspondent à ce que nous prévoyons pour usine de méthanisation de 500 kW.

Ecologique	Unité	Estimation
Puissance installée en énergies renouvelables	[kW]	526
Energie renouvelable produite	[kWh]/an	4'209'000
Energie fossile économisée	[kWh]/an	8'418'000
Réduction des gaz à effet de serre	[t CO ₂ -eq] /an	2'273
Déchets nouvellement récoltés et triés	[t]	-
Déchets nouvellement recyclés	[t]	-
Economique		
Coûts de l'énergie (LCOE)	[ct/kWh]	0,30 (ou 0,16 hors collecte jacinthes)
Financements/investissements tiers mobilisés	[€]	3'935'000
Social		
Nombre de nouvelles places de travail		28
Nombre de personnes formées		23

6. Perspectives, suites à envisager

Au vu des résultats de l'analyse du potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau réalisé par le laboratoire belge indépendant Innolab (résultats divergeant des valeurs fournies pour le constructeur de l'usine de méthanisation PlanET), un projet d'usine de méthanisation d'environ 500 kW_{él} utilisant la jacinthe d'eau comme substrat principal est difficilement rentable en se basant uniquement sur la vente d'électricité comme seule source de revenus. Toutefois, une telle installation pourrait devenir rentable avec un temps de retour inférieur à 10 ans si la récolte des jacinthes était majoritairement subventionnée par un autre fond. Le fait de subventionner cette récolte a un sens, car le désengorgement du fleuve apporte de nombreux bénéfices (pêche, agriculture, barrages hydroélectriques, navigation). La monétisation de ces bénéfices sort du cadre de projet, mais devrait faire l'objet de recherches complémentaires. Le fonds du Niger pourrait être sollicité.

Quelques incertitudes, tant au niveau de la production de biogaz, que d'autres considérations techniques, économiques et humaines, nous ont amenés à recommander l'implémentation d'une installation pilote de plus petite taille (75 kW_{él}). Cette installation permettrait dans un premier temps de valider un certain nombre d'hypothèses, mais également à former du personnel local, à mesurer les obstacles à l'implémentation de cette technologie et à trouver des solutions pour les surmonter. Ce projet pilote sera également l'occasion de permettre à Bamako de devenir le centre de référence et de compétence en Afrique de l'Ouest pour le combat contre la jacinthe d'eau et la méthanisation. A ce titre, il sera important d'impliquer l'université de Bamako.

La prochaine étape pourrait consister à fonder une association pour la réalisation du projet pilote et trouver des fonds pour le financer. Les autorités et acteurs locaux (gouvernement, EDM, université, etc.) sont déjà convaincus de l'intérêt du projet et leur coopération et participation est garantie. Le financement restera la partie la plus délicate. Enfin, il faudra une confirmation définitive de EDM pour un terrain à Bamako proche du fleuve pour l'implantation de l'installation pilote. Les autorisations nécessaires, compte tenu de la taille modeste de cette installation ne devraient pas poser problème. Selon les nombreux contacts que nous avons eus sur place, les indicateurs sont au vert pour obtenir ces appuis.

7. Enseignements tirés du projet, conclusion

Le projet a permis de montrer que la valorisation des jacinthes d'eau comme substrat d'une usine de méthanisation est une piste très intéressante pour contrôler sa prolifération dans le fleuve Niger, tout en fournissant une nouvelle source d'énergie, notamment sous forme d'électricité. Toutefois, pour qu'une telle installation soit économiquement viable, la problématique de la gestion de la jacinthe d'eau doit être traitée de manière plus globale, et la récolte de ces plantes doit bénéficier d'une aide financière complémentaire. En effet, les revenus liés à la vente de l'électricité ne suffiront pas à couvrir les coûts de récolte de la jacinthe, en plus des coûts liés à l'exploitation de l'usine.

Nous avons constaté au cours de ce projet que toute une filière était à construire autour de la méthanisation, aussi bien en termes d'infrastructures (usines, laboratoires), que de compétences. La construction d'une installation pilote et la création d'un groupement d'experts (par exemple sous forme d'une association) permettront d'œuvrer en ce sens afin d'assurer un vrai transfert technologique et de connaissance, et pérenniser la démarche par la réplication de projets de méthanisation.

8. Rapport d'étude

Le rapport d'étude d'avant-projet détaillé complet se trouve à la suite de ce rapport.

VALORISATION DU POTENTIEL ENERGETIQUE DES PLANTES AQUATIQUES PROLIFERATRICES NUISIBLES AU MALI

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	3
2.	Potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau	5
2.1	Collecte des jacinthes et préparation des échantillons	5
2.2	Tests BMP	7
3.	Choix du cosubstrat	11
4.	Récolte des jacinthes d'eau	15
4.1	Bateau BPH13.....	15
4.2	Solution proposée	17
4.3	Taux de récolte et gestion à long terme	19
5.	Usine de méthanisation.....	21
5.1	Choix de la technologie	21
5.2	Préparation de la jacinthe d'eau	23
5.3	Choix de l'emplacement.....	24
6.	Plan d'affaire et rentabilité économique	27
6.1	Principales hypothèses.....	27
6.2	Résultats.....	30
7.	Installation pilote de 75 kW	34
7.1	Caractéristiques techniques.....	34
7.2	Plan d'affaires.....	35
7.3	Autres aspects	36
8.	Optimisation des retombées du projet	37
8.1	Implication et formation de la main-d'œuvre locale	37
8.2	Valorisation de la jacinthe d'eau en d'autres produits	38
8.3	Désengorgement du fleuve.....	39
8.4	Transfert technologique et répliquabilité du projet.....	40
9.	Identification des sujets EIES.....	42
10.	Organisation légale et administrative du projet	45
10.1	Projet pilote.....	45
10.2	Projet d'usine de méthanisation	45
11.	Conclusion	47
12.	Bibliographie.....	48
	Annexes.....	49

1. Introduction

La jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) est une plante aquatique provenant d'Amérique du Sud qui a été introduite comme plante ornementale dans de nombreux pays, notamment en Afrique de l'Ouest. Echappée de cultures, elle est devenue très envahissante sur les plans d'eau et les cours d'eau hors de sa zone d'origine. L'espèce fait d'ailleurs partie des 100 pires espèces invasives selon l'UICN [1].

Dans le fleuve du Niger, la jacinthe d'eau est un véritable fléau où elle menace la biodiversité et impacte négativement les activités humaines. En effet, sa prolifération entrave les activités de pêche, de transport, d'irrigation des cultures et de production d'hydroélectricité et accélère l'évaporation de l'eau [2]. Au Mali, le combat contre la jacinthe d'eau est devenu une priorité nationale.

Le projet « Valorisation du potentiel énergétique des plantes aquatiques prolifératrices nuisibles au Mali » vise à participer à l'assainissement des cours d'eau en utilisant la jacinthe d'eau comme substrat principal d'une usine de méthanisation. Le biogaz produit sera valorisé dans une installation de cogénération produisant de l'électricité injectée au réseau. Le digestat (résidu solide de la méthanisation) sera valorisé sous forme d'engrais naturel.

Le projet est le fruit d'une collaboration entre les 3 partenaires suivants : la société suisse Planair SA, l'ONG ERA International et la compagnie malienne EDM (Energie du Mali). Il est à noter que ERA International bénéficie d'un accord-cadre avec le gouvernement malien, ce qui permet de donner un cadre juridique au projet.

Le projet a déjà fait l'objet d'un premier financement REPIC pour la phase d'étude de faisabilité [3] (Projet no. 2009.05). Cette première étape, finalisée en 2010, a permis de conclure sur la faisabilité technique et la rentabilité économique du projet de construction et d'exploitation d'une usine de méthanisation.

Faisant suite à cette étude de faisabilité, REPIC a renouvelé son soutien en finançant l'avant-projet détaillé qui a pour objectif de préparer un dossier « bancable », c'est-à-dire que l'on peut présenter auprès d'un financeur potentiel. Le dossier doit prouver la crédibilité technique, financière, juridique, administrative et logistique du projet. L'objectif de ce rapport est de présenter les résultats de la phase d'avant-projet détaillé et de rassembler tous les éléments en vue de déposer une demande de financement.

Le rapport aborde les points suivants :

- Présentation des résultats des tests du potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau collectée sur place,
- Comparaison des différentes sources de cosubstrats et évaluation du potentiel pour la plus prometteuse d'entre elles,
- Présentation de la solution proposée pour la récolte des jacinthes d'eau en utilisant des bateaux faucardeurs,
- Présentation des caractéristiques techniques d'une installation de méthanisation de 500 kW.
- Etablissement du plan d'affaire de l'usine sur la base de différentes hypothèses sur le taux de production de biogaz,
- Présentation de l'option d'une installation pilote de 75 kW,

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

- Investigation des retombées positives du projet et optimisation de ces derniers,
- Identification des sujets de l'étude d'impact environnementale et sociale,
- Présentation de la structure légale envisagée pour la réalisation du projet.

2. Potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau

Le test de potentiel méthanogène, ou *Biochemical Methane Potential (BMP)* en anglais, permet de déterminer la production maximale de biogaz et de méthane qui peut être attendu à l'issue de la méthanisation d'un substrat. Selon le substrat et son état, la quantité totale de biogaz produite peut varier en fonction de la composition de la matière organique. Les valeurs bibliographiques ne suffisent donc pas. La connaissance de la production réelle de biogaz (quantité et qualité) est primordiale pour valider l'étude de faisabilité d'un projet et consolider l'analyse de risque tant d'un point de vue technique que financier. Ainsi, des tests BMP ont été réalisés sur plusieurs échantillons de jacinthe d'eau collectés localement et comparés avec les données de la littérature. Cette analyse du potentiel méthanogène constitue le point de départ du reste de l'étude.

2.1 Collecte des jacinthes et préparation des échantillons

La collecte des jacinthes d'eau et la préparation des échantillons ont été faites selon un protocole précis, sur la base des instructions et conseils d'Innolab¹, le laboratoire belge mandaté pour la réalisation des tests BMP. Les principales étapes de ce protocole sont les suivantes (illustrés sur la Figure 1 et Figure 2) :

- Récolte d'une dizaine de plantes directement sur le fleuve Niger,
- Découpage des plantes en petits morceaux à l'aide d'un sécateur,
- Mélange des morceaux de plantes découpés dans une bassine afin de bien homogénéiser le substrat,
- Prélèvement des morceaux de plantes du mélange homogénéisé afin de remplir chaque flacon à 2/3 environ (20 flacons au total).

Le protocole complet pour la préparation des échantillons se trouve en annexe de ce rapport.

Une fois préparés, les échantillons ont été mis dans une glacière avec des pains de glace afin de garder les échantillons au frais lors du transport. Ils ont été expédiés le jour même par DHL et le laboratoire les a reçus 2 jours plus tard en Belgique.

¹ <http://www.innolab.be/fr>



Figure 1. Photos des principales étapes de la préparation des échantillons de jacinthe d'eau



Figure 2. Photo des échantillons préparés et la glacière utilisée pour les transporter

2.2 Tests BMP

La Figure 1 illustre les différentes composantes d'un échantillon de jacinthe d'eau fraîche. Toute la matière présente dans les échantillons livrés au laboratoire est désignée par « matière brute » (MB). Cette matière brute humide, qui contient beaucoup d'eau, est ensuite séchée à 105 °C pendant 24h dans une étuve/four pour obtenir la matière sèche (MS). La matière sèche est ensuite introduite dans un four à moufle durant 6h à 550 °C afin de séparer la « matière organique » (MO). Enfin, la matière brute est mélangée à de l'inoculum dans le réacteur pour démarrer le processus de digestion anaérobie. Les résultats de production de biogaz sont déterminés dans un premier temps pour la matière brute. Ensuite, en connaissant le taux de matière organique et de matière sèche, on en déduit la production de biogaz de la matière organique.

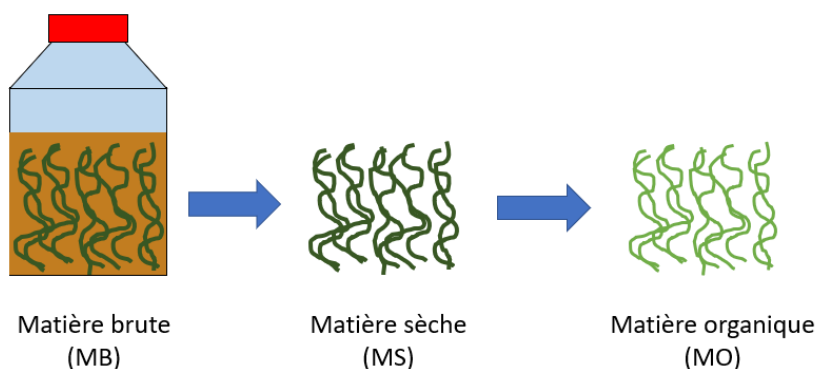


Figure 3. Composantes d'un échantillon

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

L'entreprise Innolab a été mandatée pour réaliser les tests du potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau collecté sur place. Ces tests portaient sur 20 échantillons afin d'avoir une meilleure représentativité. Les résultats des tests BMP sont donnés dans le Tableau 1.

Le substrat se caractérise par un taux de matière sèche moyen de 6% et un taux de matière organique de 80% (sur la matière sèche). La productivité de biogaz est en moyenne de 309 Nm³/tMO, mais avec une forte variation d'un échantillon à l'autre (écart-type de 68 Nm³/tMO). Cette variabilité peut s'expliquer par des différences dans le taux de matière sèche et le broyage des échantillons (une jacinthe plus sèche produira plus qu'une jacinthe avec une forte teneur en eau). Il en résulte qu'en moyenne 14 Nm³ de biogaz sont produits par tonne de matière brute. Le biogaz contient en moyenne 69% de méthane.

Dans le Tableau 2, les principaux résultats des tests BMP sont comparés avec les données de deux références issues de la littérature, ainsi que les hypothèses prises par le fabricant d'usines de méthanisation PlanET dans son offre initiale. Ces dernières données avaient été utilisées initialement pour faire le plan d'affaire de l'installation de méthanisation de 500 kW_{el}. Il s'est avéré par la suite que le taux de matière sèche de 20 % supposait un séchage partiel préalable de la jacinthe, et n'est donc pas directement comparable avec les autres cas.

Au niveau de la production de biogaz par tonne de matière organique, on constate que les données issues des différentes sources sont assez différentes. Toutefois, mis à part les données fournies par le fabricant, elles restent dans la même fourchette d'erreur que les tests BMP réalisés sur les différents échantillons par Innolab. Enfin, la teneur en méthane du biogaz produit est également assez différente de ce que nous avons trouvé dans la littérature (69 vs. 52 %).

Tableau 1. Résultats des test BMP (Innolab)

Echantillon N°	Matière sèche % matière brute	Matière organique % matière sèche	Productivité biogaz		Composition biogaz Teneur en CH4
			Nm3/ tonne MO	Nm3/ tonne MB	
1	5.35%	79.94%	301.0	12.9	67.8%
2	5.84%	78.64%	226.0	10.4	67.2%
3	5.15%	79.12%	240.2	9.8	68.0%
4	5.57%	80.17%	297.2	13.3	69.8%
5	6.38%	80.34%	222.4	11.4	68.9%
6	5.46%	80.61%	313.5	13.8	69.4%
7	5.51%	80.47%	322.5	14.3	68.5%
8	6.95%	78.37%	216.6	11.8	64.3%
9	6.60%	81.74%	168.6	9.1	70.4%
10	5.78%	80.27%	315.9	14.7	67.8%
11	5.91%	79.88%	279.9	13.2	69.9%
12	6.16%	81.58%	309.6	15.6	70.4%
13	5.50%	79.33%	388.7	17.0	68.8%
14	5.37%	78.37%	410.1	17.3	70.7%
15	5.53%	78.64%	339.4	14.8	70.5%
16	5.47%	79.30%	356.2	15.5	70.0%
17	5.61%	79.42%	379.3	16.9	69.4%
18	6.27%	81.17%	384.3	19.6	70.5%
19	5.68%	79.04%	396.5	17.8	71.1%
20	5.62%	79.12%	318.4	14.2	69.5%
Moyenne	6%	80%	309	14	69%
<i>Ecart-type</i>	<i>0.46%</i>	<i>1.01%</i>	<i>67.6</i>	<i>2.8</i>	<i>1.6%</i>

Tableau 2. Comparaison des résultats des tests avec le fabricant et quelques données de la littérature

	Taux de matière sèche	Productivité biogaz (Nm3 par tonne de matière organique)	Proportion méthane
O'Sullivan et al. 2010 [4]	N/A	267 Nm3/tonne MO	52%
Almoustapha et al. 2008 [5]	6%	392 Nm3/tonne MO	N/A
PlanET	20%	548 Nm3/tonne MO	53%
Tests Innolab	6%	309 Nm3/tonne MO	69%

L'étude du potentiel méthanogène des jacinthes d'eau nous a permis de tirer deux conclusions :

- Les données du fabricant PlanET que nous avons initialement utilisées pour l'établissement du plan d'affaire de l'usine de méthanisation sont trop optimistes. Par ailleurs, elles impliquaient que les jacinthes soient préalablement séchées, ce que nous n'avons pas considéré lors du calcul de la quantité de jacinthe requise.

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

- Il existe une assez grande variation dans les données de production de biogaz suivant les sources, et même d'un échantillon à l'autre dans un même jeu de tests sur des plantes prélevés au même endroit. Ainsi, il en résulte une incertitude sur la rentabilité d'une usine de méthanisation valorisant des jacinthes d'eau. Bien sûr, cela est sans compter d'autres incertitudes liées au mélange avec le cosubstrat.

Par souci de transparence et d'exhaustivité, nous présenterons le plan d'affaire de l'usine de 500 kW_{él} avec deux hypothèses différentes pour le taux de production de biogaz de la jacinthe : une avec l'hypothèse du fabricant, l'autre avec les valeurs obtenues par les tests d'Innolab.

3. Choix du cosubstrat

Le substrat principal de l'usine de méthanisation est la jacinthe d'eau. Toutefois, la jacinthe d'eau doit être mélangée avec un autre cosubstrat pour que le procédé de méthanisation fonctionne correctement. Le choix du cosubstrat doit tenir compte des critères suivants :

- Potentiel méthanogène : doit être le plus élevé possible afin de produire un maximum de biogaz. Au-delà de la production brute de méthane, il est important de tenir compte également de la composition chimique du substrat, notamment la teneur en azote (N) et potassium (P), afin que celui-ci favorise l'activation des bactéries responsables de la digestion anaérobie,
- Quantité de substrat disponible : elle doit être suffisante pour assurer l'exploitation de l'usine. De plus, elle devrait permettre de couvrir une part plus importante pendant les périodes de faible disponibilité des jacinthes (voir Tableau 6),
- Fluctuation de la qualité du substrat : la composition doit être la plus stable possible dans le temps afin de ne pas perturber le procédé de méthanisation,
- Disponibilité dans le temps : la ressource doit être disponible de préférence tout au long de l'année afin d'éviter de devoir changer de cosubstrat en cours d'année ce qui risquerait de diminuer le temps de fonctionnement de l'usine et donc la production d'électricité,
- Coût et accessibilité du substrat : certains substrats peuvent avoir une valeur marchande (par ex. les abattoirs vendent les bouses des bovins qui y transitent) dont il est important de tenir compte dans le calcul de rentabilité. S'ajoute à cela le coût du transport. Par ailleurs, certains substrats ne sont pas facilement accessibles, notamment s'ils sont éparpillés et dans des endroits éloignés des routes (par ex. bouses dans les champs).

Plusieurs sources d'approvisionnement en cosubstrat ont été considérées :

- Biodéchets ménagers,
- Déchets d'abattoirs (notamment les bouses),
- Lisier de bovin provenant de l'agriculture,
- Plantes aquatiques invasives autres que la jacinthe d'eau (typhas, salades d'eau, fougère d'eau),
- Déchets de l'industrie agroalimentaire.

Chacun de ces substrats a été évalué de façon qualitative selon les critères évoqués ci-dessus. Le résultat de cette évaluation est présenté dans le Tableau 3. A noter qu'en ce qui concerne les déchets agroalimentaires, les résultats dépendent du type d'industrie, et nous n'avons pas approfondi cette piste.

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Tableau 3. Evaluation des différentes sources d'approvisionnement en cosubstrat (code couleur : vert : bon résultat pour le critère ; jaune : moyen ; rouge : mauvais ; bleu : variable, car dépend du type d'industrie)

	Potentiel méthanogène	Quantité disponible	Fluctuation de la qualité	Disponibilité dans le temps	Coût et accessibilité
Biodéchets ménagers	Moyen	Abondant	Forte	Bonne	Moyen
Déchets d'abattoirs (bouses)	Elevé	Moyen	Faible	Bonne	Bon
Lisier de bovin de l'agriculture	Elevé	Moyen	Faible	Bonne	Mauvais
Autres plantes aquatiques	Faible	Elevé	Moyen	Moyen	Moyen
Déchets agroalimentaires	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable

Comme on le constate dans le Tableau 3, les déchets d'abattoirs, plus précisément les bouses des bovins transitant par l'abattoir, semblent être la source d'approvisionnement en cosubstrat la plus intéressante. En effet, ce cosubstrat présente les avantages suivants :

- Bonnes propriétés pour la méthanisation et adaptées au mélange avec la jacinthe d'eau (notamment, teneur en N et P),
- Substrat d'une qualité relativement constante et disponible tout au long de l'année,
- Facile d'accès (la plupart de la ressource est concentrée dans quelques abattoirs principaux),
- Coût raisonnable (actuellement, l'abattoir de « Sans-fil » vend ses bouses au prix de 750 F CFA par chargement de charrette à âne, correspondant à environ 500 kg),
- Quantité disponible à priori suffisante pour l'approvisionnement de l'usine.

La principale incertitude qui demeure concerne la quantité réellement disponible de ce cosubstrat. Le Tableau 4 montre la quantité de bouse produite pour les trois abattoirs principaux de Bamako. Selon nos hypothèses², jusqu'à 29 tonnes de bouses par jour seraient théoriquement disponibles pour l'approvisionnement de l'usine tout au long de l'année. La Figure 4 et la Figure 5 montrent les bouses des abattoirs de Sans fil et Sabalibougou Koura respectivement.

² Nos hypothèses se basent sur les données collectées par un étudiant malien que nous avons mandaté, et sur des données de la littérature.

Tableau 4. Potentiel de production de bouses des principaux abattoirs de Bamako

Nom de l'abattoir	Nombre de têtes de bétail (par jour)	Quantité de bouse produite (kg/jour)
Sans-fil	250	12'500
Sabalibougou Koura	230	11'500
Dialakorodji	100	5'000
Total	580	29'000



Figure 4. Photos des bouses de l'abattoir de Sans fil



Figure 5. Photo des bouses de l'abattoir de Sabalibougou Koura

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Il faut noter qu'une certaine quantité de bouse est déjà achetée par d'autres personnes. Il faudrait donc autant que possible utiliser la part résiduelle des bouses qui ne sont pas déjà valorisées. A l'abattoir de Sans fil, seulement 10 à 20% des bouses sont achetées par les jardiniers et agriculteurs et cela atteint son point culminant de 20% en début de l'hivernage (mai et juin). A l'abattoir de Sabalibougou Koura, les bouses sont déjà commandées par d'autres semi-transformateurs et l'abattoir même est en train de mettre en place une unité de transformation de ses bouses en engrais organique. Enfin, l'abattoir de Dialakorodji met les bouses à la disposition de la population en ayant la nécessité, mais en cas de partenaire fiable, il serait prêt à prendre les dispositions nécessaires pour assurer la fourniture d'un client en priorité.

Il faut noter qu'en plus de ces trois abattoirs principaux, il existe de nombreux abattoirs artisanaux aux alentours de Bamako. La situation des bouses dans ces abattoirs est précaire (parfois jetées dans les caniveaux ou ramassées par des entreprises spécialisées), mais il y aurait une possibilité d'accès et de rassemblement de ces bouses si les opportunités se présentent. L'idée d'implémenter un centre de dépôt et de conditionnement des bouses de bovin a également été évoquée.

En tenant compte des contraintes mentionnées ci-dessus, la quantité de bouses réellement disponible sur les trois abattoirs principaux serait d'environ 15 tonnes par jour. En termes énergétiques, cela correspond à environ 3'800 kWh de biogaz, ou 1'500 kWh d'électricité, soit une puissance électrique constante de 63 kW.

4. Récolte des jacinthes d'eau

La récolte des jacinthes d'eau est un élément essentiel du projet. En effet, cela permet d'assainir le fleuve des plantes aquatiques invasives, d'une part, et de fournir le principal substrat de l'usine de méthanisation, d'autre part. Les méthodes manuelles de collecte des jacinthes par l'utilisation de pirogues se sont avérées inefficaces face à l'ampleur du travail. En conséquence, nous avons évalué une autre piste faisant appel à des bateaux faucardeurs modernes.

CDO Innov (appartenant à la société française ISALT Group) est une marque d'engins de travaux motorisés dédiés aux milieux terrestres et aquatiques sensibles. L'entreprise propose de nombreuses solutions allant du faucardage, des chenillards agricoles jusqu'à la dépollution marine. En particulier, sa gamme de bateaux de travaux BPH spécialisés dans les domaines fluviaux, portuaires et maritimes est particulièrement adaptée à l'arrachage³ de plantes aquatiques invasives. Elle nous a semblé tout à fait en adéquation avec notre problématique et nous avons donc décidé de nous orienter vers cette solution. En outre, l'entreprise a acquis une grande expérience dans l'assainissement de cours d'eau en milieux tropicaux infestés par des plantes prolifératrices, y compris la jacinthe d'eau.

4.1 Bateau BPH13

Les principales caractéristiques du bateau BPH13, le produit phare de la gamme et celui conseillé pour notre projet sont données dans le Tableau 5. A noter que les bateaux de la gamme BPH sont construits sur commande et de ce fait sont hautement adaptables. En contrepartie, il faut compter un délai de livraison de 6 à 7 mois. En plus du choix de la motorisation et des matériaux de construction, de nombreux outils peuvent être ajoutés au bateau pour s'adapter aux divers travaux à réaliser. Il est également possible d'adapter des outils sur des bateaux existants. Les photos à la Figure 6 montrent à quoi ressemble un bateau BPH13 équipé pour l'arrachage de plantes aquatiques invasives.

³ Nous parlons ici d'« arrachage » et non de « faucardage ». En effet, seul l'arrachage, qui consiste à enlever les plantes complètes, y c. la racine, permet un assainissement durable, alors que le faucardage ne fait que découper les plantes en surface et ne résout pas le problème de fond, car les plantes repoussent très vite.

Tableau 5. Principales caractéristiques du bateau BPH13

Puissance du moteur⁴	80, 130 ou 180 CV
Vitesse max.	10 km/h
Consommation	8 L/h
Réservoir	100 L (plus de 12 heures d'autonomie en fonctionnement)
Matériau	Acier OU Aluminium
Equipe	1 personne
Durée de vie (en temps de fonctionnement)	Environ 10'000 h
Prix d'achat	110'000 € (avec les options requises pour notre cas)



Figure 6. Photos du BPH13 sur l'étang utilisé par CDO Innov pour ses essais

⁴ Plus la puissance du moteur augmente, plus la consommation de diesel et le bruit diminuent, car le moteur peut fonctionner à un régime réduit. Les moteurs plus puissants permettent également de connecter des outils plus puissants (par exemple pour le pompage hydraulique).

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Les bateaux BPH13 jouissent d'une grande robustesse et flexibilité d'utilisation. En effet, ils peuvent évoluer dans des milieux aquatiques très denses, accéder à des plans d'eau de très faible profondeur – jusqu'à 35 cm, mais peuvent également résister à des passages avec moins d'eau – et même arracher des plantes à distance grâce à des bras télescopiques. En outre, ils nécessitent un entretien minimal. En utilisation intensive, il faut compter 2 maintenances annuelles ce qui représente environ 5'000 € par an (pièces et main-d'œuvre comprises). A cela, il faut également ajouter un petit entretien tous les 1 à 2 mois. CDO Innov peut établir un contrat de maintenance, et elle a dans tous les cas l'obligation légale de fournir les pièces de rechange pendant au moins 10 ans (selon la loi française). Pour la maintenance courante et le petit entretien des bateaux, elle peut former des personnes sur place. Les plus grosses interventions (rares) peuvent néanmoins nécessiter un rapatriement de l'engin dans les ateliers de CDO Innov le temps de la réparation.

4.2 Solution proposée

Nous avons rencontré Cyril Thabard, fondateur et directeur de CDO Innov, avec lequel nous avons pu définir ensemble la solution technique adaptée sur la base de nos besoins et de son expertise⁵. Afin de pouvoir alimenter l'usine de méthanisation de 500 kW_{el} avec un maximum de jacinthes d'eau (80% du substrat), il faut arracher environ 43 tonnes de matière humide de jacinthes d'eau par jour⁶. Pour y parvenir, voici la configuration conseillée par CDO Innov⁷ :

- 2 bateaux type BPH13 (en acier, avec motorisation de 130 CV) pour l'arrachage des plantes invasives et le remorquage des barges,
- 3 barges non motorisées pour transporter la jacinthe,
- 1 grue (avec griffe motorisée) sur la berge pour assurer le déchargement des jacinthes depuis les barges,
- Optionnellement, un ponton pour le stationnement des bateaux.

L'investissement total de cette solution serait de 400'000 à 450'000 € pour le périmètre concernant les équipements fournis par CDO Innov, à savoir les bateaux faucardeurs, les barges, la grue et le ponton. La préparation du terrain et de la berge, la zone de stockage de la jacinthe et la voie d'accès pour les camions ne sont pas incluses dans ce coût et doivent être comptées séparément.

Ces équipements permettront de mettre en place le procédé de collecte suivant (suivre le parcours de la barge marquée en jaune sur la Figure 7) :

⁵ Le PV de cette rencontre se trouve en annexe de ce rapport.

⁶ Cette quantité journalière de jacinthes avait été calculée sur la base des données fournies par le fabricant d'usines PlanET. Ces hypothèses se sont avérées, à la suite de la réalisation des tests BMP, trop optimistes. Ainsi, avec cette quantité, il faudrait soit compenser avec plus de cosubstrat pour produire la même quantité d'électricité, soit diminuer la puissance de l'installation.

⁷ Une visite sur place par un expert de CDO Innov sera probablement nécessaire au démarrage du projet afin d'affiner les détails de la solution.

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

1. **Chargement** : Un des bateaux BPH13 arrache les plantes et les charge sur une barge stationnée à proximité.
2. **Remorquage à pleine charge** : Dès que la barge est remplie, le deuxième bateau BPH13 remorque la barge pleine vers la berge.
3. **Déchargement** : Une fois stationnée au niveau de la berge aménagée, la barge est déchargée par la griffe à l'aide d'une griffe.
4. **Remorquage à vide** : Lorsque la barge est déchargée, elle est remorquée par le bateau BPH13 pour retourner vers la zone d'infestation (puis retour à l'étape 1).

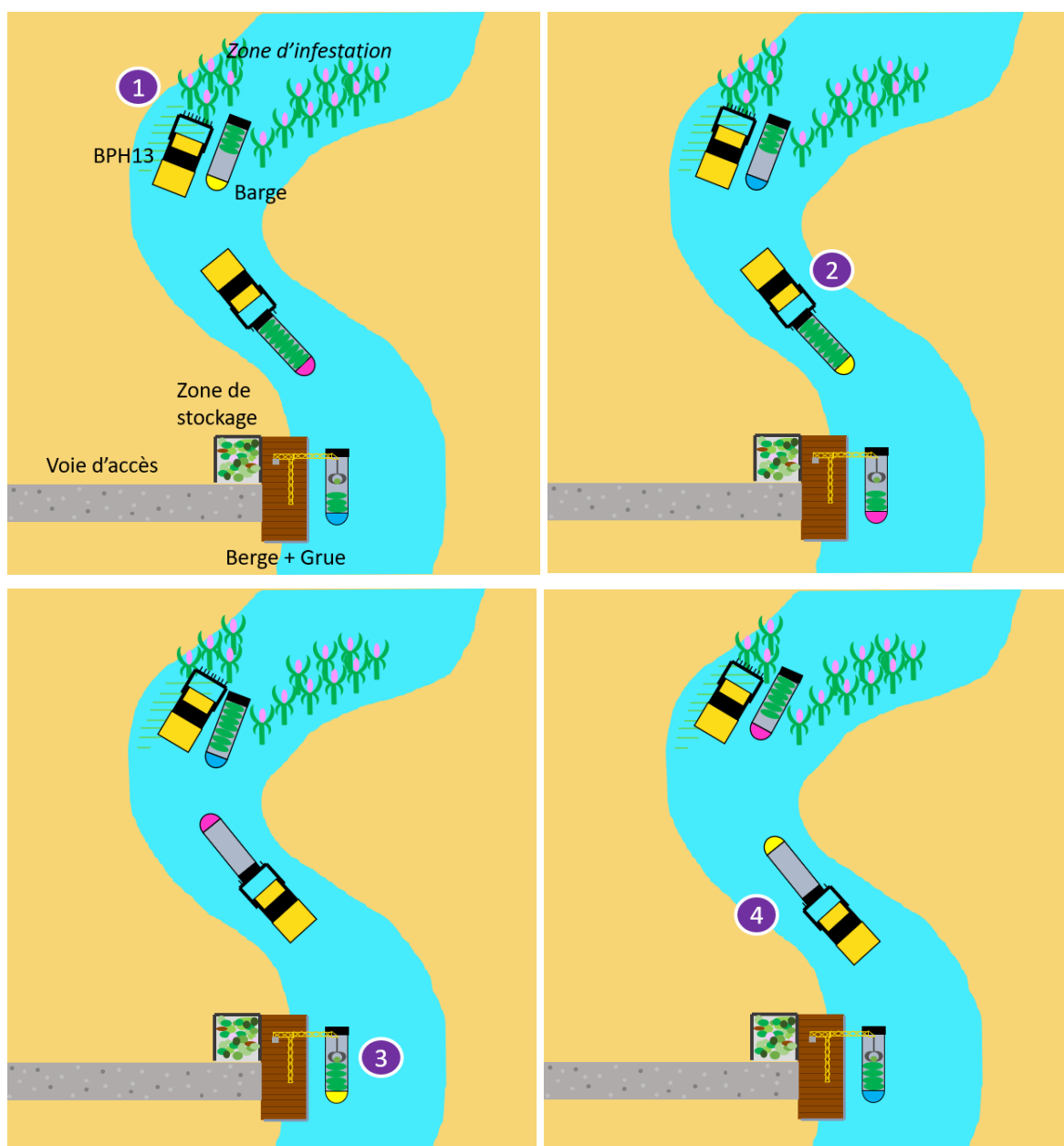


Figure 7. Etapes du procédé de collecte des jacinthes d'eau (chaque barge est distinguée par une couleur différente)

Le fait d'avoir 3 barges permet d'augmenter la fréquence de roulement, et donc la productivité. En effet, on peut avoir simultanément une barge en mode chargement au niveau de la zone d'infestation, une autre en mode déchargement au niveau du ponton, et enfin, une dernière qui est remorquée entre ces deux zones.

4.3 Taux de récolte et gestion à long terme

Le taux de récolte de jacinthe d'eau est très difficile à estimer, car cela dépend du type de plante et des caractéristiques du site. Selon l'expérience de CDO Innov, la configuration proposée ci-dessus devrait permettre d'arracher au minimum 5 tonnes de jacinthes par heure (chaque mouvement de fourche du bateau peut soulever 250 à 300 kg de plantes). Cette valeur conservatrice a été reprise dans le plan d'affaires au chapitre 6. Cependant, plusieurs aspects, évoqués ci-dessous, sont à prendre en compte.

Il faut tenir compte du fait que plus la récolte progresse, plus il faut s'éloigner du lieu de déchargement pour aller chercher la plante. Plus on s'éloignera de la zone de décharge, plus il faudra du temps pour faire le trajet, et plus le taux de récolte diminuera. A l'inverse, si les plantes finissent par repousser dans certaines zones assainies (en principe quatre récolte par année), il sera possible de diminuer le temps de trajet de nouveau.

De plus, la disponibilité de la plante varie au cours de l'année au gré des saisons. Selon les données obtenues sur le terrain, la disponibilité de la jacinthe d'eau au cours de l'année est représentée dans le Tableau 6. Pendant la période des hautes eaux (d'août à novembre), les plantes sont dispersées et le taux de récolte diminue en conséquence. Durant cette période, il est probable qu'il faudra compenser avec plus de cosubstrat. Dans ce cas, il sera nécessaire d'adapter progressivement en amont le mélange de substrat afin de ne pas déstabiliser le procédé. Alternativement, la cogénération pourrait fonctionner à charge réduite, produisant moins d'électricité.

Tableau 6. Disponibilité mensuelle des jacinthes d'eau (évaluée sur une échelle de 1 à 3, 3 étant la disponibilité maximale)

Mois	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Disponibilité	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	2

Un dernier point à noter concerne la gestion à long terme de la collecte de la jacinthe d'eau. En effet, si cette solution s'avère efficace pour assainir le fleuve des jacinthes – ce que l'on souhaite par ailleurs – il deviendra de plus en plus difficile au bout de quelques années de fournir le substrat en quantité suffisante à l'usine de méthanisation. Pour pallier à cela, la réservation d'une zone de culture maîtrisée de la jacinthe, idéalement proche de la berge, pourrait être une solution. Dans cette zone, les bateaux ne procèderaient non plus à la prise de la plante complète (y c. la racine), mais au faucardage⁸ de celles-ci. Ainsi, elles ne seraient pas déracinées et repousseraient assez rapidement, ce qui fournirait une source d'approvisionnement durable pour l'usine de méthanisation.

Un seul bateau étant probablement suffisant pour ce mode de fonctionnement, le deuxième bateau pourrait être utilisé pour assainir d'autres zones infestées, ou pour l'approvisionnement d'une deuxième usine de méthanisation. A ce titre, une option serait de faire la culture des jacinthes dans les canaux d'irrigation débouchant sur le fleuve. Cette zone pourrait également être utilisée pendant la période des hautes eaux afin de remédier au manque de disponibilité.

Pour résumer, nous proposons de mettre en place la stratégie suivante :

⁸ L'outillage des bateaux serait adapté en conséquence.

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

- Dans un premier temps, au-delà de dégager la zone directement environnante de la berge, il faudrait dégager en priorité les zones particulièrement problématiques telles que les barrages hydroélectriques, les canaux d'irrigation et les voies navigables. Pour cela, on pourrait affecter un des bateaux à l'arrachage dans la zone à proximité de la berge de déchargement, pendant que l'autre bateau se rend sur ces zones problématiques,
- Ensuite, lorsqu'il faudra aller plus loin pour chercher la jacinthe, le deuxième bateau devra être mobilisé pour assurer le rôle de remorquage des barges. Le mode de fonctionnement serait ainsi celui de la Figure 7,
- Enfin, si les plantes ne repoussent pas au fur et à mesure à un rythme suffisant, on pourrait mettre en place une zone de culture contrôlée de la jacinthe, tel que mentionné plus haut.

5. Usine de méthanisation

Dans la première étude de faisabilité réalisée en 2010, la construction d'une usine de 1,3 MW_{él} avait été proposée. Dans le cadre de cette nouvelle étude d'avant-projet détaillé, nous avons revu à la baisse la taille de l'usine afin d'avoir un projet moins risqué, et plus répliquable dans le contexte africain. C'est pourquoi nous avons opté pour une installation d'environ 500 kW_{él}.

Dans ce chapitre, nous présenterons :

- Les caractéristiques techniques de l'usine de 500 kW_{él},
- Les étapes de préparation de la jacinthe d'eau et les équipements associés,
- L'emplacement prévu pour l'usine.

5.1 Choix de la technologie

Une trentaine de fournisseurs de technologie de méthanisation ont été identifiés. Après en avoir éliminé quelques-uns pour diverses raisons (technologie inadaptée ou pas d'activité internationale), nous en avons contacté 19 pour leur demander une offre. Parmi celles-ci, 5 ont montré un intérêt :

- PlanET Biogastechnik (planet-biogas.de),
- AAT (www.aat-biogas.at),
- Sauter Biogas (www.sauter-biogas.com),
- Univers Solar,
- Xergi (www.xergi.com).

Au final, nous avons choisi de travailler avec PlanET (entreprise allemande), car cette entreprise a été la seule à nous fournir une offre sérieuse correspondant à notre besoin.

La solution proposée par PlanET est constituée des modules technologiques suivants :

- Système d'alimentation : ce système permet de préparer les intrants solides (plantes déchiquetées, fumier, déchets, etc.) et de les stocker avant de les acheminer vers les digesteurs. Le système fonctionne en mélangeant du digestat liquide pompé depuis les digesteurs avec les intrants solides. Le choix et le dimensionnement du système seront déterminés par PlanET lors de la phase de conception (pré-engineering).
- Cuve de préstockage : cette cuve de stockage est construite sur site pour contenir les intrants liquides avec une capacité de stockage correspondant à 3-5 jours de fonctionnement. Cette cuve n'est pas requise s'il n'y a pas d'intrants liquides.
- Digesteur : le digesteur est le cœur du procédé de méthanisation. Dans le digesteur, les matières organiques sont dégradées grâce à des bactéries opérant sous conditions anaérobiques (c.-à-d. en l'absence d'oxygène) à température constante (qui doit rester entre 38 et 43°C). Le digesteur est équipé de conduites en acier inoxydable dans lequel circule un fluide caloporteur pour maintenir la température. De plus, afin de minimiser l'influence de la température extérieure, il est entièrement calorifugé. Enfin, le digesteur est équipé de tous les instruments de sécurité et de monitoring nécessaires, ainsi que d'une technologie de désulfuration afin d'assurer un procédé stable et fiable. Dans la solution proposée par

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

PlanET il y a 2 digesteurs identiques fonctionnant en parallèle, chacun possédant les caractéristiques suivantes :

Diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume net (m ³)	Temps de rétention (jours)
18	6	1'400	49

- Stockage post-digestion : il s'agit de l'endroit où est stocké le digestat qui pourra être utilisé comme engrais. Ce stockage peut être sous la forme d'une cuve ou simplement un lagon. **A noter que le stockage post-digestion n'est pas fourni par PlanET.**
- Conteneur technique : le conteneur technique, situé entre les deux digesteurs, contient tous les équipements de contrôle du procédé, le collecteur compact et les compresseurs. Grâce au collecteur compact, il est possible de pomper le digestat entre les deux digesteurs, ce qui permet de mieux réguler le contenu en matière sèche dans chacun des digesteurs.
- Conduites de gaz : le biogaz est transporté depuis le stockage de gaz vers l'unité de conditionnement de gaz via des conduites souterraines en PE-HD. Afin de capturer l'eau condensée, les conduites sont équipées de collecteurs le long de la ligne.
- Traitement du gaz : le module de traitement du biogaz sert à extraire une grande partie de l'humidité, de l'ammoniac et du soufre, permettant ainsi d'augmenter la durée de vie de l'unité de cogénération.
- Unité de cogénération : un moteur thermique est installé pour convertir le biogaz en électricité et en chaleur.
- Torchère : afin de s'assurer qu'aucun biogaz ne soit directement envoyé vers l'atmosphère, l'usine de méthanisation est équipée d'une torchère automatique. Lorsque le stockage du gaz atteint son niveau maximum, un signal est envoyé pour activer la torchère afin de brûler l'excédent de gaz.

Les principales caractéristiques techniques de l'usine sont données dans le Tableau 7 (selon offre de PlanET) :

Tableau 7. Caractéristiques techniques de l'usine de méthanisation de 500 kW

Puissance électrique moteur	526 kW
Temps de fonctionnement annuel	8'000 h
Rendement électrique	40 %
Rendement thermique	43 %
Production de biogaz annuel	1'957'509 m ³
Production d'électricité brute annuelle	4'209'394 kWh
Production de chaleur nette annuelle	3'554'315 kWh

5.2 Préparation de la jacinthe d'eau

Afin d'assurer un fonctionnement optimal du digesteur, il est impératif de sécher et broyer au préalable la jacinthe d'eau. En effet, le taux d'humidité de la jacinthe est typiquement de 6% (voir chapitre 2), et les racines sont longues et fibreuses. La Figure 8 ci-dessous montre les différentes étapes de préparation de la jacinthe d'eau. Comme illustré sur cette figure, la jacinthe doit être séchée avant d'être broyée⁹. Les deux procédés (surtout le broyage) consomment de l'électricité qui peut être fournie par la cogénération. De plus le séchage nécessite également une quantité importante de chaleur qui peut également provenir de la cogénération.

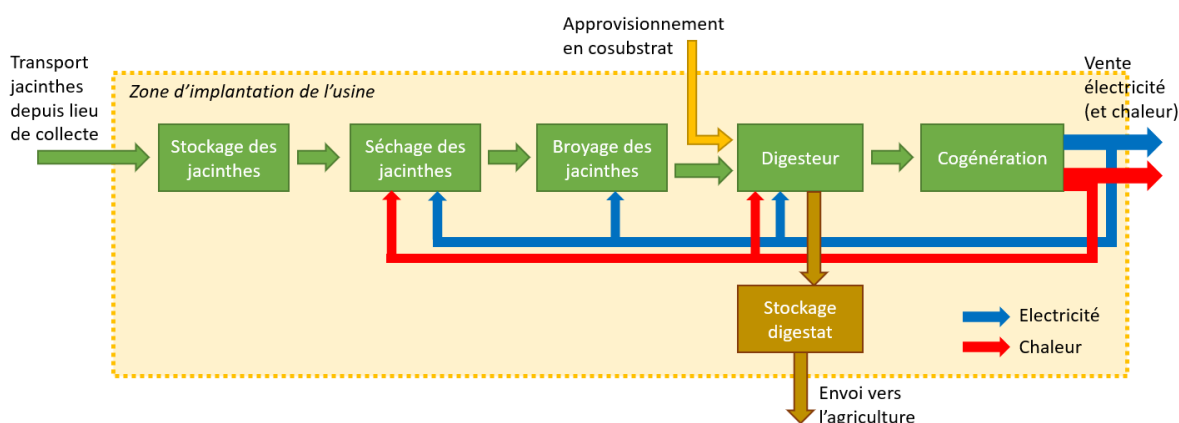


Figure 8. Etapes de la préparation des jacinthes d'eau et principaux modules de l'usine de méthanisation

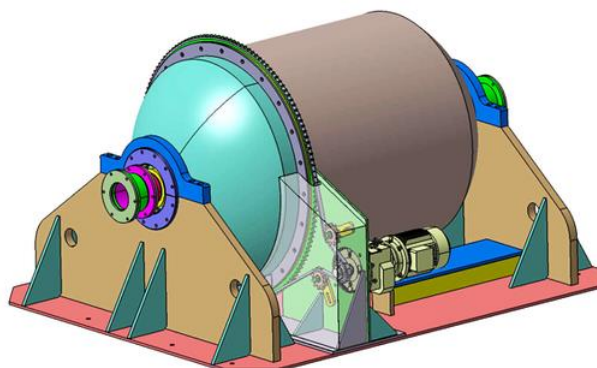
Nous avons identifié les fournisseurs suivants pour fournir les modules de préparation de la jacinthe :

- Séchage : l'entreprise néerlandaise Dorset qui fournit des systèmes de séchage de la biomasse sur mesure (<https://www.dorset.nu/green-machines/solutions/drying-biomass/>)



- Broyage : l'entreprise allemande Geisberger avec son système de broyeur à boulets PÜROTOR® 1.0 (<https://www.geisberger-gmbh.de/kugelmuehle>)

⁹ Information de C. Langguth de PlanET (e-mail du 12.07.2019)



Ces deux fournisseurs nous ont été recommandés par PlanET et leurs systèmes s'intègrent parfaitement avec la technologie de PlanET présentée ci-dessus.

5.3 Choix de l'emplacement

L'emplacement retenu pour la future usine est une zone industrielle située au nord de la commune de Koulikoro, à environ 2 km du fleuve Niger (voir Figure 9 et Figure 10). Koulikoro est une ville située sur la rive gauche du fleuve Niger, à 60 km au nord-ouest de Bamako. La route reliant Bamako à Koulikoro est en excellent état, ayant été récemment refaite. Elle permet de relier les deux villes en moins d'une heure, ce qui facilitera l'approvisionnement en cosubstrats issus des abattoirs de la ville de Bamako. L'accès au fleuve, où sera aménagée la berge, est représenté sur la Figure 11.



Figure 9. Carte montrant l'emplacement de l'usine à Koulikoro (coordonnées : 12° 54' 57" N, 7° 32' 37" W), l'accès au fleuve et la liaison routière jusqu'à l'usine (Source : GoogleEarth)



Figure 10. Terrain sur lequel sera construite la future usine de méthanisation (photo à droite avec le maire E. Diarra)



Figure 11. Accès au fleuve où sera aménagée la berge

L'usine sera construite dans une zone industrielle et artisanale sécurisée qui est actuellement planifiée. Le maire Eli Diarra, que nous avons rencontré (voir Figure 12), a octroyé un droit de superficie de 7 hectares pour l'usine dans cette zone industrielle.



Figure 12. Eli Diarra (maire de Koulikoro), Pierre Renaud et Roger Michel

6. Plan d'affaire et rentabilité économique

Initialement, un plan d'affaires avait été établi pour l'usine de méthanisation de 1,3 MW_{él} en se basant sur les données du fabricant pour la production de biogaz. Comme on l'a vu au chapitre 2, cette hypothèse s'est avérée très optimiste, et nous avons adapté le plan d'affaire avec les nouvelles données issues des tests BMP.

Dans ce chapitre, nous présenterons donc les principales hypothèses économiques, le plan d'affaires et la rentabilité économique pour les cas suivants :

- **Cas 1** : Usine de méthanisation de 500 kW_{él} avec les données de PlanET pour la production de biogaz (cas initial),
- **Cas 2** : Usine de méthanisation de 500 kW_{él} avec les données des tests BMP réalisés par Innolab.

Chacun des plans d'affaires tient compte des coûts d'investissement et d'exploitation des trois postes suivants :

- Usine de méthanisation (y compris préparation du terrain),
- Récolte des jacinthes d'eau,
- Logistique (transport des substrats par camion vers l'usine).

Le détail de chaque plan d'affaires est disponible en annexe de ce rapport (tableau et fichier Excel avec tous les paramètres).

6.1 Principales hypothèses

Le calcul de la rentabilité économique dépend fortement des hypothèses prises en compte pour le choix des valeurs des paramètres techniques, économiques et financiers. Nous détaillons ici les valeurs des principaux paramètres, les références utilisées et les hypothèses sous-jacentes. A mentionner que ces hypothèses sont issues de différentes sources liées à l'économie malienne.

6.1.1 PARAMETRES FINANCIERS

Les paramètres financiers sont résumés dans le Tableau 8. Nous ajoutons ici quelques remarques au sujet de ces hypothèses :

- La durée de vie du projet correspond au nombre d'années que nous considérons pour le calcul des indicateurs financiers (VAN, TRI, TEC). Nous avons considéré que cette durée de vie est égale à la durée de vie de l'usine de méthanisation, étant donné qu'il s'agit là de l'élément central du projet,
- Le financement propre est la part de l'investissement initial qui est financé par les fonds propres du porteur de projet (le reste étant financé par un emprunt),
- Le taux de renchérissement du capital est le rendement financier du capital investi dans le projet souhaité par le porteur de projet. Nous utilisons cette valeur comme taux d'actualisation pour le calcul de la VAN,
- La partie de l'investissement initial financée par l'emprunt est caractérisée par deux paramètres : la durée du prêt et le taux d'intérêt,

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

- Le taux d'imposition pris en compte correspond au taux de l'impôt sur les bénéfices industriels et commerciaux au Mali¹⁰. L'impôt est déduit du bénéfice brut.

Tableau 8. Paramètres financiers

Durée de vie du projet	20
Financement propre	20%
Taux de renchérissement du capital	1%
Durée prêt	20
Taux d'intérêt emprunt	2%
Taux d'imposition	35%

6.1.2 PARAMETRES ECONOMIQUES

Les paramètres économiques sont résumés dans le Tableau 9. Remarques :

- Les salaires correspondent au salaire brut local typique pour les différentes fonctions du personnel requis pour l'exploitation des installations du projet. Ces valeurs nous proviennent entre autres de Roger Michel (à l'exception du salaire de chef d'équipe pour lequel nous avons fait une hypothèse sur la base des autres salaires),
- Le prix de vente de l'électricité pris en compte correspond au prix auquel Energie du Mali rachète l'électricité selon un article d'octobre 2017,
- Nous avons fait l'hypothèse d'un taux d'augmentation annuel de 4% pour les salaires et le diesel tout au long du projet, en se basant sur l'évolution des prix des années précédentes¹¹ (mais le prix de vente de l'électricité reste constant tout au long du projet).

Tableau 9. Paramètres économiques

Salaire opérateur/chauffeur	457 €/mois
Salaire-chef d'équipe	608 €/mois
Salaire agent sécurité	152 €/mois
Prix diesel ¹²	0.97 €/L
Prix vente électricité ¹³	0.20 €/kWh

6.1.3 USINE DE METHANISATION

Le coût d'investissement de l'usine de méthanisation inclut les postes suivants :

- Etudes (y compris étude d'impact),
- Matériel,
- Construction et mise en service de l'installation,
- Formation du personnel pour l'exploitation de l'usine.

¹⁰ Source : <http://www.izf.net/content/fiscalit-des-entreprises-mali>

¹¹ Source : <https://www.combien-coute.net/salaire-moyen/mali/>

¹² Source : https://fr.globalpetrolprices.com/diesel_prices/

¹³ Source : <https://www.agenceecofin.com/gestion-publique/1910-51344-mali-le-cout-de-cession-de-l-electricite-a-la-base-des-defaillances-du-reseau-selon-les-autorites>

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

- Coût de préparation du terrain (terrassement, raccordement réseau, etc.).

Tous les coûts liés à l'usine proviennent du devis de PlanET, à l'exception de la préparation du terrain et de l'étude d'impact. Les coûts de préparation du terrain ont été estimés sur la base des informations fournies par Roger Michel.

De plus, il faut rajouter les frais administratifs pour l'établissement de la concession du terrain sur lequel sera implantée l'usine.

Enfin, il faut également compter le coût d'investissement des équipements de séchage et de hachage qui sont en dehors du périmètre de fourniture de PlanET. Pour ces équipements, nous avons utilisé les coûts estimatifs fournis par la société Geisberger.

Au niveau du coût d'exploitation, les postes suivants sont pris en compte :

- Les coûts du personnel pour l'exploitation de l'usine,
- Les frais courants de maintenance (selon l'offre de PlanET),
- Le prix de la concession du terrain,
- Les frais de fonctionnement administratifs (notamment pour l'implication des instances locales et internationales pour le bon suivi du projet).

Tout le détail des coûts d'investissement et d'exploitation est disponible dans les fichiers Excel des business plans en annexe.

6.1.4 COLLECTE DES JACINTHES

L'infrastructure à mettre en place pour assurer la collecte des jacinthes pour alimenter l'usine de méthanisation représente un investissement de 540'000 €. Cette infrastructure inclut les postes suivants :

- Achat des bateaux (2 bateaux faucardeurs et 3 barges),
- Ponton flottant pour le parage des bateaux,
- Infrastructure au sol pour le déchargement des jacinthes (grue),
- Aménagement d'une zone de stockage de la jacinthe et de chargement des camions.

Les coûts des bateaux, du ponton flottant et de l'infrastructure au sol pour le déchargement proviennent des informations transmises par CDO Innov qui sont experts du domaine et peuvent fournir chacun des composants. Le coût d'aménagement de la zone est notre propre estimation sur la base de l'estimation des coûts transmis par Roger Michel pour l'aménagement du terrain.

Les coûts d'exploitation liés à la collecte des jacinthes incluent l'achat du diesel, les salaires du personnel et la maintenance des bateaux.

6.1.5 LOGISTIQUE

Le poste « logistique » correspond aux coûts associés au transport routier des substrats (jacinthes d'eau et autres cosubstrats) depuis les points de chargement jusqu'à l'usine. Le coût d'investissement est de 120'000 € correspondant à l'achat de 2 camions-bennes d'une capacité de 16 m³. Les coûts d'exploitations se répartissent entre l'achat du diesel, le salaire du chauffeur et la maintenance des camions.

6.2 Résultats

Les données de rentabilité économique des 2 cas évoqués ci-dessus (hypothèses concernant le potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau : première variante selon les chiffres transmis par PlanEt et seconde variante selon les résultats d'Innolab) sont calculées selon les hypothèses propres au plan d'affaires. A noter que pour évaluer ces résultats il faut tenir compte des points suivants :

- La vente d'électricité est la seule source de revenus,
- Les coûts associés à la collecte des jacinthes d'eau et les coûts de transport vers l'usine sont inclus et aucun revenu lié au service environnemental n'a été pris en compte rendu à la communauté en désengorgeant le fleuve n'a été pris en compte. Une réflexion complémentaire sur cet élément devra être menée, du fait que plusieurs budgets existent pour désengorger le fleuve Niger,
- Les subventions éventuelles n'ont pas été comptabilisées.

6.2.1 USINE DE METHANISATION DE 500 KW AVEC LES HYPOTHESES DE PLANET (CAS 1)

Les principaux indicateurs financiers et résultats des calculs sont présentés dans le Tableau 10. Ces indicateurs sont calculés pour la durée de vie du projet qui est de 20 ans, ce qui correspond à la durée de vie prévue de l'usine de méthanisation. A noter que le prix de revient de l'électricité est calculé avec et sans prise en compte des coûts associés à la récolte des jacinthes d'eau. En effet, la récolte des jacinthes a pour corollaire le désengorgement du fleuve, ce qui apporte un bénéfice à la communauté qui pourrait être monétisé et donc financé par un autre moyen que la vente d'électricité. Les autres indicateurs sont toujours calculés pour l'ensemble des postes (donc avec prise en compte de la récolte). Dans tous les cas, le coût de transport des substrats par camion (pour les jacinthes comme pour les autres cosubstrats), est toujours pris en compte.

Tableau 10. Indicateurs financiers sur 20 ans (Cas 1)

Investissement initial	3'443'588 €
Coût d'exploitation annuel	245'422 €
Prix de revient de l'électricité (AVEC prise en compte des coûts de récolte)	0,17 €
Prix de revient de l'électricité (SANS prise en compte des coûts de récolte)	0,12 €
Valeur actuelle nette (VAN)	635'876 €
Taux de retour interne (TRI)	10 %
Taux d'enrichissement en capital (TEC)	0,2
Temps de retour sur investissement	9 ans

L'évolution de la VAN par année est représentée sur la Figure 13.

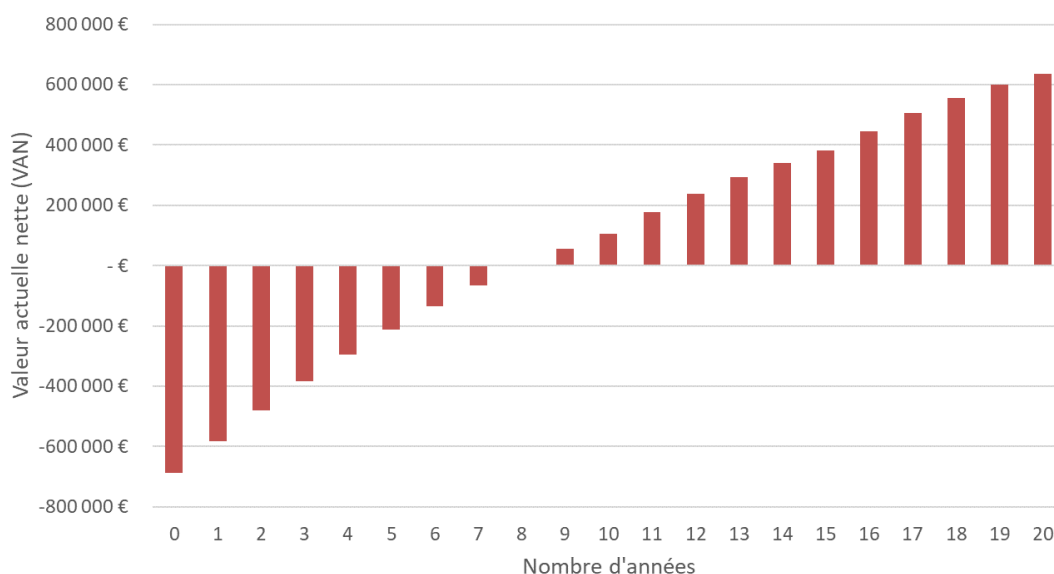


Figure 13. Evolution de la VAN au cours du projet (Cas 1)

En utilisant les hypothèses de PlanET sur le taux de production de biogaz de la jacinthe d’eau, l’usine de méthanisation serait rentable après 9 années d’exploitation. Par ailleurs, le prix de production de l’électricité sur la base de ces hypothèses serait de 0,17 €/kWh (0,12 €/kWh sans prise en compte des coûts de la récolte), ce qui est tout à fait compétitif pour le Mali d’après les informations dont nous disposons.

Nous rappelons ici que les résultats de ce cas se basent sur des hypothèses très optimistes sur la quantité de jacinthe requise pour produire cette quantité d’électricité. Le cas suivant présente des résultats plus réalistes, se basant sur les résultats des tests BMP d’Innolab.

6.2.2 USINE DE METHANISATION DE 500 KW AVEC LES DONNEES DES TESTS INNOLAB (CAS 2)

La situation est largement différente en utilisant les données issues des tests d’Innolab sur le potentiel méthanogène de la jacinthe. Les nouvelles hypothèses pour le cas 2 sont les suivantes :

- Modification du potentiel méthanogène moyen issu des tests d’Innolab (voir Tableau 1),
- La quantité totale de matière pénétrant dans le digesteur est d’environ 21'000 tonnes par an afin de respecter les valeurs de dimensionnement du fabricant,
- Nous utilisons tout le potentiel de cosubstrat disponible (15 tonnes par jours ; voir chapitre 3),
- La jacinthe est séchée en amont de la méthanisation afin de passer de 6% de matière sèche à environ 20%,
- Afin de ne pas surdimensionner la cogénération, nous en adaptons la puissance à 400 kW et recalculons l’investissement en conséquence (par interpolation entre plusieurs chiffrages de PlanET pour différentes puissances),
- 6 bateaux faucardeurs (au lieu de 2), 6 barges (au lieu de 3), et 2 grues (au lieu de 2) sont nécessaires afin de tripler le taux de récolte horaire de la jacinthe d’eau. La main-d’œuvre requise pour la conduite des engins est augmentée en conséquence,
- En revanche, nous gardons le nombre de camions constant (2 camions) en faisant l’hypothèse qu’ils sont exploités un peu plus intensément (ils n’étaient pas exploités à leur plein potentiel dans le cas initial).

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Les principaux indicateurs financiers pour ce cas 2 sont présentés dans le Tableau 11. L'augmentation de l'investissement et des coûts d'exploitation par rapport au cas 1 s'explique par l'achat des bateaux supplémentaires et par la consommation de diesel accrue afin de récolter environ 3 fois plus de jacinthes d'eau. Dans ce cas de figure, l'installation n'est pas rentable. Non seulement l'investissement n'est pas remboursé au bout de 20 ans, mais les revenus de la vente d'électricité ne permettent pas de compenser les coûts d'exploitation, comme on le constate dans le graphique de la Figure 14.

Tableau 11. Indicateurs financiers sur 20 ans (Cas 2)

Investissement initial	3'935'230 €
Coût d'exploitation annuel	328'395 €
Prix de revient de l'électricité (AVEC prise en compte des coûts de récolte)	0,30 €
Prix de revient de l'électricité (SANS prise en compte des coûts de récolte)	0,16 €
Valeur actuelle nette (VAN)	- 5'882'660 €
Taux de retour interne (TRI)	N/A
Taux d'enrichissement en capital (TEC)	- 1,5
Temps de retour sur investissement	N/A

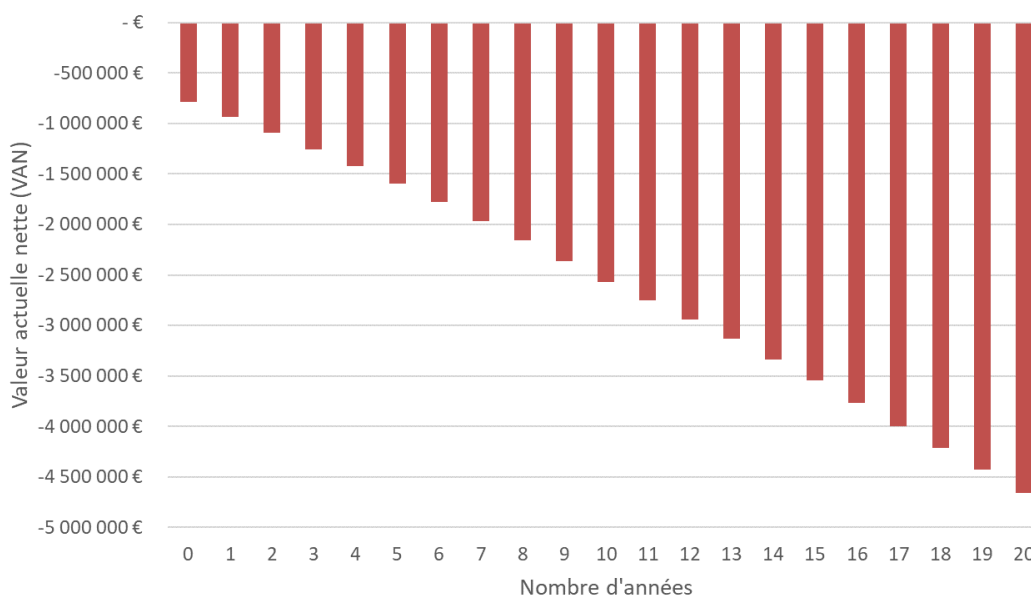


Figure 14. Evolution de la VAN au cours du projet (Cas 2)

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Ce résultat étant insatisfaisant, nous avons également établi un plan d'affaires dans lequel les coûts associés à la récolte étaient exclus. En effet, comme mentionné plus haut, ce service rendu pourrait être financé par un autre biais (par exemple via le budget prévu pour l'assainissement du fleuve). Les indicateurs financiers de ce cas sont donnés dans le Tableau 12 et la Figure 15. On voit que dans ce cas, le projet redevient rentable, avec un temps de retour de 7 ans. Ceci implique de subventionner la récolte de jacinthes – et le désengorgement du fleuve qui en découle – à hauteur de 335'937 € par an (incluant l'investissement annualisé et les coûts d'exploitation de la récolte).

Tableau 12. Indicateurs financiers sur 20 ans (Cas 2 sans récolte)

Investissement initial	2'730'230 €
Coût d'exploitation annuel	182'118 €
Valeur actuelle nette (VAN)	794'439 €
Taux de retour interne (TRI)	15 %
Taux d'enrichissement en capital (TEC)	0,3
Temps de retour sur investissement	7

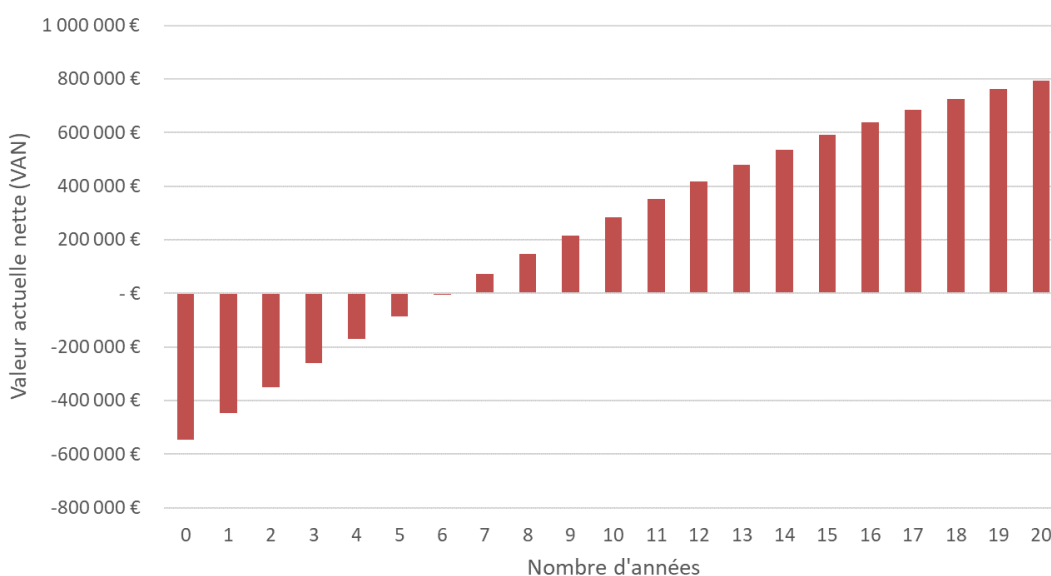


Figure 15. Evolution de la VAN au cours du projet (Cas 2 sans récolte)

D'autres financements croisés peuvent être envisagés :

- Rétribution pour le digestat mis à disposition en tant qu'engrais pour l'agriculture,
- Support financier des usines hydroélectriques dont l'exploitation sera facilitée,
- Support de la compagnie de navigation pour facilitation des déplacements sur le fleuve,
- ...

7. Installation pilote de 75 kW

Les résultats des tests du potentiel méthanogène et la comparaison avec les données de la littérature et du fabricant (voir Tableau 2, p.9) ont montré qu'il existe une grande variabilité dans la production de biogaz à partir de la jacinthe d'eau. Par ailleurs, nous avons formulé plusieurs hypothèses sur d'autres paramètres utilisés dans le plan d'affaires qui nécessitent d'être confirmées. En raison du manque de retour d'expérience disponible sur des usines de méthanisation de cette envergure en Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement au Mali et en utilisant des jacinthes d'eau, les hypothèses ne pourront être validées que par des données obtenues sur le terrain dans le cadre d'une réalisation locale, le contexte étant très différent de celui d'une installation de biogaz en Europe.

Sur la base de ces constatations, nous proposons la mise en place d'une installation pilote de plus petite taille pour confirmer le potentiel et la faisabilité technico-économique, avant de lancer la construction d'une installation d'envergure à but commercial.

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques techniques de cette installation pilote, le plan d'affaires associé et les principales variations par rapport au projet initial.

7.1 Caractéristiques techniques

Pour cette installation pilote, nous proposons d'implémenter la technologie Valentin développée par PlanET¹⁴. Cette solution a été spécialement conçue pour les installations de méthanisation de petite taille (40 à 150 kW_{él}) pouvant être exploitées dans des régions éloignées, pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur, même en l'absence de connexion au réseau électrique. Il s'agit d'une solution hautement standardisée, conçue pour s'intégrer facilement dans l'infrastructure existante et pouvant être assemblé et mis en service sans connaissances avancées préalables.

PlanET nous a fait une offre pour une installation de 75 kW_{él}. Le périmètre de fourniture est le même que pour l'installation de 500 kW. L'installation comprend un digesteur possédant les caractéristiques suivantes :

Diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume net (m ³)	Temps de rétention (jours)
20.5	3	891	30

Pour la construction, un mode d'emploi est fourni qui permet à l'utilisateur de monter lui-même l'installation. De plus, PlanET peut assister le client à la construction pour un coût supplémentaire.

Les principales caractéristiques techniques de cette installation pilote sont données dans le Tableau 13 (selon offre de PlanET) :

¹⁴ Documentation commerciale fournie en annexe de rapport.

Tableau 13. Caractéristiques techniques de l'installation de méthanisation de 75 kW

Capacité de traitement d'intrant annuel	3'300 – 8'800 m ³
Production de biogaz annuel	280'000 – 300'000 m ³
Puissance électrique moteur	75 kW
Temps de fonctionnement annuel	8'000 h
Rendement électrique	39 %
Rendement thermique	44 %
Production d'électricité brute annuelle	600'000 kWh
Production de chaleur nette annuelle	Jusqu'à 675'000 kWh

Les étapes de préparation sont sensiblement les mêmes que pour l'installation de 500 kW_{él}, à savoir le séchage suivi du broyage des jacinthes d'eau (voir Figure 8).

Puisqu'il s'agit d'une installation pilote, nous recommandons de tester et comparer différents modes de fonctionnement, notamment :

- Différentes proportions de substrats (masse de jacinthe/masse totale),
- Différents modes de séchage (séchage naturel au soleil/séchage en récupérant la chaleur de la cogénération) et taux d'humidité de la jacinthe,
- Avec/sans broyage.

Ainsi, nous pourrions déterminer les conditions optimales de fonctionnement de l'installation, d'un point de vue technique, mais également économique (par exemple vérifier la pertinence d'une unité de séchage utilisant la chaleur de la cogénération). A ce titre, il serait opportun d'impliquer des universités et/ou centres de recherche locaux dans cette étude, afin de développer des compétences dans le domaine au niveau local.

De plus, aucun centre de compétence en matière de biogaz existant au Mali, une telle installation serait la bienvenue.

7.2 Plan d'affaires

Les données financières du projet d'installation pilote de 75 kW_{él} sont précisées dans le Tableau 14. À priori, l'installation n'est pas directement rentable. Toutefois, les calculs de rentabilité ne sont pas déterminants ; s'agissant d'une installation pilote, le but premier est de mettre en place la première pierre pour implanter cette technologie dans un contexte nouveau. Le détail des coûts et hypothèses est donné dans un tableau Excel en annexe du rapport.

Tableau 14. Indicateurs financiers sur 20 ans (Cas 3 : Installation pilote de 75 kW)

Investissement initial	1'031'907 €
Coût d'exploitation annuel	128'376 €
Prix de revient de l'électricité (AVEC prise en compte des coûts de récolte)	0,48 €
Prix de revient de l'électricité (SANS prise en compte des coûts de récolte)	0,27 €
Valeur actuelle nette (VAN)	- 3'250'701 €
Taux de retour interne (TRI)	N/A
Taux d'enrichissement en capital (TEC)	- 3,2
Temps de retour sur investissement	N/A

7.3 Autres aspects

Lieu d'implantation

Nous proposons d'implanter cette installation pilote à Bamako, dans la zone industrielle proche du fleuve, sous réserve de disponibilité du terrain. Selon M. Boubacar Keita, Directeur général de EDM, une partie de ce terrain pourrait être libérée. Ainsi, nous pourrions profiter de la proximité avec des universités et centres de recherche afin de permettre à Bamako de devenir le centre de référence et de compétence de la problématique de la jacinthe d'eau en Afrique de l'Ouest. Ce centre de compétence peut être étendu à la technologie de la méthanisation en général.

Récolte des jacinthes

Dans le cas d'une installation pilote de 75 kW_{el}, moins de jacinthe d'eau sera nécessaire pour alimenter l'usine de méthanisation et la configuration proposée à la section 4.2 serait surdimensionnée. Ainsi, nous proposons d'acquérir un seul bateau et une seule barge pour cette première étape. Une berge serait toutefois aménagée avec une grue afin de décharger les jacinthes. La localisation de la zone aménagée pour le déchargement reste à préciser, mais il faudra viser un emplacement proche du site d'implantation de l'installation pilote.

En ce qui concerne la logistique, nous suggérons de commencer par l'achat d'un seul camion pour l'installation pilote.

8. Optimisation des retombées du projet

Le principal objectif du projet est d'éliminer les plantes aquatiques nuisibles en les valorisant dans une usine de méthanisation pour produire de l'électricité et de l'engrais. Au-delà de ces aspects, d'autres retombés positifs sont à prendre en compte et, dans la mesure du possible, à optimiser, dont notamment :

- L'impact socio-économique du projet par l'implication et la formation de la main-d'œuvre locale,
- La production d'autres produits alternatifs à partir de la jacinthe d'eau,
- Le désengorgement du fleuve,
- La maîtrise de la méthanisation en général.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats pour le cas d'une usine de 500 kW_{él} (en tenant compte des valeurs de méthanisation données par Innolab). En effet, ces indicateurs n'ont que peu de sens pour une installation pilote où l'objectif est principalement d'apprendre afin de pouvoir développer par la suite des installations de plus grande taille et économiquement rentables.

8.1 Implication et formation de la main-d'œuvre locale

Le succès du projet dépend fortement de l'implication et la formation de la main-d'œuvre locale. En effet, une main-d'œuvre formée et suffisante en nombre est nécessaire à chaque étape du projet, et à chaque étape de la filière de valorisation des plantes aquatiques invasives.

La quantité de main-d'œuvre locale requise pour la réalisation du projet, au niveau de la construction et de l'exploitation, est résumée dans le Tableau 15. Ces valeurs sont des estimations que nous avons obtenues grâce à nos échanges avec les spécialistes des domaines respectifs, et elles sont reprises dans les hypothèses utilisées pour le business plan (voir chapitre 6). Nous constatons que sur le long terme, le projet permettra de fournir du travail à temps plein à environ 28 personnes. Par ailleurs, la phase de construction donnera de l'emploi à une douzaine de personnes sur une période de 6 à 8 mois.

Tableau 15. Main-d'œuvre requise pour les différentes étapes du projet

Etape	Construction (en personne-mois)	Exploitation (en équivalent temps plein ¹⁵)
Collecte Jacinthes	10	17
Logistique (Conducteurs de camions)	0	2
Usine de méthanisation	70	9
Total	80	28

¹⁵ Un équivalent temps plein correspond au travail réalisé par une personne travaillant 40 heures par semaine.

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Il est à préciser que :

- Pour la phase de construction, nous avons exprimé la quantité de main-d'œuvre en *personne-mois* car les personnes sont employées à court terme (sur la durée de la construction uniquement),
- Pour la phase d'exploitation, nous avons exprimé la quantité de main-d'œuvre en *équivalent temps plein* car cette phase nécessite l'implication de la main-d'œuvre sur le long terme (plusieurs années).

Au-delà de la quantité, la qualité de la main d'œuvre doit également être prise en compte. En effet, la formation de la main-d'œuvre se doit d'être en adéquation avec les technologies utilisées et les tâches effectuées. Pour cela, les entreprises européennes fournissant les technologies ont inclus dans leurs offres la formation de la main-d'œuvre locale :

- Pour la collecte des jacinthes d'eau, l'entreprise CDO Innov assurera la formation pour le pilotage et la maintenance de leurs bateaux,
- L'entreprise PlanET assurera la formation pour l'exploitation de l'usine de méthanisation.

Le Tableau 16 montre la durée des formations dispensées par les fournisseurs, ainsi que le nombre de personnes qui seront formées au démarrage du projet. Au total, il est prévu de former environ 23 personnes sur site.

Tableau 16. Formations dispensées par les fournisseurs

Technologie	Formateur	Durée de formation	Nombre de personnes formées
Bateaux faucardeurs	CDO Innov	2 jours	16
Usine de méthanisation	PlanET	5 jours	7

8.2 Valorisation de la jacinthe d'eau en d'autres produits

Le principal revenu qui assurera la viabilité économique du projet est la vente d'électricité. C'est également le seul revenu direct qui est considéré dans l'analyse financière au chapitre 6. En plus de la vente d'électricité, il est prévu de mettre à disposition gratuitement le digestat de la méthanisation pour qu'il soit utilisé comme engrais dans l'agriculture. L'installation de méthanisation permettrait de produire environ 18'400 tonnes par an d'engrais (en supposant que la totalité des digestats soient valorisés en engrais).

Au niveau de l'usine de méthanisation, d'autres produits peuvent être valorisés, notamment :

- La chaleur issue de la cogénération,
- Le biogaz directement via le remplissage de bouteilles de gaz pour la cuisson.

Après la part de chaleur autoconsommée par le procédé de méthanisation, la quantité nette de chaleur exploitable serait d'environ 2'600 MWh. Cette chaleur se répartit comme suit :

- 50% de chaleur à haute température récupérée sur les fumées de combustion à 550°C,
- 50% de chaleur à moyenne température (entre 80 et 70°) récupérée sur l'eau de refroidissement.

L'usine de méthanisation sera implantée dans une future zone industrielle et artisanale dans la municipalité de Koulikoro. Nous ne savons pas encore quels types d'industries viendront s'installer dans cette zone, mais il est possible que certaines d'entre elles aient des besoins de chaleur qui

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

pourraient être fournis par la future usine, à condition que le niveau de température soit en adéquation. Dans ce cas, des investissements supplémentaires seront nécessaires afin de relier les industries et artisans à l'installation de méthanisation via un réseau de chaleur. A ce stade, nous n'avons pas tenu compte de l'utilisation de cette chaleur dans l'analyse financière, car il y a trop d'incertitude sur les preneurs potentiels. Toutefois, une partie de cette chaleur pourra d'ores et déjà être utilisée pour le séchage de la jacinthe en amont afin d'améliorer le rendement global de l'installation.

Alternativement, le biogaz pourrait également être utilisé pour remplir des bouteilles de gaz de cuisson, comme cela a été fait dans un autre projet REPIC au Bénin [6]. En effet, l'utilisation de réchauds au biogaz pour la cuisson d'aliments est une solution très prometteuse pour résoudre les problèmes sanitaires et économiques liés à la cuisson en Afrique subsaharienne, tel que rapporté dans le rapport de la Banque Mondiale [7]. Ces bouteilles seraient ensuite vendues à des particuliers pour leurs besoins personnels.

Il est toutefois à noter que l'utilisation du biogaz dans une unité de cogénération (pour l'électricité et la chaleur) et pour le remplissage de bouteilles de gaz est mutuellement exclusive. Par ailleurs, à partir du moment où l'on investit dans une unité de cogénération, celle-ci doit être exploitée le plus possible afin de rentabiliser l'investissement. Dans le cadre de notre projet, nous n'envisagerons donc pas d'autre utilisation pour le biogaz. Cependant, si le concept de méthanisation des jacinthes d'eau devait être répliqué ailleurs, l'option de remplissage de bouteilles pourrait être considérée.

L'infrastructure pour la collecte des jacinthes est dimensionnée afin de pourvoir aux besoins en substrat de l'usine de méthanisation. Toutefois, si l'usine de méthanisation devait utiliser moins de jacinthe que ce que les bateaux faucardeurs peuvent fournir – soit parce que la productivité des bateaux faucardeurs est meilleure que prévue, soit parce que la part de jacinthe d'eau que peut accepter le procédé de méthanisation s'avère plus faible – le solde de jacinthes pourrait être utilisé à d'autres fins. A ce titre, nous pouvons citer les exemples d'utilisation suivants :

- Compost (usine existante au Mali exploitée par la société Eléphant Vert),
- Alimentation animale,
- Matériau pour l'artisanat,
- Briques pour la construction.

Nous n'approfondirons pas ces points, car cela sort du cadre de notre étude, mais la question pourra se poser si on constate un excédent de jacinthes. Par ailleurs, ces pistes devraient également être étudiées dans le cadre de la gestion plus globale de la problématique des jacinthes d'eau.

8.3 Désengorgement du fleuve

L'arrachage des jacinthes d'eau permettra de désengorger le fleuve de cette plante invasive, ce qui aura un impact positif sur les activités économiques associées au fleuve, notamment :

- La navigation,
- La pisciculture,
- L'agriculture,
- La production d'électricité à partir d'usines hydroélectriques.

Comme mentionné au chapitre 4, nous proposons d'assainir en priorité les zones ayant le plus d'impact sur les activités susmentionnées afin d'optimiser les retombés du projet.

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

8.3.1 NAVIGATION

Le désengorgement du fleuve permettra une circulation par bateau plus fluide le long du fleuve, ayant un impact positif sur les activités du fleuve, notamment la pêche et le transport de personnes et de marchandises.

8.3.2 PECHE

La population de poissons devrait bénéficier de l'élimination des jacinthes qui étouffe la vie aquatique. L'augmentation de la population des poissons sera bénéfique pour l'activité de pêche et les poissons seront également plus faciles d'accès pour les pêcheurs.

8.3.3 AGRICULTURE

Les canaux servant à l'irrigation des cultures sont actuellement infestés de jacinthe d'eau. La libération des canaux d'irrigation permettra d'augmenter la productivité des terres agricoles et de mieux résister aux sécheresses.

8.3.4 HYDROELECTRICITE

La production d'électricité des barrages sur le fleuve est fortement réduite du fait des jacinthes d'eau. De plus, les barrages doivent régulièrement être désengorgés ce qui augmente les coûts d'exploitation. La réduction des jacinthes d'eau en amont du fleuve permettra d'augmenter la production électrique des centrales hydroélectriques.

8.4 Transfert technologique et répliquabilité du projet

Il est certain que le projet d'usine de méthanisation contribuera positivement à la décongestion du fleuve Niger et à la production d'électricité au Mali. Toutefois, cette installation à elle seule ne résoudra pas le problème de la jacinthe d'eau. Il est donc impératif de traiter le projet actuel comme un projet phare qui servira d'exemple dans le but d'être répliqué à grande échelle, au Mali d'abord, mais également dans tous les pays d'Afrique de l'Ouest affectés par ce fléau.

Afin d'assurer cette répliquabilité, nous faisons les recommandations suivantes :

- Faire de Bamako, par le biais de ce projet (et notamment par la réalisation d'une installation pilote en première étape), un centre de référence international pour le combat contre la jacinthe d'eau,
- Capitaliser sur le retour d'expérience à toutes les étapes du projet (la conception, la construction, la mise en service et l'exploitation), dans un premier temps pour l'installation pilote. Il faudra notamment prendre soin de documenter tous les problèmes rencontrés et les solutions trouvées pour les résoudre,
- Communiquer sur le projet au Mali et plus largement dans les autres pays d'Afrique affectés par la jacinthe d'eau via la presse (y compris en ligne), la télévision, la radio, les réseaux sociaux et l'organisation de conférences et séminaires internationaux,

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

- Utiliser cette première installation comme outil pédagogique dans le cadre de la formation des futurs ingénieurs et techniciens, et également des exploitants d'une future usine. Dans ce cadre, il faudra notamment profiter de la proximité avec l'Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée¹⁶ (IPR-IFRA), par exemple via des offres de stage et des visites d'étude,
- Enfin, pour concrétiser la réplication du concept, nous conseillons au gouvernement malien de lancer un appel d'offres pour la réalisation d'une deuxième usine de méthanisation dès que la première usine (ou l'installation pilote) aura fait ses preuves (après 1 ou 2 ans d'exploitation).

¹⁶ <http://www.ipr-ifra.edu.ml/>

9. Identification des sujets EIES

Une Etude d'Impact Environnementale et Sociale (EIES) doit être réalisée en amont du projet de construction de l'usine de méthanisation. En effet, ceci est :

- D'une part une exigence légale, en vertu du décret N°08-346/P-RM du 26 juin 2008 relatif à l'Etude d'Impact Environnemental et Social,
- D'autre part une exigence dans le cadre d'une demande de financement auprès de certains organismes, par exemple la Banque Africaine de Développement.

9.1.1 CONTEXTE LEGAL

Selon le décret N°08-346/P-RM du 26 juin 2008 relatif à l'Etude d'Impact Environnemental et Social, certaines catégories de projet doivent faire l'objet d'une EIES. La construction d'une usine de méthanisation appartient à la catégorie de projet soumis à l'EIES, laquelle se caractérise par :

- L'identification et l'évaluation détaillée des impacts,
- La description des méthodes utilisées pour la consultation publique,
- Le plan de gestion environnementale et sociale (PGES).

L'étude est sanctionnée par un rapport d'Etude d'Impact Environnemental et Social.

En outre, une consultation publique ayant pour objectif de recueillir les avis des populations concernées par le projet est organisée par le représentant de l'Etat ou le maire du lieu d'implantation du projet avec le concours des services techniques et la participation du promoteur.

L'Etude d'Impact Environnemental et Social doit inclure :

- Un résumé non technique du dossier d'étude d'impact sur l'environnement,
- Des informations générales, notamment la description du projet proposé, les caractéristiques et les limites de la zone d'étude, les principales parties concernées,
- Une description de l'environnement du projet proposé : les caractéristiques physiques, biologiques et socioculturelles, les tendances et menaces pour l'environnement,
- Une identification et une évaluation des impacts positifs et négatifs potentiels : directs et indirects, immédiat et à long terme, importants et secondaires, locaux et éloignés du projet proposé sur l'environnement,
- Une analyse des solutions de remplacement,
- Une estimation des types et quantités de résidus et des émissions attendues (pollution de l'eau, de l'air et du sol, bruit, vibrations, etc.) occasionnées par le projet,
- Une description des mesures permettant de prévenir, de réduire ou de compenser dans la mesure du possible de graves détériorations de l'environnement ainsi que la description des mesures alternatives ou d'intervention non compensable, mais prioritaire dans la nature, le paysage et le milieu humains,
- Une brève description des méthodes utilisées pour la consultation publique et les résultats y afférents,
- Une analyse coûts/avantages,
- Un plan de gestion environnementale et sociale.

9.1.2 IDENTIFICATION DES IMPACTS

A ce stade, les sujets à traiter lors de l'EIES ont été identifiés. La liste des impacts, positifs et négatifs, qu'il faudra étudier plus en détail lors de l'EIES est donnée dans le Tableau 17. Cette liste a été catégorisée suivant les différentes étapes de la filière de valorisation. Si d'autres impacts sont identifiés entre temps, ils seront intégrés à l'EIES.

Tableau 17. Listes des sujets identifiés pour l'étude EIES

Etape	Impacts positifs	Impacts à gérer
Récolte des plantes aquatiques	<ul style="list-style-type: none"> • Création d'emploi • Amélioration de la navigabilité • Exploitation piscicole • Exploitation hydro-électrique • Libération des canaux latéraux d'irrigation • Amélioration sanitaire (moins de moustiques) 	<ul style="list-style-type: none"> • Conflit d'utilisation du fleuve avec le peuple Bozo vivant au bord du fleuve, lequel est considéré comme « maître du fleuve ». L'inclusion des responsables locaux de cette ethnie est indispensable pour obtenir leur acceptation • La consommation de diesel des bateaux faucardeurs pour la récolte des plantes aquatiques • L'impact sur la faune et flore aquatique et sur les autres espèces dépendant du fleuve • Pollution de l'eau pour les populations riveraines
Collecte des autres cosubstrats	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelle filière de valorisation des déchets et mise en place d'une économie circulaire • Permettra aux « trieurs » des déchets dans les décharges de vendre leurs déchets et d'augmenter leurs revenus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes de santé liés au tri des biodéchets dans les décharges (manque de mesures d'hygiène) • Consommation de diesel des camions (ou autre moyen de transport) pour acheminer les déchets à l'usine • Congestion des routes à cause des camions amenant les biodéchets et les plantes aquatiques (usine située probablement à environ 1 km du bord du fleuve) • Il faudra également tenir compte des conflits d'utilisations éventuels avec d'autres utilisateurs
Exploitation de l'usine de méthanisation	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelle source d'approvisionnement en électricité • Production d'engrais pour l'agriculture 	<ul style="list-style-type: none"> • Emission de gaz (pollution atmosphérique) • Nuisances olfactives • Impact sur le paysage • Sécurité liée à l'exploitation de l'usine, y compris le risque d'explosion
Valorisation du digestat en engrais		<ul style="list-style-type: none"> • Contenu en métaux lourds, notamment dans les biodéchets si ceux-ci sont utilisés comme cosubstrats (voir étude sur la composition du compost jointe à ce rapport) • Consommation de diesel des camions (ou autre moyen de transport) pour acheminer le digestat chez les agriculteurs

10. Organisation légale et administrative du projet

10.1 Projet pilote

Pour la réalisation du projet pilote de 75 kW_{el} nous préconisons de fonder une association à but non lucratif qui aurait pour missions de i) rassembler les partenaires nécessaires au projet, ii) rechercher et obtenir le financement, iii) organiser l'appel d'offres pour la construction de l'installation pilote, iv) exploiter l'installation pilote, et v) communiquer et disséminer les résultats du projet.

Cette association devrait être présidée par une personne locale avec un profil d'économiste et une expérience en gestion de projet. L'association devrait également employer plusieurs personnes pour assister le président dans la gestion du projet, et pour l'exploitation de l'installation, y compris la collecte de jacinthes. Certaines tâches pourraient éventuellement être sous-traitées.

Un appel d'offres public serait lancé par l'association pour trouver une entreprise de construction qui réaliserait les travaux, sous la supervision de PlanET.

Les partenaires qu'il serait nécessaire de mobiliser dans ce projet, avec des niveaux d'implication différents, sont présentés dans le Tableau 18.

Tableau 18. Partenaires pour le projet pilote

Partenaire	Rôle
PlanET	Fourniture du matériel et coordination de la construction Support technique lors de l'exploitation
Energie du Mali	Connexion de l'installation au réseau électrique Contrat de rachat de l'électricité
Instituts de recherches / Universités	Suivi scientifique du projet Formation
Ministère de l'Environnement	Intérêt pour la problématique des jacinthes d'eau
Collectivité locale	Mettre à disposition un terrain pour la réalisation Octroyer les autorisations nécessaires
Pêcheurs / navigateurs	Collaboration pour la collecte des jacinthes d'eau

Des demandes de financement seraient adressées à plusieurs institutions, telles que par exemple la Banque Mondiale, la Banque Africaine de Développement et la Banque Islamique de Développement.

10.2 Projet d'usine de méthanisation

Après validation du projet pilote, le projet d'usine de méthanisation de 500 kW_{el} pourra être lancé. Pour la réalisation de cette 2^{ème} phase, nous proposons la mise en place d'un Partenariat public-privé (PPP) entre un Groupement d'intérêt économique (GIE) et l'Etat malien, représenté par Energie du Mali (EDM) et le Ministère de l'Environnement (voir Figure 16). Le PPP consiste en un contrat fixant les conditions dans lesquelles le GIE peut exploiter l'usine de méthanisation, et les droits et obligations de chaque partie envers l'autre. EDM assistera le GIE à préparer le dossier pour la création du PPP.

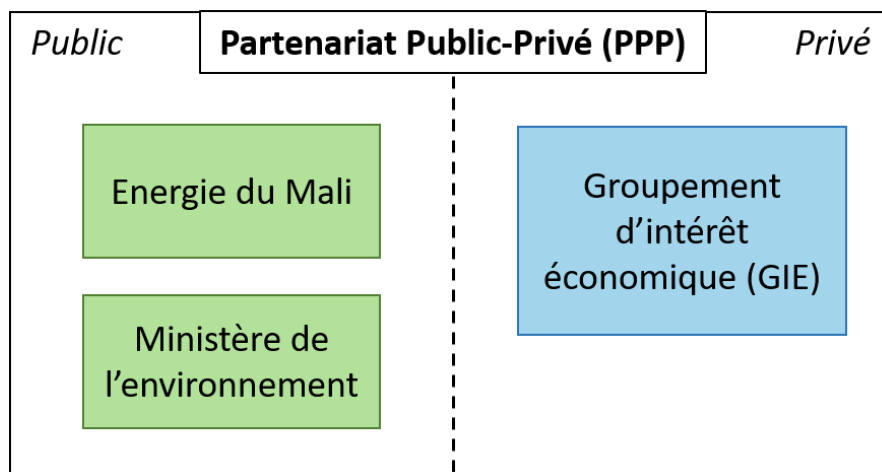


Figure 16. Partenariat Public-Privé

Des parties prenantes avec un intérêt économique dans le projet, et qui seraient prêtes à investir au capital du GIE, devront être mobilisées. Voici les différentes parties prenantes qui pourraient être concernées :

- Fournisseur de l'usine (PlanET),
- Exploitant de l'usine (une société pourrait être créée pour l'exploitation de l'usine),
- Vendeurs ou utilisateurs des engrais,
- Exploitants des abattoirs (fourniture cosubstrat),
- Pêcheurs/navigateurs,
- Bureau d'étude (par ex. Planair) pour le support technique et financier,
- Autres.

Le financement du projet pourrait en partie provenir des parties prenantes du GIE cité ci-dessus, et d'autre part provenir de prêts auprès d'instituts de financement, tels que la Banque Mondiale, la Banque Africaine de Développement et la Banque Islamique de Développement.

11. Conclusion

Après une première étude de faisabilité réalisée en 2010 qui a démontré l'intérêt technique et économique de valoriser le potentiel énergétique des plantes aquatiques invasives au Mali, REPIC a décidé de prolonger le financement pour réaliser l'étude d'avant-projet détaillé. L'objectif visé était de préparer un dossier « bancable » pour les institutions financières, telles que la Banque mondiale ou la Banque africaine de développement, afin de démontrer la crédibilité technique, financière, juridique, administrative et logistique du projet. Le présent rapport présente les résultats de la phase d'avant-projet détaillé et rassemble les éléments en vue de la recherche de fonds.

Au vu des résultats de l'analyse du potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau réalisé par un laboratoire européen indépendant (résultats divergeant des valeurs fournies pour le constructeur de l'usine de méthanisation PlanET), un projet d'usine de méthanisation d'environ 500 kW_{éi} utilisant la jacinthe d'eau comme substrat principal est difficilement rentable en se basant uniquement sur la vente d'électricité comme seule source de revenus. Toutefois, une telle installation pourrait devenir rentable avec un temps de retour inférieur à 10 ans si la récolte des jacinthes était majoritairement subventionnée par un autre moyen. Le fait de subventionner cette récolte a un sens, car le désengorgement du fleuve apporte de nombreux bénéfices (pêche, agriculture, barrages hydroélectriques, navigation). La monétisation de ces bénéfices sort du cadre de projet, mais devrait faire l'objet de recherches complémentaires.

Quelques incertitudes, tant au niveau de la production de biogaz, que d'autres considérations techniques, économiques et humaines, nous ont amenés à recommander l'implémentation d'une installation pilote de plus petite taille (75 kW_{éi}). Cette installation permettrait dans un premier temps de valider un certain nombre d'hypothèses, mais également à former du personnel local, à mesurer les obstacles à l'implémentation de cette technologie et à trouver des solutions pour les surmonter. Ce projet pilote sera également l'occasion de permettre à Bamako de devenir le centre de référence en Afrique de l'Ouest pour le combat contre la jacinthe d'eau. A ce titre, il sera important d'impliquer l'université de Bamako.

La prochaine étape est donc de fonder une association pour la réalisation du projet pilote et trouver des fonds pour le financer. Il faut également convaincre les autorités et acteurs locaux (gouvernement, EDM, université, etc.) de l'intérêt du projet et s'assurer de leur coopération et participation. Enfin, il faudrait trouver rapidement un terrain à Bamako proche du fleuve pour l'implantation de l'installation pilote, et obtenir les autorisations nécessaires. Selon les nombreux contacts que nous avons eus sur place, les indicateurs sont au vert pour obtenir ces appuis.

12. Bibliographie

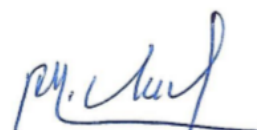
- [1] UICN, «100 of the World's Worst Invasive Alien Species,» 28 06 2019. [En ligne]. Available: http://www.iucngisd.org/gisd/100_worst.php.
- [2] GERACT-SARL, «Etude sur la lutte contre la jacinthe d'eau dans le fleuve Niger,» Bamako, 2014.
- [3] Planair, «Valorisation énergétique des plantes aquatiques prolifératrices au Mali,» 2010.
- [4] C. O'Sullivan, B. Rounsefell, A. Grinham, W. Clarke et J. Udy, «Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*),» *Ecological Engineering*, vol. 36, pp. 1459-1468, 2010.
- [5] O. Almoustapha, J. Millogo-Rasolodimby et S. Kenfack, «Production de biogaz et de compost à partir de la jacinthe d'eau pour un développement durable en Afrique sahélienne,» *VertigO – La revue en sciences de l'environnement*, vol. 8, 2008.
- [6] EREP / ACED, «Production de biogaz à partir de biodéchets des ménages et de jacinthes d'eau pour les usages domestiques des populations de la commune de Sô-Ava, au Bénin,» 2019.
- [7] The World Bank, «Clean and Improved Cooking in Sub-Saharan Africa,» 2014.



Jean-Loup Robineau
Planair
Collaborateur



Pierre Renaud
Planair
Chef de projet



Roger Michel
ERA International
Expert

PLANAIR SA; JRU/PRD/RML/gce; La Sagne, 30 janvier 2020

Annexes

Annexe 1 : Protocole de la collecte et de la préparation des échantillons de jacinthe d'eau

Annexe 2 : PV de la séance du 11 avril 2019 avec CDO Innov

Annexe 3 : Business plan de l'usine de méthanisation de 500 kW avec données de PlanET (cas 1)

Annexe 4 : Business plan de l'usine de méthanisation de 500 kW avec données d'Innolab (cas 2)

Annexe 5 : Business plan de l'usine de méthanisation de 500 kW avec données d'Innolab sans prise en compte de la récolte des jacinthes (cas 2 bis)

Annexe 6 : Business plan de l'installation pilote de 75 kW

Annexe 7 : Présentation de la technologie Valentin de PlanET

Annexe 8 : PV des séances effectuées lors de la visite au Mali en Septembre 2019

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Annexe 1 : Protocole de la collecte et de la préparation des échantillons de jacinthe d'eau

Ce présent document décrit le protocole à respecter pour la préparation des échantillons de Jacinthes d'eau en vue de la réalisation de tests de potentiel méthanogène par le laboratoire Innolab. Ce protocole synthétise les informations transmises par Innolab de manière éparse (fiche protocole, divers e-mails et conversations téléphoniques).

Phase 0 : Envoi du matériel de transport

- En vue du transport des échantillons, Innolab envoie à l'adresse indiquée les flacons d'échantillon et la boîte dans laquelle ils seront transportés. Ces flacons seront au nombre de 18 et correspondront à un volume d'environ 1 L.

Phase 1 : Récolte des Jacinthes d'eau

- Arracher une dizaine de plantes de Jacinthe d'eau du fleuve (ou autant que jugé nécessaire pour préparer les 18 échantillons). Il est important d'extraire toute la plante (y compris la racine).

Phase 2 : Préparation des échantillons

- Couper les Jacinthes d'eau récoltées en petits morceaux, par exemple à l'aide d'un sécateur. Il est important que toutes les parties de la plante soient bien découpées (tiges, feuilles, racines),
- Une fois que toutes les plantes ont été coupées en petits morceaux, les mettre dans un seau ou un bac et bien mélanger le tout. Il est très important que les différents morceaux (et donc les différentes parties de la plante) soient bien mélangés afin que le test soit le plus représentatif possible,
- Prélever des morceaux de la plante du seau pour remplir les 18 flacons un à un, de façon à ce que chaque flacon soit rempli à deux tiers (2/3),
- Etiqueter chaque flacon avec les informations suivantes : nom de l'exploitant (par exemple Roger Michel), type d'échantillon (Jacinthe d'eau), date, n° d'échantillon, lieu,
- Une fois préparés, les flacons contenant les échantillons doivent être stockés dans un réfrigérateur à 4°C pendant 1 à 2 heures, avant leur envoi.

Phase 3 : Envoi des échantillons

- Juste avant l'arrivée du transporteur, sortir les flacons du réfrigérateur et les mettre dans la boîte prévue à cet effet. Selon les informations d'Innolab, les 18 échantillons devraient rentrer dans une seule boîte,
- En amont, préparer plusieurs pains de glace (exemple sur photo ci-dessous) et les mettre dans la boîte. Ceux-ci permettront de garder la boîte à basse température pendant le transport.



- Prise en charge des échantillons par DHL à la date et l'heure indiquée.

Annexe 2 : PV de la séance du 11 avril 2019 avec CDO Innov

Date : 11.04.2019
Heure : 13:30 – 16:00
Lieu : CDO Innov, Z.A. de la Cailletelle, 44270 Machecoul, France
Présents : Jean-Loup Robineau (Planair)
Cyril Thabard (CDO Innov)
Distribution : Equipe projet

Déroulement

- Salle de réunion : présentation de l'entreprise / présentation du projet au Mali / questions et discussion,
- Visite de l'usine et des ateliers,
- Test du bateau sur étang.

Notes de séance

- La jacinthe d'eau, étant riche en carbone actif, permet de capter les polluants dans le fleuve et participe à la purification de l'eau. D'où l'intérêt de récolter les jacinthes sans les déraciner et en les laissant repousser afin d'extraire ces polluants du fleuve,
- Le taux de récolte de jacinthe d'eau est très difficile à estimer (dépend du site),
- Bateau permet une fourchée de 250-300 kg (quantité de plantes arrachées en un coup),
- Plantes arrachées par le bateau peuvent être déposées dans une barge ou sur la berge (2 options),
- Barge non motorisée peut-être poussée par bateau BPH. Barge peut être fournie par CDO Innov également. Prix barge : 50-60 k€. Il faudrait 2-3 barges pour assurer plus de productivité (une en charge, une en décharge, éventuellement une en transport) → permettrait de dépasser 5 t/h,
- 2 types de barges possibles : avec ou sans égouttage,
- Entretien tous les 700-800 h. 2500 €/entretien,
- Formation d'agents locaux par CDO Innov (1 jour pour l'entretien ; 1 jour pour la conduite). Compter 500 €/jour formation + transport/hébergement (au total coût formation < 5 k€, soit payée séparément, soit inclus dans offre bateaux). Possibilité de délivrer diplôme à la fin de la formation,
- Caractéristiques supplémentaires bateau :
 - 1 conducteur par bateau,
 - Réservoir : 100 L,
 - Plusieurs choix possibles pour l'installation du moteur. Conseillé pour l'Afrique : IVECO,
 - 2 modes de construction possible : acier ou aluminium (conseillé pour notre cas : acier, car plus robuste),

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

- 3 motorisations possibles pour le bateau BPH13 : 80, 130 et 180 CV. 130 CV conseillés pour notre cas. Moteur + puissant permet de réduire vitesse de rotation et donc consommation et bruit. Moteur de 180 CV utile uniquement si on a des outils qui consomment beaucoup,
- Bateaux sont très customisables : possibilité d'ajouter divers outils au bout pour s'adapter à divers travaux,
- Infrastructure au sol pour déchargement : 1 potence/grue fixe avec griffe et opérateur pour décharger de la barge sur la terre ferme. CDO Innov peut également fournir le matériel nécessaire pour le déchargement,
- CDO Innov peut faire un contrat de maintenance, et dans tous les cas a l'obligation de fournir les pièces de rechange pendant au moins 10 ans,
- Configuration conseillée pour notre cas (à approfondir lors d'une expertise sur place si le projet est retenu) :
 - 2 bateaux type BPH13 (dont 1 utilisé pour pousser les barges une partie du temps) en acier / moteur 130 CV,
 - 3 barges,
 - 1 grue/potence sur la berge pour le déchargement,
 - En option : 1 ponton pour le stationnement des bateaux,
- Prix total pour cette configuration : 400-450 k€,
- Pas de hachage sur le bateau (il faut arracher) les plantes jusqu'à la racine. Mais il serait possible de hacher si on veut fonctionner en mode récolte (par exemple sur une partie du fleuve au bord de la berge). Avantages : dépollution de l'eau et exploitation durable de l'usine de méthanisation,
- Profondeur minimale : 35 cm. Mais bateau peut résister à des passages avec moins d'eau, et peut arracher à distance grâce aux bras télescopiques,
- Petit entretien tous les 1 à 2 mois,
- Résistance au courant (du fleuve) : normalement il y a peu de courant s'il y a présence de jacinthe,
- CDO Innov peut également fabriquer un véhicule amphibien (AMP18 de 200 CV), mais ce n'est pas conseillé pour notre cas, car 2x plus cher (200-220 k€) et productivité / 2,
- 2 options pour le stationnement : berge ou ponton au milieu du fleuve (avec bateau gonflable pour y accéder par ex.). CDO Innov peut fournir ponton également (~25 k€),
- Délai de livraison : 6-7 mois (fabrication + livraison sur place)

Photos

Des photos et vidéos de la visite sont disponibles au lien suivant :

<S:\3. Mandats\13886\5. Photos\Visite CDO Innov 11-04-2019>

Actions

Une offre sommaire a été demandée à CDO Innov pour mettre dans rapport REPIC et dossier de recherche de fonds.

Valorisation du potentiel énergétique des plantes aquatiques prolifératrices nuisibles au Mali

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Annexe 3 : Business plan de l'usine de méthanisation de 500 kW avec données de PlanET (cas 1)

Année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Investissement	- 3 443 588 €	- €	- €	- €	- €	- €	- 220 000 €	- €	- €	- €	- €	- 515 000 €	- €	- €	- €	- €	- 220 000 €	- €	- €	- €	- €
Emprunt	2 754 870 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Revenus		596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €	596 240 €
Coûts personnel		- 89 616 €	- 93 200 €	- 96 929 €	- 100 806 €	- 104 838 €	- 109 031 €	- 113 393 €	- 117 928 €	- 122 645 €	- 127 551 €	- 132 653 €	- 137 959 €	- 143 478 €	- 149 217 €	- 155 186 €	- 161 393 €	- 167 849 €	- 174 563 €	- 181 545 €	- 188 807 €
Coûts carburant		- 36 406 €	- 37 863 €	- 39 377 €	- 40 952 €	- 42 590 €	- 44 294 €	- 46 066 €	- 47 908 €	- 49 825 €	- 51 818 €	- 53 890 €	- 56 046 €	- 58 288 €	- 60 619 €	- 63 044 €	- 65 566 €	- 68 188 €	- 70 916 €	- 73 753 €	- 76 703 €
Maintenance et autres frais		- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €	- 119 400 €
Provisions de charge		- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €	- 73 500 €
Dissolution de provision		- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Intérêts fonds étranger		- 55 097 €	- 52 830 €	- 50 517 €	- 48 158 €	- 45 751 €	- 43 297 €	- 40 793 €	- 38 239 €	- 35 634 €	- 32 978 €	- 30 268 €	- 27 503 €	- 24 684 €	- 21 808 €	- 18 874 €	- 15 882 €	- 12 830 €	- 9 717 €	- 6 542 €	- 3 304 €
Montant du prêt restant		2 754 870 €	2 641 489 €	2 525 840 €	2 407 878 €	2 287 556 €	2 164 829 €	2 039 646 €	1 911 961 €	1 781 721 €	1 648 877 €	1 513 375 €	1 375 164 €	1 234 188 €	1 090 393 €	943 722 €	794 118 €	641 522 €	485 873 €	327 112 €	165 175 €
Annuité de remboursement		- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €	- 168 479 €
Remboursement capital emprunt		- 113 381 €	- 115 649 €	- 117 962 €	- 120 321 €	- 122 728 €	- 125 182 €	- 127 686 €	- 130 240 €	- 132 844 €	- 135 501 €	- 138 211 €	- 140 976 €	- 143 795 €	- 146 671 €	- 149 604 €	- 152 596 €	- 155 648 €	- 158 761 €	- 161 937 €	- 165 175 €
Bilan avant impôt		222 221 €	219 448 €	216 518 €	213 425 €	210 161 €	206 719 €	203 089 €	199 265 €	195 236 €	190 994 €	216 029 €	211 332 €	206 391 €	201 196 €	195 736 €	233 999 €	227 973 €	221 644 €	215 000 €	208 027 €
Amortissement comptable		- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €	- 219 929 €
Revenu net imposable		2 291 €	482 €	3 411 €	6 504 €	9 768 €	13 211 €	16 840 €	20 665 €	24 693 €	28 935 €	3 900 €	8 598 €	13 538 €	18 733 €	24 193 €	14 070 €	8 043 €	1 715 €	4 929 €	11 902 €
Impôt		802 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	4 924 €	2 815 €	600 €	- €	- €
Flux de trésorerie	- 688 718 €	108 037 €	103 799 €	98 556 €	93 104 €	87 433 €	81 536 €	75 403 €	69 025 €	62 392 €	55 493 €	77 818 €	70 356 €	62 596 €	54 525 €	46 132 €	76 478 €	69 509 €	62 283 €	53 064 €	42 852 €
Facteur d'actualisation	100%	99%	98%	97%	96%	95%	94%	93%	92%	91%	91%	90%	89%	88%	87%	86%	85%	84%	84%	83%	82%
Valeur actualisée	- 688 718 €	106 968 €	101 753 €	95 657 €	89 471 €	83 190 €	76 811 €	70 330 €	63 743 €	57 047 €	50 237 €	69 750 €	62 438 €	55 001 €	47 435 €	39 736 €	65 222 €	58 692 €	52 069 €	43 923 €	35 119 €
VAN	- 688 718 €	581 750 €	479 996 €	384 339 €	294 868 €	211 678 €	134 867 €	64 537 €	794 €	56 253 €	106 490 €	176 240 €	238 678 €	293 679 €	341 114 €	380 850 €	446 072 €	504 764 €	556 833 €	600 757 €	635 876 €

Annexe 4 : Business plan de l'usine de méthanisation de 500 kW avec données d'Innolab (cas 2)

Année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Investissement	- 3 935 230 €	- €	- €	- €	- €	- €	- 660 000 €	- €	- €	- €	- €	- 1 105 000 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Emprunt	3 148 184 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Revenus		453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €
Coûts personnel		- 144 494 €	- 150 274 €	- 156 285 €	- 162 536 €	- 169 037 €	- 175 799 €	- 182 831 €	- 190 144 €	- 197 750 €	- 205 660 €	- 213 886 €	- 222 442 €	- 231 339 €	- 240 593 €	- 250 217 €	- 260 225 €	- 270 634 €	- 281 460 €	- 292 718 €	- 304 427 €
Coûts carburant		- 47 140 €	- 49 026 €	- 50 987 €	- 53 026 €	- 55 147 €	- 57 353 €	- 59 647 €	- 62 033 €	- 64 514 €	- 67 095 €	- 69 779 €	- 72 570 €	- 75 473 €	- 78 492 €	- 81 631 €	- 84 896 €	- 88 292 €	- 91 824 €	- 95 497 €	- 99 317 €
Maintenance et autres frais		- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €	- 136 761 €
Provisions de charge		- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €	- 176 500 €
Dissolution de provision		- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Intérêts fonds étranger		- 62 964 €	- 60 372 €	- 57 729 €	- 55 033 €	- 52 283 €	- 49 478 €	- 46 617 €	- 43 699 €	- 40 722 €	- 37 686 €	- 34 589 €	- 31 430 €	- 28 208 €	- 24 921 €	- 21 569 €	- 18 150 €	- 14 662 €	- 11 105 €	- 7 476 €	- 3 775 €
Montant du prêt restant		3 148 184 €	3 018 615 €	2 886 454 €	2 751 651 €	2 614 151 €	2 473 902 €	2 330 847 €	2 184 932 €	2 036 098 €	1 884 287 €	1 729 440 €	1 571 496 €	1 410 394 €	1 246 069 €	1 078 458 €	907 495 €	733 112 €	555 241 €	373 814 €	188 757 €
Annuité de remboursement		- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €	- 192 533 €
Remboursement capital emprunt		- 129 569 €	- 132 160 €	- 134 803 €	- 137 500 €	- 140 250 €	- 143 055 €	- 145 916 €	- 148 834 €	- 151 811 €	- 154 847 €	- 157 944 €	- 161 103 €	- 164 325 €	- 167 611 €	- 170 963 €	- 174 383 €	- 177 870 €	- 181 428 €	- 185 056 €	- 188 757 €
Bilan avant impôt		114 492 €	119 566 €	124 895 €	130 490 €	136 362 €	142 525 €	148 990 €	155 770 €	162 881 €	170 335 €	178 143 €	186 308 €	194 837 €	203 728 €	212 981 €	222 596 €	232 573 €	242 912 €	253 614 €	264 680 €
Amortissement comptable		- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €	- 318 011 €
Revenu net imposable		432 504 €	437 578 €	442 906 €	448 501 €	454 374 €	460 536 €	467 001 €	473 782 €	480 892 €	488 347 €	451 600 €	459 848 €	468 426 €	477 412 €	486 823 €	364 678 €	374 995 €	385 795 €	397 098 €	408 925 €
Impôt		- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Flux de trésorerie	- 787 046 €	244 061 €	251 726 €	259 698 €	267 989 €	276 612 €	285 579 €	294 905 €	304 604 €	314 691 €	325 182 €	291 592 €	302 939 €	314 739 €	327 012 €	339 775 €	221 049 €	234 854 €	249 211 €	264 142 €	279 671 €
Facteur d'actualisation	100%	99%	98%	97%	96%	95%	94%	93%	92%	91%	91%	90%	89%	88%	87%	86%	85%	84%	84%	83%	82%
Valeur actualisée	- 787 046 €	241 645 €	246 766 €	252 061 €	257 532 €	263 187 €	269 029 €	275 063 €	281 297 €	287 735 €	294 383 €	261 361 €	268 843 €	276 550 €	284 488 €	292 665 €	188 515 €	198 305 €	208 345 €	218 641 €	229 203 €
VAN	- 787 046 €	1 028 691 €	1 275 457 €	1 527 518 €	1 785 050 €	2 048 237 €	2 317 265 €	2 592 329 €	2 873 626 €	3 161 361 €	3 455 744 €	3 717 105 €	3 985 948 €	4 262 497 €	4 546 986 €	4 839 651 €	5 028 166 €	5 226 471 €	5 434 816 €	5 653 457 €	5 882 660 €

Valorisation du potentiel énergétique des plantes aquatiques prolifératrices nuisibles au Mali

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Annexe 5 : Business plan de l'usine de méthanisation de 500 kW avec données d'Innolab sans prise en compte de la récolte des jacinthes (cas 2 bis)

Année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Investissement	2 730 230 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	120 000 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Emprunt	2 184 184 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Revenus		453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €	453 366 €
Coûts personnel		54 860 €	57 054 €	59 336 €	61 710 €	64 178 €	66 745 €	69 415 €	72 192 €	75 079 €	78 083 €	81 206 €	84 454 €	87 832 €	91 346 €	94 999 €	98 799 €	102 751 €	106 861 €	111 136 €	115 581 €	
Coûts carburant		20 497 €	21 317 €	22 170 €	23 057 €	23 979 €	24 938 €	25 936 €	26 973 €	28 052 €	29 174 €	30 341 €	31 555 €	32 817 €	34 130 €	35 495 €	36 915 €	38 391 €	39 927 €	41 524 €	43 185 €	
Maintenance et autres frais		106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €	106 761 €
Provisions de charge		12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	12 000 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Dissolution de provision		- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	120 000 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Intérêts fonds étranger		43 684 €	41 886 €	40 052 €	38 181 €	36 274 €	34 327 €	32 342 €	30 318 €	28 253 €	26 146 €	23 997 €	21 806 €	19 570 €	17 290 €	14 965 €	12 592 €	10 173 €	7 704 €	5 187 €	2 619 €	
Montant du prêt restant		2 184 184 €	2 094 290 €	2 002 598 €	1 909 073 €	1 813 677 €	1 716 373 €	1 617 122 €	1 515 887 €	1 412 628 €	1 307 303 €	1 199 871 €	1 090 291 €	978 520 €	864 512 €	748 225 €	629 612 €	508 627 €	385 222 €	259 349 €	130 958 €	
Annuité de remboursement		133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €	133 578 €
Remboursement capital emprunt		89 894 €	91 692 €	93 526 €	95 396 €	97 304 €	99 250 €	101 235 €	103 260 €	105 325 €	107 431 €	109 580 €	111 772 €	114 007 €	116 287 €	118 613 €	120 985 €	123 405 €	125 873 €	128 391 €	130 958 €	
Bilan avant impôt		215 565 €	214 348 €	213 047 €	211 657 €	210 175 €	208 594 €	206 912 €	205 123 €	203 221 €	201 203 €	211 061 €	208 791 €	206 386 €	203 840 €	201 147 €	198 299 €	195 290 €	192 113 €	188 759 €	185 220 €	
Amortissement comptable		142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €	142 511 €
Revenu net imposable		73 053 €	71 837 €	70 536 €	69 146 €	67 663 €	66 083 €	64 401 €	62 611 €	60 710 €	58 691 €	68 550 €	66 279 €	63 874 €	61 329 €	58 635 €	55 788 €	52 779 €	49 601 €	46 247 €	42 709 €	
Impôt		25 569 €	25 143 €	24 687 €	24 201 €	23 682 €	23 129 €	22 540 €	21 914 €	21 248 €	20 542 €	23 992 €	23 198 €	22 356 €	21 465 €	20 522 €	19 526 €	18 473 €	17 360 €	16 187 €	14 948 €	
Flux de trésorerie		546 046 €	100 102 €	97 514 €	94 834 €	92 060 €	89 189 €	86 215 €	83 137 €	79 949 €	76 648 €	73 229 €	77 489 €	73 821 €	70 023 €	66 088 €	62 011 €	57 788 €	53 413 €	48 879 €	44 182 €	39 314 €
Facteur d'actualisation	100%	99%	98%	97%	96%	95%	94%	93%	92%	91%	91%	90%	89%	88%	87%	86%	85%	84%	84%	83%	82%	
Valeur actualisée	546 046 €	99 111 €	95 592 €	92 045 €	88 468 €	84 860 €	81 219 €	77 543 €	73 832 €	70 082 €	66 294 €	69 455 €	65 513 €	61 526 €	57 494 €	53 413 €	49 283 €	45 101 €	40 864 €	36 571 €	32 219 €	
VAN	546 046 €	446 935 €	351 343 €	259 298 €	170 829 €	85 970 €	4 751 €	72 792 €	146 624 €	216 706 €	283 000 €	352 455 €	417 967 €	479 494 €	536 988 €	590 401 €	639 684 €	684 785 €	725 649 €	762 220 €	794 439 €	

Annexe 6 : Business plan de l'installation pilote de 75 kW

Année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Investissement	1 031 907 €	- €	- €	- €	- €	- €	110 000 €	- €	- €	- €	- €	- €	245 000 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Emprunt	825 526 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Revenus		85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €	85 015 €
Coûts personnel		62 177 €	64 664 €	67 250 €	69 940 €	72 738 €	75 648 €	78 674 €	81 820 €	85 093 €	88 497 €	92 037 €	95 718 €	99 547 €	103 529 €	107 670 €	111 977 €	116 456 €	121 114 €	125 959 €	130 997 €	
Coûts carburant		27 603 €	28 707 €	29 855 €	31 050 €	32 292 €	33 583 €	34 927 €	36 324 €	37 777 €	39 288 €	40 859 €	42 494 €	44 193 €	45 961 €	47 800 €	49 712 €	51 700 €	53 768 €	55 919 €	58 155 €	
Maintenance et autres frais		38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €	38 597 €
Provisions de charge		35 500 €	35 500 €	35 500 €	35 500 €	35 500 €	35 500 €	35 500 €	35 500 €	35 500 €	35 500 €	22 000 €	22 000 €	22 000 €	22 000 €	22 000 €	22 000 €	- €	- €	- €	- €	- €
Dissolution de provision		- €	- €	- €	- €	- €	110 000 €	- €	- €	- €	- €	245 000 €	- €	- €	- €	- €	- €	110 000 €	- €	- €	- €	- €
Intérêts fonds étranger		826 €	785 €	744 €	703 €	662 €	621 €	580 €	538 €	497 €	456 €	415 €	374 €	332 €	291 €	249 €	208 €	166 €	125 €	83 €	42 €	
Montant du prêt restant		825 526 €	784 640 €	743 714 €	702 746 €	661 738 €	620 689 €	579 598 €	538 467 €	497 294 €	456 081 €	414 826 €	373 529 €	332 192 €	290 813 €	249 393 €	207 931 €	166 428 €	124 883 €	83 297 €	41 669 €	
Annuité de remboursement		41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €	41 711 €
Remboursement capital emprunt		40 886 €	40 926 €	40 967 €	41 008 €	41 049 €	41 090 €	41 131 €	41 173 €	41 214 €	41 255 €	41 296 €	41 338 €	41 379 €	41 420 €	41 462 €	41 503 €	41 545 €	41 586 €	41 628 €	41 669 €	
Bilan avant impôt		79 687 €	83 237 €	86 931 €	90 774 €	94 773 €	98 933 €	103 261 €	107 764 €	112 449 €	117 322 €	108 892 €	114 167 €	119 654 €	125 362 €	131 300 €	115 478 €	121 904 €	128 588 €	135 542 €	142 776 €	
Amortissement comptable		74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €	74 845 €
Revenu net imposable		154 532 €	158 082 €	161 776 €	165 620 €	169 618 €	173 778 €	178 106 €	182 609 €	187 294 €	192 168 €	183 738 €	189 012 €	194 499 €	200 208 €	206 146 €	190 323 €	196 749 €	203 434 €	210 388 €	217 621 €	
Impôt		- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Flux de trésorerie		206 381 €	120 572 €	124 163 €	127 898 €	131 783 €	135 822 €	140 023 €	144 393 €	148 937 €	153 662 €	158 577 €	163 689 €	168 998 €	174 503 €	179 206 €	184 008 €	188 909 €	193 909 €	198 998 €	204 176 €	209 443 €
Facteur d'actualisation	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Valeur actualisée	206 381 €	120 572 €	124 163 €	127 898 €	131 783 €	135 822 €	140 023 €	144 393 €	148 937 €	153 662 €	158 577 €	163 689 €	168 998 €	174 503 €	179 206 €	184 008 €	188 909 €	193 909 €	198 998 €	204 176 €	209 443 €	214 806 €
VAN	206 381 €	326 954 €	451 117 €	579 015 €	710 798 €	846 620 €	986 643 €	1 131 036 €	1 279 973 €	1 433 635 €	1 592 212 €	1 745 401 €	1 897 905 €	2 058 938 €	2 225 720 €	2 398 482 €	2 555 463 €	2 718 912 €	2 889 086 €	3 066 256 €	3 250 701 €	

Annexe 7 : Présentation de la technologie Valentin de PlanET



VALENTIN – Quality, automated and profitable

The VALENTIN biogas plant offers the newest digester size in the PlanET fleet. Its small, modular design is specifically targeted toward farms that have not been able to implement larger digester projects. Like all other PlanET digesters, the VALENTIN benefits from our 20 years of experience designing and building best-in-class digesters. This plant uses the same, trusted components used in the 1,000+ digesters PlanET has built, however this design allows for quick and easy construction on site. The organic materials fed into the digester are converted into high quality biogas which can be used to run a combined heat and power unit (CHP) to produce electricity and heat or strictly as a boiler fuel substitute for heat generation.

The benefits enjoyed by owners of VALENTIN include:

- Power sales to diversify farm revenues
- Reduction or possible elimination of electricity costs
- Elimination of all or a portion of bedding costs in the future
- Energy independence
- Weed seed destruction
- Reduction of odors from manure
- Useful heat may be produced for buildings near the digester

Your tailored independent energy solution

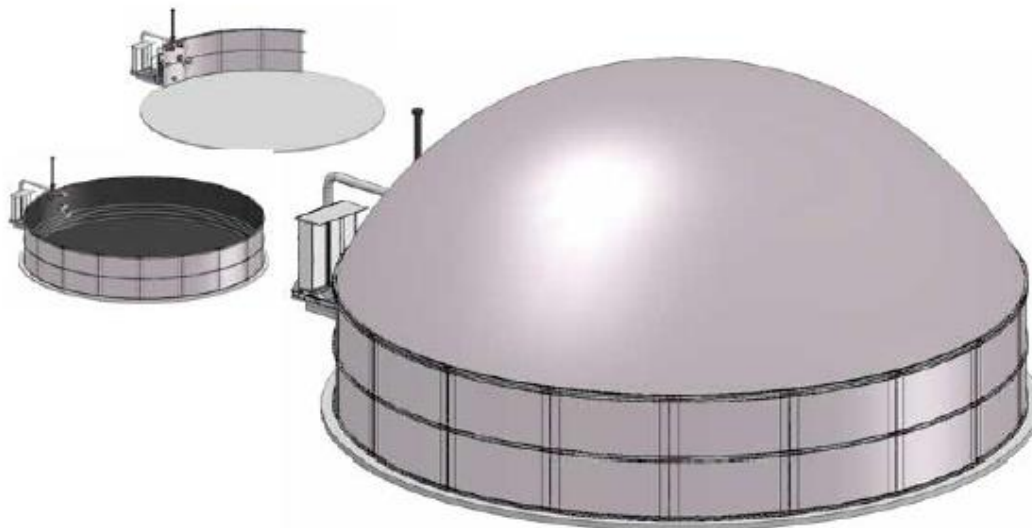
Base load renewable power
not possible with wind and solar energy plants

Large gas storage
for ease of use

Island mode operation
allowing independence from the grid

40 to 150 kWel
depending on the volume of substrate used!

Complete disassembly
possible with approx. 90 % residual recyclability



Additional benefits

**Land application
nutrient improvement**
through better plant availability

Weedseed destruction
via Anaerobic Digestion



**Participation
in Greenhouse Gas Reductions**
through methane capture and destruction



Components & Layout

The VALENTIN biogas plant was specially designed as a small-scale plant, which can be operated in remote areas to produce electricity and/or heat, even if the farm is grid constrained or even if no power grid is available. It is highly standardized and engineered for easy integration into an existing farm and it can be assembled and commissioned without advanced tools or digester construction knowledge.

Technical module, before and after installation At most potential locations, especially on farms, there is already existing infrastructure for manure management on site. Instead of pumping the manure straight from the barn into a lagoon or storage tank, the customer just integrates an additional step to produce their own electricity.

A technical module containing all moving parts

Preassembled for easy transport and installation





Your low risk business opportunity

Low maintenance costs and long service life

20 year service life due to robust stainless steel and other durable, proven components

Business growth

without additional space

System cost

under 1 Mio. Dollar

Augmenting existing farming businesses

of manure management/manure logistics

Low operational effort

Minimal daily workload

to check the system

Automated operation

without additional manpower

Extremely quick assembly of our VALENTIN



Day 1: Prefabricated slab by the client



12:00 pm: Position of the technical module and first wall panels



8:00 pm: Wall panels are assembled



Day 3: Inner lining of the digester



Day 4: Digester walls assembled



Day 10: Installation and commissioning of the membrane roof with gas storage. Gas and minor supply lines connected.

6



Biogas experts for over 20 years

PlanET Biogas has been a pioneer in the field of anaerobic digestion for over 20 years. As creator of best in class biogas plants, we understand the optimal interaction of individual components to achieve economic success. Our extensive competence in planning, engineering, permitting, plant construction, commissioning, technical and biological service sets PlanET apart as an integrated biogas technology provider. With over 450 plants installed around the globe, PlanET is the experienced choice for your biogas development.

- **Agricultural and industrial customers**
- **Highest quality** in construction and documentation
- **Numerous utility model-protected technical solutions**
- **Biological support** helping to provide best in class biogas production
- **Continuous further development of our technical solutions** in our own research and development department

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

Annexe 8 : PV des séances effectuées lors de la visite au Mali en Septembre 2019

PV de la séance avec le service de la présidence

Date : 24.09.2019
Heure : 11h00
Lieu : Bamako, « colline du pouvoir »
Présents : MM Tibadian R. Badian Kouyate, conseiller direct du président ;
Roger Michel, M. Kassambara ; Pierre Renaud ; Mme Marielle Renaud
Distribution : Interne Planair

Discussion générale

M. Kouyate amène les éléments suivants :

- Les jacinthes d'eau sont un problème important traité à l'échelle nationale, voire sur toute l'Afrique de l'Ouest,
- Il est important de discuter avec M. Berthet, directeur général de l'Agence nationale des énergies renouvelables (AER),
- Un partenaire précieux est la banque allemande GTZ qui finance des projets liés au développement durable et au développement du pays,
- L'Office du Niger est le meilleur partenaire pour traiter ce dossier puisqu'il s'occupe de la problématique globale du Niger ; il est situé à Ségou (230 km de Bamako). Le Directeur général, M. Koulibali, est en place jusqu'au 31.12.2019,
- Nous pouvons bénéficier de son plein soutien (M. Tibadian) pour la suite du dossier.

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

PV de la discussion avec énergie du Mali (EDM)

Date : 25.09.2019

Heure : 11h00

Lieu : Bamako

Présents : MM Boubacar Keita, Directeur général de EDM ; Roger Michel, M. Kassambara ; Pierre Renaud ; Mme Marielle Renaud

Distribution : Interne Planair

Discussion générale

M. Boubacar Keita, Directeur général de l'Energie du Mali (nommé DG depuis le 01.01.19 et dans la direction de l'entreprise depuis plus de 15 ans) rapporte les éléments suivants :

- Les jacinthes d'eau en particulier et les plantes aquatiques envahissantes en général présentent un danger particulier pour le fleuve Niger. Elles empêchent notamment la bonne exploitation des usines hydro-électriques au fil de l'eau,
- Un endroit peut être trouvé à Bamako pour implanter une usine pilote de 75 kW él (p. ex. à Monday),
- Nous devons discuter avec M. Dissa Traore (idrissaatraore@gmail.com), de l'agence du besoin du fleuve Niger,
- La reproductivité de la plante est très forte,
- Un projet utilisant les jacinthes d'eau pour en faire des biocarburants a été initié. Ce fut un échec. Voir avec l'ANEB (biocarburants et bioénergie ; M. Modoni Diallo, DG,
- L'Office du Niger à Ségou est le partenaire le plus important pour le projet,
- M. Matian Domely, professeur à l'université technique de Bamako, s'occupe de biogaz produit au moyen de bouses de vaches,
- Une installation de 20 MW solaire est en planification,
- Une installation de 50 MW solaire mise en place par Akuo solaire va être prochainement mise en service,
- Le charbon de bois largement utilisé à Bamako est un vrai problème puisqu'il est à l'origine de déforestation.

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

PV séance ministère de l'agriculture

Date : 26.09.2019
Heure : 14h00
Lieu : Bamako
Présents : MM Tamboura, directeur général de service de l'agriculture ; Amadou Koni ; Roger Michel, M. Kassambara ; Pierre Renaud ; Mme Marielle Renaud
Distribution : Interne Planair

Eléments principaux exprimés par M. Tambura

- Un entretien avec M. Diallo, DG de l'ANADEB (agence nationale de développement des biocarburants) sera important,
- La menace pour les canaux d'irrigation est à prendre au sérieux,
- La présence massive des jacinthes d'eau a également pour conséquence une évaporation accélérée et entraîne des pertes d'eau massives,
- La fumace organique fournie par les digestats est importante pour l'agriculture,
- La compagnie malienne de navigation dont le siège est à Koulikoro doit être intéressée par ce projet,
- L'office du Niger est déterminant : tout y est rattaché (entre autres, secrétariat du ministère de l'agriculture) ; une séance à cet office permettrait de rencontrer divers directeurs d'office,
- L'office du Niger bénéficie de budgets pour l'élimination de jacinthes d'eau,
- Le projet « jacinthes d'eau » est une excellente opportunité pour développer le biogaz au Mali et en faire un centre de compétence,
- Les déchets de mangues pourraient être un sous-produit pour alimenter l'installation de biogaz,
- L'ABFN (l'Agence du Bassin du Fleuve Niger) est un partenaire de discussion important,
- M. Tamboura souhaite digitaliser les données liées à l'agriculture ; la DDC dispose-t-elle de budgets pour l'aider dans cette mission ?

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

PV séance ANADEB (Agence nationale de développement des biocarburants)

Date : 27.09.2019

Heure : 10h30

Lieu : Bamako

Présents : MM Madani Mamadou Diallo, directeur général de l'ANADEB (National Agency for the development of biofuels) madanimamadoudiallo@yahoo.fr ; Roger Michel, M. Kassambara ; Pierre Renaud ; Mme Marielle Renaud

Distribution : Interne Planair

Discussion

M. Diallo exprime les éléments suivants

- Actuellement, des projets existent pour produire des biocarburants à l'aide d'huile, d'alcool et de gaz,
- Une réalisation importante pour la production de biocarburants a été faite par des Hollandais à Koulikoro, sans malheureusement jamais fonctionner. Elle devait être alimentée par de la jatropha ; des problèmes de logistique ont empêché son exploitation,
- La bioénergie est un sujet important. Il s'agit d'une part de la valorisation énergétique des déchets et d'autre part la production d'engrais,
- La production d'engrais par les déchets doit être homologuée officiellement,
- Les biodéchets principalement utilisés sont :
 - Les tiges de coton,
 - Les balles de riz,
 - L'huile usagée,
 - Synergie de différents organismes,
- Une bonne synergie avec l'ABFN (Agence du Bassin du Fleuve Niger) est fondamentale,
- Il est important de mettre des priorités (voir mail envoyé à Daniel Schaller),
- Une organisation est mise en place pour trier les déchets à la source,
- Beaucoup de compétences sont sollicitées pour un tel projet. Il s'agit d'un projet inclusif. Il faut éviter les chevauchements,
- Des étapes préalables sont importantes : notamment avec les agences de développement et EDM,
- Le ministère de l'agriculture maîtrise mal ce dossier,
- Une mise en contact avec 5 offices sera nécessaire, dont notamment le CREE (Comité de régulation de l'eau et de l'électricité),
- EDM ne dispose pas de savoir-faire en matière de biogaz,
- Le sujet des jacinthes d'eau est totalement de la compétence de l'ANADEB ; M. Diallo doit être le lien pour mener à bien un tel projet,
- La notion d'écosystème est fondamentale,

Rapport d'étude d'avant-projet détaillé

- Pour le projet, M. Diallo propose les éléments suivants :
 - Implanter l'installation à proximité d'une industrie,
 - La mettre en valeur avec le biogaz,
 - Travailler en étroite collaboration avec l'ABFN (ils ont pour mission de débarrasser le fleuve des jacinthes d'eau),
 - Faire transiter tout le projet par l'ANADEB pour travailler avec les autres offices,
 - Avoir déjà des discussions avec la BAD,
- Structure juridique :
 - Si ce projet prend la forme d'un centre de recherche : mettre en place un comité de compétence,
 - L'organisation doit être autonome et gérée par l'ANADEB,
 - Une formule PPP peut être intéressante,
 - La nature du financement est importante,
- Attention aux conflits d'usage : la matière première ne peut s'utiliser qu'une seule fois,
- Travailler de manière modulable,
- Actuellement, EDM est contrôlée à 100 % par l'Etat.