

Caractéristiques Socio-Economique Et Energétique : Outils De Décision Pour L'électrification Par Centrale Solaire Autonome : Cas Des Communes Rurales De Mahavelona- Région Itasy Et De Mahasolo- Région Bongolava

[Socio-Economic And Energy Characteristics: Decision-Making Tools For Electrification By Autonomous Solar Power Plant: The Case Of The Rural Communes Of Mahavelona-Itasy Region And Mahasolo- Bongolava Region]

¹ IBRAHIM MAHAFANTATSE Innocenti Favick; ² RAJOMALAHY Aimée Julien; ³
RAVONINJATOVO Achille; ⁴ ANDRIANAIVO Lala

¹. EDSTII, E-mail: favickibrahim@gmail.com

². EDSTII, E-mail: julienrajomalahy@gmail.com

³. EDSTII, E-mail: achillegc@yahoo.fr

⁴. ESPA, E-mail: andrianaivo.andri@gmail.com

Auteur correspondant : IBRAHIM MAHAFANTATSE Innocenti Favick



Résumé : L'électrification des zones rurales reste un défi structurel majeur pour les pays en développement, en particulier à Madagascar où plus de 75 % de la population n'a pas accès à l'électricité. Ce manque d'infrastructure énergétique freine le développement économique local, limite l'accès à l'éducation, et accroît la vulnérabilité des populations face aux impacts du changement climatique. Dans ce contexte, la présente étude propose une approche intégrée combinant l'analyse des caractéristiques socio-économiques et énergétiques des ménages et petites entreprises locales comme outils d'aide à la décision pour l'implantation de centrales solaires autonomes. L'enquête de terrain menée dans les communes rurales de Mahavelona (région Itasy) et Mahasolo (région Bongolava) a permis de caractériser 775 ménages, institutions publiques et unités économiques selon leur profil de consommation énergétique, leur capacité de paiement et leurs usages quotidiens. Ces données ont été utilisées pour modéliser la demande locale, établir des scénarios technico-économiques d'électrification, et estimer les émissions de CO₂ évitées en substituant les combustibles fossiles par une production photovoltaïque. Les résultats mettent en évidence des typologies d'usagers différenciées et un potentiel significatif de réduction d'émissions, renforçant la pertinence de ces projets dans le cadre du marché carbone volontaire.

Mot Clés : Rural Electrification, Solar Mini-grid, Socio-Economic Profiling, Carbon Emission Reduction, Energy Access, Madagascar, Climate Adaptation

Abstract: Electrification of rural areas remains a major structural challenge for developing countries, particularly in Madagascar where over 75% of the population has no access to electricity. This lack of energy infrastructure hampers local economic development, limits access to education, and increases the vulnerability of populations to the impacts of climate change. Against this backdrop, the

present study proposes an integrated approach combining analysis of the socio-economic and energy characteristics of local households and small businesses as a decision-making tool for the implementation of stand-alone solar power plants. The field survey carried out in the rural communes of Mahavelona (Itasy region) and Mahasolo (Bongolava region) enabled us to characterize 775 households, public institutions and economic units according to their energy consumption profile, ability to pay and daily uses. These data were used to model local demand, establish technico-economic scenarios for electrification, and estimate the CO₂ emissions avoided by substituting fossil fuels with photovoltaic generation. The results highlight differentiated user typologies and significant emission reduction potential, reinforcing the relevance of these projects within the framework of the voluntary carbon market.

Keywords: Rural Electrification, Solar Mini-grid, Socio-Economic Profiling, Carbon Emission Reduction, Energy Access, Madagascar, Climate Adaptation

1. Introduction

Le développement de systèmes énergétiques durables dans les zones rurales constitue aujourd'hui une priorité pour les politiques nationale et internationale de lutte contre la pauvreté et de transition écologique. Madagascar, en particulier, affiche un taux d'électrification rurale inférieur à 10 %, malgré un fort potentiel solaire. Cette situation entraîne une dépendance chronique aux sources d'énergie traditionnelles (bois, charbon, pétrole lampant), avec des conséquences directes sur la santé, l'environnement et le développement socio-économique des communautés.

Les centrales solaires autonomes, ou mini-réseaux photovoltaïques, représentent une solution technologique viable pour répondre aux besoins énergétiques des villages enclavés. Toutefois, leur implantation efficace nécessite une planification fine, tenant compte des profils de consommation locaux, des capacités de paiement, et de la dynamique économique des territoires concernés. Par ailleurs, dans un contexte de changement climatique global, ces projets peuvent aussi s'inscrire dans des mécanismes de compensation carbone, à condition de pouvoir quantifier de manière rigoureuse les émissions évitées.

Cette recherche s'inscrit dans cette double perspective énergétique et climatique. Elle s'appuie sur des enquêtes de terrain menées dans deux communes rurales représentatives de la diversité malgache : Mahavelona, dans la région Itasy, et Mahasolo, dans la région Bongolava. En combinant données socio-économiques et énergétiques, l'étude vise à construire un modèle décisionnel permettant de guider la conception technique et économique de projets d'électrification solaire rurale, avec une attention particulière portée à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

L'électrification rurale décentralisée a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années, notamment en Afrique subsaharienne, où les défis d'accès à l'énergie sont particulièrement aigus. Plusieurs études ont montré que les mini-réseaux solaires peuvent offrir une solution économiquement viable et socialement pertinente, à condition que le dimensionnement soit adapté aux réalités locales [1]-[3]. L'approche basée sur la segmentation des usagers, souvent négligée dans les projets conventionnels, apparaît comme un levier central pour assurer la pérennité technique et financière des infrastructures [4].

Par ailleurs, la question de l'intégration des projets d'électrification au marché du carbone est de plus en plus discutée. Les travaux de Renaud et al. (2020) ont notamment montré que les projets d'énergies renouvelables en milieu rural peuvent générer des crédits carbone dans le cadre des mécanismes volontaires, à condition de disposer de données fiables sur les usages antérieurs et les émissions évitées [5]. En parallèle, l'évaluation des co-bénéfices (santé, emploi, éducation) est désormais intégrée dans les modèles multicritères de sélection de projets, comme le propose l'approche du "Climate Co-benefits Framework" utilisée par certaines agences multilatérales [6].

Cependant, peu de travaux combinent à la fois l'analyse fine des profils socio-économiques, la modélisation énergétique locale, et la perspective carbone. C'est précisément ce que propose notre étude, en apportant une contribution méthodologique et empirique originale centrée sur deux territoires spécifiques à Madagascar.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Zone d'études

La zone d'étude touchée par ce travail de recherche est la Commune Rurale de Mahavelona, dans la région Itasy, et la Commune Rurale de Mahasolo, dans la région Bongolava.

2.1.1. Commune Rurale Mahavelona

Sur le plan administratif, la Commune Rurale de Mahavelona se trouve dans le District de Soavinandriana, Région Itasy de la Province d'Antananarivo à Madagascar. La commune se répartit sur 10 fokontany.

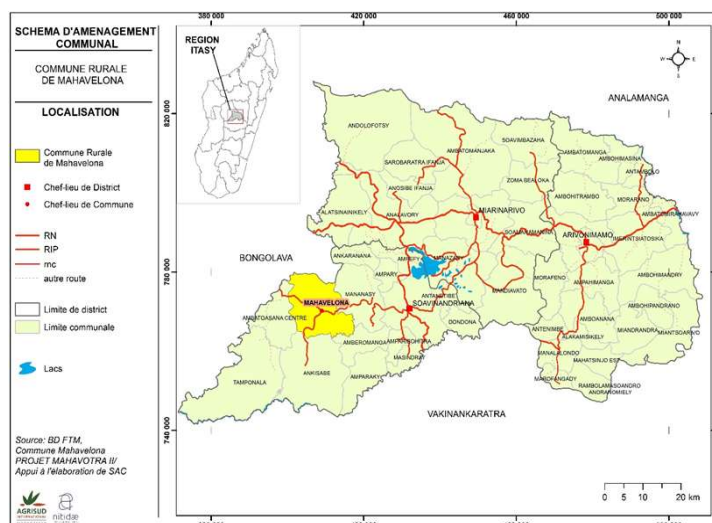


Figure 1 : Position Géographique de la Commune de Mahavelona [Source 3.2: PCD 2020 Mahavelona]

Le fokontany choisi pour notre étude et le Fokontany Akonambohimenabe le chef-lieu de la CR de Mahavelona notamment les 3 zones de ce quartier : Ambanilalana, Tanambao, Avaradalana, incluant les ménages et institutions publiques souhaitant être raccordés au mini-réseau.



Figure 2: Plan de la Zone à raccorder [source 3.3 : Google Earth]

La population de Mahavelona à un taux de croissance de 2.5% par an. Actuellement, elle compte 26111 avec une répartition moyenne de 124,34 hab/Km². 31.29% de la population est localisé dans le chef- lieu de la commune de Mahavelona sis à Akonambohimenabe soit environ 8170 habitants. Selon les statistiques, la population du fokotany Akonambohimenabe est une population jeune avec 86% de la population âgée de moins de 45 ans (Source 3.4: RGPH 3.pdf)

Tableau 1: Répartition par âge et par sexe pour Akonambohimena [source 3.2: PCD 2020 Mahavelona]

ÂGE	0 - 5	6 - 9	10 - 14	15 - 19	20 - 24	25 - 29	30 - 35	36 - 39	40 - 44	45 - 49	50 - 54	55- 60+
Garçon	810	770	401	380	180	184	192	195	173	202	214	130
Fille	652	647	811	384	290	223	202	228	204	243	228	228

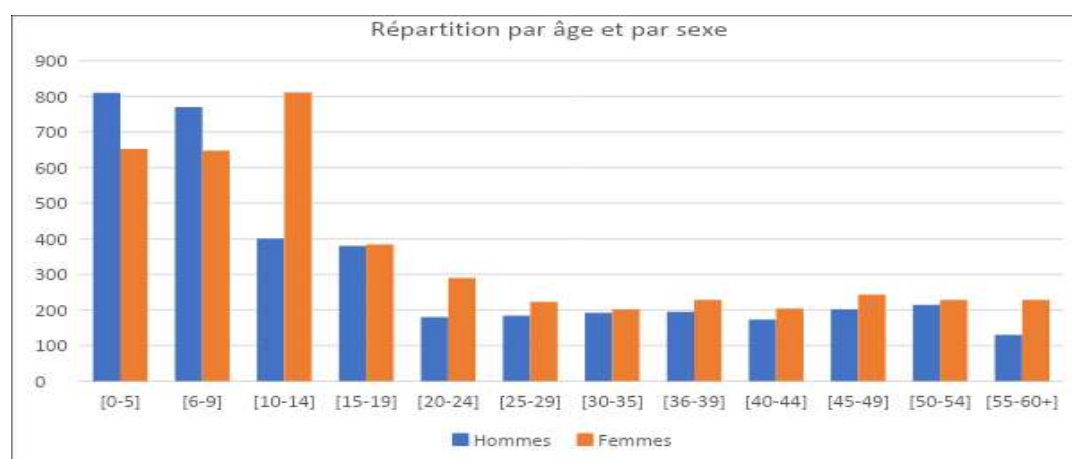


Figure 3: Diagramme de répartition par âge et par sexe Akonambohimenabe [source 3.2 : PCD 2020 Mahavelona]

La commune de Mahavelona, présente un profil rural caractérisé par une économie locale principalement basée sur l'agriculture et l'élevage. La majorité des ménages tire ses revenus de la production de cultures vivrières telles que le riz, le maïs et les légumes, souvent destinées à l'autoconsommation. En raison de niveaux de revenu limités, l'accès aux infrastructures modernes et aux sources d'énergie alternatives reste faible. Cette contrainte conduit la population à dépendre largement de la biomasse, notamment du bois et du charbon, pour les besoins énergétiques domestiques, notamment la cuisson et le chauffage.

Cette forte dépendance aux ressources forestières pour l'énergie entraîne une augmentation des émissions de CO₂ dans le chef-lieu de la commune, tout en exerçant une pression considérable sur les écosystèmes locaux. La déforestation associée à l'usage intensif de la biomasse contribue à la dégradation des sols, à la réduction de la biodiversité et à des risques environnementaux accrus. Le recours à des sources d'énergie renouvelable, comme les installations solaires autonomes (mini-réseaux), pourrait offrir une alternative viable pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, préserver les ressources naturelles et améliorer les conditions de vie des habitants. Ce changement serait également aligné avec les objectifs de développement durable, en réduisant l'impact environnemental tout en soutenant le développement socio-économique de la commune.

2.1.2. Commune Rurale Mahasolo

Sur le plan administratif, la Commune Rurale de Mahasolo se trouve dans le District de

Tsiroanomandidy, en Région Bongolava de la Province d'Antananarivo à Madagascar.

La commune se subdivise en dix-sept (17) fokontany.

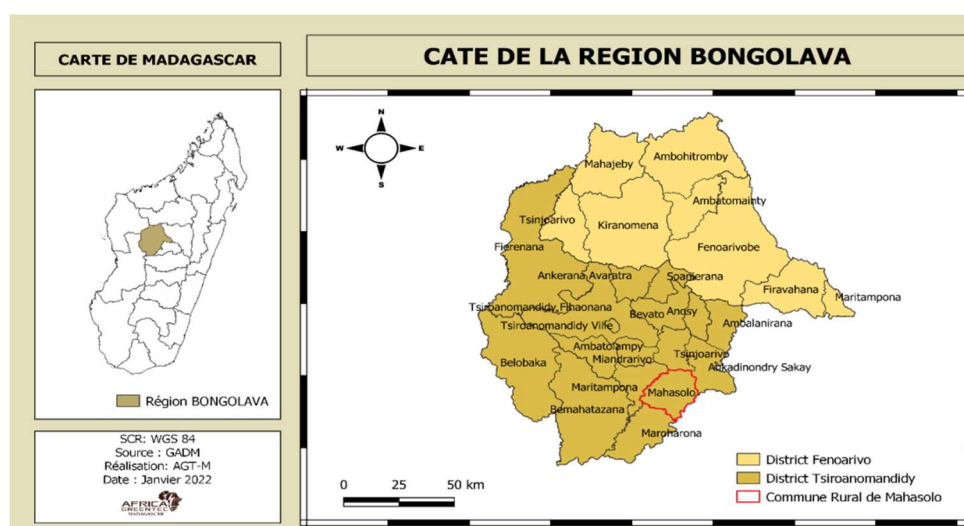


Figure 4: Position Géographique de la commune de Mahasolo [source 3.5: AGT-M]

La zone à raccorder concerne l'ensemble du chef-lieu de la Commune, le fokontany Mahasolo, notamment les 8 zones de ce quartier : Mahasolo atsimo, Mahasolo avaratra I, Mahasolo avaratra II, Ankijana, Mahasolo avaratra III, Ankadibe, Mahasolo Tsaramandroso et Mahasolo afovoany.

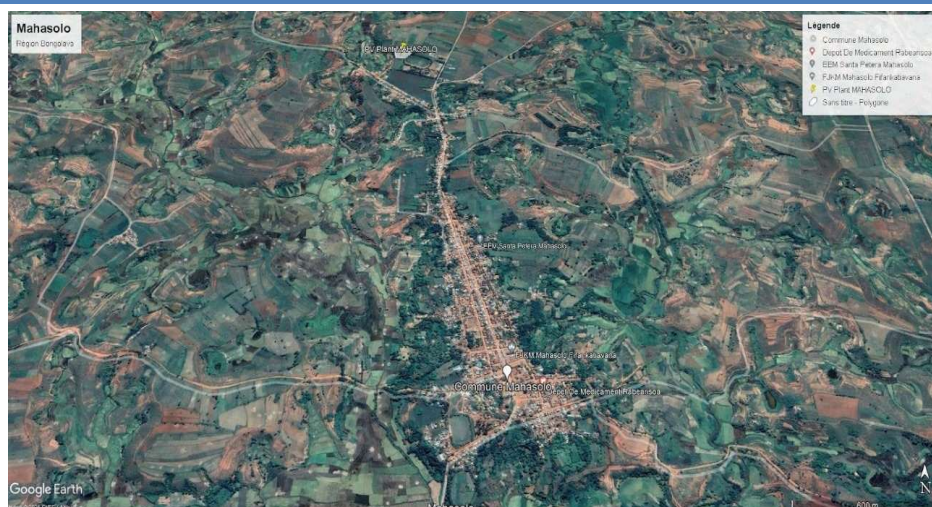


Figure 5: Carte du village du chef-lieu de la commune Mahasolo [source 3.3: Google Earth]

La population du Fokontany Mahasolo s'élevait à 4935 habitants. Avec un taux de croissance de 2,7% par an, la population actuelle est estimée à 5790 habitants. Il est également à noter que la taille moyenne du ménage dans cette zone est de 5 personnes. Le fokontany de Mahasolo compte environ 1158 ménages répartis en trois segments distincts. (Source 3.1: RGPH 3.pdf)

Mahasolo, est une commune rurale où l'agriculture de subsistance et l'élevage dominent l'économie locale. Les principales cultures comprennent le riz, le manioc et le maïs, essentiels tant pour l'alimentation des ménages que pour générer un revenu limité. En raison de leur faible pouvoir d'achat et d'une infrastructure énergétique peu développée, les habitants de Mahasolo dépendent largement de la biomasse, notamment du bois et du charbon, pour subvenir à leurs besoins énergétiques quotidiens. Ce recours aux combustibles ligneux, majoritairement destinés à la cuisson, entraîne une utilisation intensive des ressources forestières environnantes.

La déforestation et la dégradation des sols autour du chef-lieu de Mahasolo en sont les conséquences directes, exacerbées par des pratiques agricoles et énergétiques qui accentuent la pression sur l'environnement local. Ces pratiques entraînent également des émissions significatives de CO₂, contribuant à l'empreinte carbone de la commune et fragilisant davantage les écosystèmes de la région.

3. Méthodologies

Cette étude s'appuie sur une approche méthodologique combinant plusieurs outils afin d'obtenir une analyse rigoureuse et complète des dynamiques socio-énergétiques dans les communes rurales ciblées.

Premièrement, une enquête de terrain exhaustive a été réalisée entre 2023 et 2024, couvrant un échantillon représentatif de 775 entités incluant ménages, institutions publiques et unités économiques dans les communes de Mahavelona (région Itasy) et Mahasolo (région Bongolava). Cette collecte de données a permis de récolter des informations précises sur les habitudes de consommation énergétique, les sources utilisées (bois, charbon, pétrole lampant, kits solaires), les profils socio-économiques (revenus, taille des ménages, activités économiques) et les dépenses énergétiques mensuelles. Cette approche a été élaborée dans l'optique de disposer des informations entre deux périodes différentes T0 : avant introduction de l'électrification et T1 : après introduction de l'électrification dans les deux communes : Mahavelona et Mahasolo.

3.1. Méthode qualitative

Dans le cadre de ce travail de recherche, une approche qualitative combinée à une comparaison entre les périodes avant (T0) et après (T1) l'implémentation du projet d'électrification permettra de mesurer de manière précise l'impact sur les pratiques

énergétiques, les émissions de CO₂ et l'environnement dans les communes de Mahavelona et Mahasolo. Cette méthodologie repose sur plusieurs techniques complémentaires : des entretiens semi-directifs, des groupes de discussion, des observations directes, des entretiens avec des informateurs clés et l'analyse de récits.

Les entretiens semi-directifs réalisés avec les ménages permettront de collecter des données détaillées sur leurs habitudes énergétiques actuelles, en particulier l'utilisation de la biomasse pour la cuisson et d'autres besoins domestiques. Ces entretiens fourniront une base solide pour estimer les émissions de CO₂ à T0 avant la mise en œuvre du projet. En parallèle, les groupes de discussion permettront de recueillir les perceptions collectives des habitants concernant les impacts environnementaux associés à l'usage de la biomasse, ainsi que leurs attentes vis-à-vis des solutions d'électrification et des énergies renouvelables.

Les observations directes seront cruciales pour comprendre la réalité des pratiques énergétiques au quotidien dans les foyers. Ces observations permettront de quantifier la consommation de biomasse (bois, charbon) et d'évaluer ses effets directs sur l'environnement local, notamment en termes d'émissions de CO₂. Après l'implémentation du projet, une seconde phase d'observations permettra de mesurer les changements dans les pratiques énergétiques des ménages, contribuant ainsi à l'évaluation des émissions de CO₂ à T1.

Les entretiens avec des informateurs clés, tels que des responsables de la gestion des ressources naturelles et des autorités locales, fourniront un éclairage complémentaire sur les politiques publiques en matière d'énergies renouvelables et d'environnement. Ces entretiens permettront d'analyser les actions institutionnelles soutenant la transition énergétique, tout en apportant des informations contextuelles sur les défis liés à l'électrification et à la gestion durable des ressources naturelles dans la région.

Enfin, l'analyse des récits récoltés lors des entretiens individuels et des groupes de discussion mettra en lumière les perceptions et les représentations sociales des habitants concernant les enjeux énergétiques et environnementaux. Cette approche permet de saisir les dynamiques sociales et les facteurs émotionnels qui influencent l'adoption des énergies renouvelables, tout en enrichissant la compréhension des impacts environnementaux perçus par les communautés.

La comparaison des données collectées à T0 et T1 permettra de mesurer l'impact direct de l'électrification sur les émissions de CO₂ et l'impact environnemental global. Ce suivi pré et post-implémentation offrira une évaluation complète de l'efficacité du projet en termes de réduction des émissions liées à l'utilisation de la biomasse et de préservation des ressources naturelles. Il sera ainsi possible d'évaluer les changements dans les comportements énergétiques des ménages, en identifiant les réductions de consommation de biomasse et les effets sur la déforestation et la gestion des sols.

Les outputs scientifiques issus de cette analyse fourniront des indicateurs objectifs sur les bienfaits environnementaux du projet d'électrification et contribueront à la formulation de recommandations pour la mise en œuvre de solutions énergétiques durables dans d'autres régions rurales de Madagascar. Ces résultats offriront également des données essentielles pour informer les politiques locales d'électrification, favorisant ainsi une transition énergétique réussie, durable et accessible.

3.2. Méthodes quantitatives

La méthode quantitative est basée sur les enquêtes socio-économique et technique en elle-même afin de structurer le recueil de données de manière à obtenir des indicateurs mesurables, en ciblant précisément les aspects énergétiques et environnementaux dans les deux communes.

3.2.1 L'élaboration du questionnaire d'enquête

Avant les enquêtes, différentes stratégies ont été utilisées pour recueillir les informations fiables venant de la population des deux communes. Tous les ménages de la commune sont ciblés. Le nombre d'enquêteurs et accompagnateur venant de chaque commune pour la facilitation des enquêtes auprès de la population locale a été planifié et étudié. Les enquêtes exploitées sont les enquêtes effectuées par AGT-M qui sont additionnées avec la consommation en biomasse ou autre source d'émission au sein de chaque ménage pour pouvoir évaluer les empreintes carbone de chaque commune que l'on classera par catégorie de ménage.

Les questionnaires élaborés visent à mesurer les besoins énergétiques de la commune, permettant ainsi d'estimer la demande en électricité pour l'implantation d'un mini-réseau autonome capable de répondre aux besoins énergétiques locaux. Ce réseau couvrira les activités connexes, telles que l'utilisation de moteurs thermiques pour les décortiqueuses, les ateliers métalliques, les broyeurs, etc., ce qui impacte également l'étude de consommation électrique. Cette analyse facilitera les calculs de dimensionnement nécessaires pour assurer le confort énergétique de chaque utilisateur.

À T0, avant l'électrification, une enquête de référence est menée à partir de la fiche d'enquête de AGT-M (source 3.5 : AGT-M)) pour recueillir des données essentielles par ménage, structurée autour des rubriques suivantes :

- Les sources d'énergie : Cette rubrique détaille les habitudes énergétiques des ménages en répertoriant les différentes sources d'énergie utilisées quotidiennement, les types de combustibles employés pour la cuisson et ceux utilisés pour les activités professionnelles, notamment dans les petites et moyennes entreprises (PME). Elle couvre également les activités économiques des ménages liées à ces sources d'énergie.
- Les données économiques : consistent à examiner les revenus mensuels des ménages, la taille de chaque ménage, et les modes d'approvisionnement en sources énergétiques telles que le charbon, le bois, les carburants et les bougies. Ces informations permettent d'évaluer les contraintes financière et logistique liées aux besoins énergétiques actuels.

Après la mise en œuvre du projet, à T1, une enquête de suivi basée sur les mêmes rubriques est réalisée pour mesurer l'évolution des pratiques et des conditions de vie. Cette comparaison entre T0 et T1 est essentielle pour quantifier de manière précise l'impact de l'électrification, en analysant l'évolution de la demande énergétique, les changements dans la consommation de combustibles et l'adoption potentielle de sources d'énergie plus durables.

Ces données sont également cruciales pour mesurer l'empreinte carbone des ménages en fonction de leurs habitudes de consommation énergétique. En reliant les catégories de ménages à leurs pratiques énergétiques avant et après l'électrification, cette méthodologie permet d'évaluer l'impact environnemental du projet. Les changements dans l'utilisation de combustibles fossiles et de biomasse, par exemple, peuvent être suivis et comparés, offrant une base solide pour mesurer la réduction des émissions de CO₂. Cette analyse est fondamentale pour identifier les ménages selon leurs profils d'émission et pour orienter de futures initiatives vers des pratiques à faible impact carbone, contribuant ainsi à la durabilité énergétique et environnementale de la région.

En prenant en compte l'installation d'une centrale solaire autonome qui couvre les besoins énergétiques des communes, on pourrait alors se rapprocher du concept d'un écovillage à énergie renouvelable. Un écovillage se définit par son autosuffisance énergétique, l'utilisation de ressources renouvelables, et une réduction significative de l'empreinte écologique. Dans ce contexte, l'énergie solaire remplace les combustibles fossiles, permettant aux communes de Mahavelona et Mahasolo de tendre vers un modèle d'électrification rurale durable et respectueux de l'environnement, aligné avec les principes d'un écovillage.

3.2.2 Outils d'enquêtes

Pour faciliter la collecte des données lors des enquêtes, l'application KoboCollect a été utilisée, dans l'optique de simplifier le traitement des informations et d'assurer une sauvegarde sécurisée des données recueillies sur le terrain. Grâce à KoboCollect, les informations ont pu être organisées de manière structurée, ce qui facilite leur analyse ultérieure et garantit la fiabilité des données collectées pour une interprétation précise des résultats.

3.2.3. Échantillonnage

Dans la CR de Mahavelona, un recensement de tous les ménages du fokontany Akonambohimenabe, a permis une segmentation et une classification détaillées des ménages selon leur niveau de vie. Cette approche exhaustive dans un fokontany cible assure la précision des données, facilitant l'analyse des disparités socio-économiques.

L'échantillon choisi pour cette commune inclut tous les ménages du fokontany, ce qui signifie qu'il s'agit d'un échantillonnage exhaustif. et la formule suivante a été utilisée :

$$E_{\text{Mahavelona}} = N_{\text{Akonombohimenabe}}$$

Avec :

- $E_{\text{Mahavelona}}$ est l'échantillon total des ménages dans la commune de Mahavelona (fokontany Akonambohimenabe),
- $N_{\text{Akonombohimenabe}}$ est le nombre total de ménages dans ce fokontany.

Pour la CR de Mahasolo, une méthode proportionnelle a été utilisée, fondée sur la distribution des niveaux de vie observée à Mahavelona, pour sélectionner la population cible. Cette sélection permet de représenter les différentes classes sociales au sein de la commune et d'extrapoler les résultats de l'enquête aux ménages de Mahasolo. Ainsi, nous pourrions estimer les émissions de CO_2 de l'ensemble de la commune en fonction du nombre total de ménages recensés et des émissions moyennes par catégorie de niveau de vie identifiées dans l'échantillon.

Dans ce cas de Mahasolo, un échantillonnage proportionnel basé sur la distribution des niveaux de vie observée à Mahavelona a été utilisée. La proportion des ménages dans chaque niveau de vie par rapport aux proportions des ménages de Mahasolo a été calculée à partir de la formule suivante :

$$E = \sum_{i=1}^k P_i * N$$

Avec :

- E est l'échantillon des ménages de Mahasolo,
- k : est le nombre de catégories de niveau de vie,
- P_i : est la proportion des ménages dans la catégorie de niveau de vie i à Mahavelona,
- N : est le nombre total de ménages dans la commune de Mahasolo.

Chaque proportion P_i est calculée à partir de l'échantillon de Mahavelona, selon la distribution observée des niveaux de vie. Par exemple, si à Mahavelona 40% des ménages sont dans la classe de revenu faible, 30% dans la classe moyenne, et 30% dans la classe élevée, les mêmes proportions seront appliquées à Mahasolo pour déterminer combien de ménages de chaque catégorie doivent être inclus dans l'échantillon. Mais pour les PME, Institution publiques, la proportion a été obtenue à partir du recensement durant l'enquête menée.

3.2.4 Facteurs d'analyses de l'utilisation des combustibles

Trois facteurs importants ont été mis en évidence pour l'analyse de l'utilisation des combustibles dont

- l'utilisation des combustibles ;
- les sources d'émission de gaz carbonique (CO_2) ;
- les facteurs socio-économiques
- Pour l'utilisation des combustibles :
 - Types de combustibles utilisés (bois, charbon, gaz, carburants fossiles, énergies renouvelables).
 - Quantité de combustibles consommés par ménage.
 - Mode d'approvisionnement en combustibles (local vs. Importé).
 - Fréquence et durée d'utilisation des combustibles.
- Pour les sources d'émission de CO_2 :
 - Émissions dues à la cuisson (bois, charbon de bois, gaz).
 - Émissions dues aux moteurs thermiques (PME).
 - Émissions dues aux transports (véhicules à carburants fossiles).

- Émissions dues à la production d'électricité (avant et après l'électrification).
- Émissions dues à la gestion des déchets.
- Facteurs socio-économiques :
 - Revenus et niveaux de vie des ménages.
 - Activités économiques et industrielles des communes.
 - Accès et adoption des énergies renouvelables.
 - Habitudes culturelles et pratiques de consommation d'énergie.

3.3.2.5 Approche

Pour la collecte de données sur le terrain, une approche méthodologique rigoureuse a été adoptée. Avant le début des enquêtes, les enquêteurs ont bénéficié d'une formation pour comprendre les objectifs de l'étude et maîtriser l'utilisation de l'application KoboCollect, choisie pour la saisie numérique des données. Une coordination étroite a été établie avec les autorités locales, et un représentant de la commune accompagnait systématiquement l'équipe sur le terrain. Cette présence a facilité l'introduction auprès des ménages, renforçant la crédibilité des enquêteurs et instaurant un climat de confiance.

La méthode de collecte était basée sur une approche porte-à-porte, permettant une couverture exhaustive et limitant les biais d'échantillonnage. Les questionnaires, préprogrammés dans l'application KoboCollect, comprenaient des questions ouvertes et fermées adaptées aux besoins de l'étude. À la fin de chaque journée, une session de vérification systématique des données collectées était organisée. Cela a permis de corriger d'éventuelles incohérences ou omissions tout en ayant encore un accès direct aux enquêteurs pour clarifications. Une fois les données validées, elles étaient synchronisées et téléchargées vers une base centrale, garantissant leur sécurité et leur disponibilité immédiate pour les analyses ultérieures.

Cette approche a présenté plusieurs avantages. L'introduction par un représentant de la commune a renforcé la confiance des ménages, améliorant ainsi leur participation. Par ailleurs, l'utilisation de KoboCollect a permis une saisie rapide et précise des données tout en minimisant les erreurs liées aux formulaires papier. Le processus de vérification quotidien a également assuré une grande fiabilité des informations recueillies. Toutefois, certaines limites ont été rencontrées, notamment l'indisponibilité de certains ménages au moment de la visite, nécessitant des retours.

4. Résultats de l'investigation dans les deux communes

4.1. Répartition ménage dans le Fkt Akonambohimenabe - CR Mahavelona

Après analyse des enquêtes menée sur site, le nombre de ménage auprès du fokontany a été classifié en cinq (5) catégories de client selon leur source de revenu mensuelle, leur volonté à payer l'électricité s'ils seront raccordés par le mini réseau. L'enquête auprès des ménages pour le chef-lieu de la CR de Mahavelona a été effectuée en 2022. Cette enquête est notre première Baseline dans le cadre de cette étude.

L'enquête a permis de recenser 251 ménages repartis selon la figure 6.

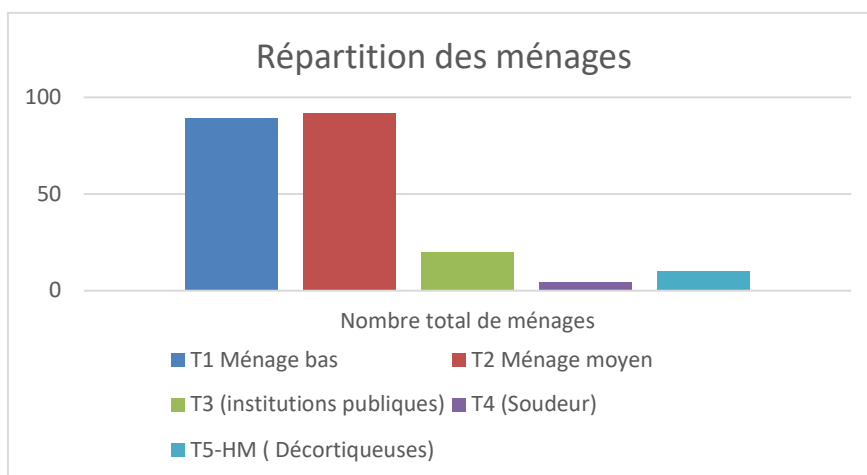


Figure 6: Répartition des ménages selon leur niveau de vie dans le fokontany Akonambohimenabe

Le tableau 2 donne une répartition des ménages dans le Fokontany Ankonambohimena

Tableau 2: Répartition des ménages dans le FKT Akonambohimenabe.

Classe	Tarifs	Nombre total de ménages
C1 Ménage bas	T1 Ménage bas	89
C2 Ménage (Moyen et Haut)	T2 Ménage moyen	92
	T2 Ménage haut	12
C3 Institution Publique	T3	20
C4 PME	T4	24
C5 Gros consommateur	T4 (Soudeur)	4
	T5-HM (Décortiqueuses)	10

Où : C1 : Ménage bas; C2 : Ménage (Moyen et Haut) ; C3 : Institution Publique ; C4 : PME

C5: Gros consommateur

Ti : Tarif par catégorie socio professionnelle

PME : restaurant, épicerie, Bar...); **Institution Publique** : Bureaux administratifs, Ecoles publique et privée, Eglises

Cette répartition permet de structurer les données par catégories socio-économiques, ce qui est crucial pour analyser les différences de consommation énergétique et d'émissions de CO₂.

4.2. Répartition ménage dans le Fkt Mahasolo - CR Mahasolo

519 clients ont été enquêtés et qui sont répartis selon les échantillonnages et la répartition des ménages basés sur Mahavelona. Mais au total nous avons quand même recensé 1154 ménages habitants du chef-lieu de la CR de Mahasolo dans le fokontany Mahasolo. Donc, la répartition que nous avons fait est une extrapolation des données sur les 519 enquêtes en tenant compte du nombre total des Institutions publics comprenant tous les bureaux administratifs, les écoles publique et privée, les églises. Aussi, le nombre des PME (restaurant, épicerie, Bar...) et enfin les gros consommateurs potentiels d'électricité comme les décortiqueuses et les soudeurs.

Donc la répartition de la totalité des ménages sont répartis comme dans la figure 7.

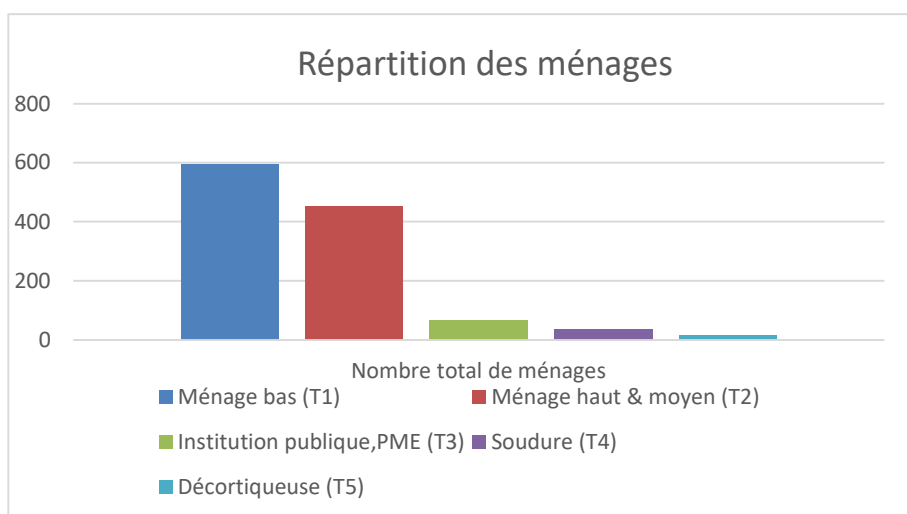


Figure 7: Répartition des ménages dans le fokontany de Mahasolo

Le tableau 3 donne la répartition des ménages dans le fokontany Mahasolo

Classe	Nombre total de ménages
Ménage bas (T1)	592
Ménage haut & moyen (T2)	450
Institution publique, PME (T3)	65
Soudure (T4)	34
Décortiqueuse (T5)	15
TOTAL	1154

1.3. Résultats de la consommation à l'état zéro (T0) en combustible dans le site du projet

En milieu rural, l'utilisation des biomasses comme sources de combustible sont très fréquent ici à Madagascar surtout dans les zones qui n'ont pas accès à l'électricité. L'utilisation des sources de combustibles et des sources d'éclairage a un impact direct sur les émissions de CO₂ des ménages. Nous allons adopter une méthode dite de « globalisation » de la consommation des combustibles par catégorie de client selon les standards en milieu rural à Madagascar

- Consommation de bois: un ménage moyen peut consommer entre 2 et 3 tonnes de bois par an pour cuisiner et se chauffer. Nous allons utiliser 2,5 tonnes par an comme estimation pour chaque ménage.
- Consommation de charbon: Un ménage utilisant du charbon consomme environ 500 à 800 kg de charbon par an. Nous allons prendre une estimation moyenne de 650 kg par an pour les ménages utilisant un mixte de bois et charbon et 1 tonne de bois par an.

Selon ces hypothèses, la consommation de bois et de charbon peut varier selon la catégorisation des clients.

Selon les enquêtes nous avons remarqué que certains ménages de la classe T1 utilisant des sources d'énergie autres que les petits kits solaires. En moyenne, les ménages de cette catégorie n'utilisant pas de kit solaire pour l'éclairage (soit 40% des ménages) utilisent des petites quantités de pétrole lampant et de bougies. Voici les hypothèses de consommation:

- Pétrole lampant: Environ 3 litres par mois par ménage, soit 36 litres par an.

- Bougies: Environ 4 bougies par semaine, soit environ 200 bougies par an (estimant que deux bougies est utilisée par jour au besoin).

4.3.1 Consommation de combustible par ménage à T0 dans le fokontany Akonambohimenabe

a) Ménages à faibles revenus

Tableau 3 : Combustible utilisé par les ménages T1 pour la cuisson

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (kg/an)	Nombre de ménages	Pourcentage
Ménages utilisant uniquement du charbon	Bois	1850	67	74%
Ménages utilisant un mixte charbon et bois	Charbon, Bois	500, 1000	22	26%
Total			89	100%

Ce tableau illustre la consommation des ménages à faibles revenus par an des différentes sources de combustibles qu'ils utilisent au quotidien pour la cuisine.

Vu la proportion et une réponse assez vague des ménages enquêter, nous avons décidé de combiner les ménages qui utilisent le pétrole lampant et la bougie comme sources d'éclairage.

b) Ménages moyen et haut

Tableau 5 : Combustible utilisé par les ménages moyen

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (kg/an)	Nombre de ménages	Pourcentage
Ménages utilisant uniquement du charbon	Charbon	650	78	85%
Ménages utilisant un mixte charbon et bois	Charbon, Bois	500, 1000	14	15%
Total			92	100%

Tableau 6 : Combustible utilisé par les ménages Hauts

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (kg/an)	Nombre de ménages	Pourcentage
Charbon uniquement	Charbon	700	9	89%
Mixte Charbon et Bois	Charbon, Bois	500, 1000	1	8%
Mixte Charbon et Gaz	Charbon, Gaz	600, 50	1	3%
Total			11	100%

c) PME

Tableau 7 : combustible utilisé par les PME

Ménage	Combustible	Consommation par entreprise (kg /an)	Nombre de PME	Pourcentage
PMEs utilisant du Bois	Bois	1500 kg	6	25%
Autres PME utilisant du Charbon	Charbon	1000 kg	18	75%
Total			24	100%

Pour les PME la majorité des ménages sont des restaurants, des épiceries, ou bien des épi-bars.

Tableau 8 : combustible utilisé par les décortiqueuses et les soudeurs

Ménage	Combustible	Consommation par entreprise (kg ou litres/an)	Nombre d'entreprises	Pourcentage
PMEs Décortiqueuses	Gasoil	4015 litres	8	100%
PMEs Soudeurs	Gasoil	1460 litres	4	100%

Pour ces deux cas spécifiques, nous avons pris comme hypothèse les résultats d'enquêtes sur la consommation en carburant des machines à décortiqué le riz ou les broyeurs et les soudures pour les ouvrages métalliques. Les décortiqueuses utilisent principalement du gasoil, avec une consommation moyenne de 8 litres par jour en basse saison, qui peut augmenter jusqu'à 14 litres par jour pendant la saison de récolte. Les soudures consomment aux alentours 4 litres de gasoil par jour en moyenne en intégrant les fluctuations des travaux qu'ils exécutent.

4.3.2 Consommation de combustible par ménage à T0 dans le fokontany Mahasolo

a. Ménages à faibles revenus

Tableau 4 : Combustible utilisé par les ménages T1 pour la cuisson FKT Mahasolo

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (kg/an)	Nombre de ménages	Pourcentage
Ménages utilisant uniquement du charbon	Bois	1850	444	74%
Ménages utilisant un mixte charbon et bois	Charbon, Bois	500, 1000	148	26%
Total			592	100%

Ce tableau illustre la consommation des ménages à faibles revenus par ans des différentes sources de combustibles qu'ils utilisent au quotidien pour la cuisine

Tableau 5 : Combustible utilisé par les ménages T1 pour l'éclairage du FKT Mahasolo

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (L/an),(Unité/an)	Nombre de ménages	Pourcentage
Utilisant les kits solaire	-	-	504	85%
Ménages utilisant pétrole lampant, bougie	Pétrole	36	88	15%
	Bougie	200		
Total			592	100%

Dans ce cas, on a pu remarquer que la majorité de la population utilise des petits kits solaires pour éclairer leur maison.

a. Ménages moyens et haut

Tableau 11 : Combustible utilisé par les ménages moyens FKT Mahasolo

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (kg/an)	Nombre de ménages	Pourcentage
Ménages utilisant uniquement du charbon	Charbon	650	317	85%
Ménages utilisant un mixte charbon et bois	Charbon, Bois	500, 1000	56	15%
Total			374	100%

Tableau 12 : Combustible utilisé par les ménages Haut FKT Mahasolo

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (kg/an)	Nombre de ménages	Pourcentage
Charbon uniquement	Charbon	700	48	62.5%
Mixte Charbon et Bois	Charbon, Bois	500, 1000	15	19.6%
Mixte Charbon et Gaz	Charbon, Gaz	600, 50	14	17.6%
Total			77	100%

d) PME

Tableau 13 : combustible utilisé par les PME FKT Mahasolo

Ménage	Combustible	Consommation par entreprise (kg, L/an)	Nombre de PME	Pourcentage
PMEs utilisant du Bois	Bois	1500	14	
Autres PME utilisant du Charbon	Charbon	1000	40	
Décortiqueuses	Gasoil	4015	15	
Soudeurs	Gasoil	1460	20	
Total			89	100%

2. Résultats d'émission de CO₂ à l'état zéro (T0) par l'utilisation de combustible dans le site du projet

5.1. Facteur d'émissions en CO₂

Le facteur d'émission en CO₂ est un coefficient qui permet d'estimer la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) émise par unité d'énergie ou de combustible consommé. Il est couramment exprimé en kilogrammes de CO₂ par kilowattheure (kg CO₂/kWh) ou en kilogrammes de CO₂ par unité de masse (kg CO₂/kg de combustible) pour les combustibles solides ou liquides. Ce facteur dépend du type de combustible utilisé, car chaque combustible émet une quantité différente de CO₂ en fonction de sa composition chimique et de son pouvoir calorifique.

Les facteurs d'émission appliqués sont les suivants [source]:

- Charbon : 2,9 kg CO₂ par kg de charbon.
- Bois : 1,8 kg CO₂ par kg de bois.
- Gaz : 3 kg CO₂ par kg de gaz.
- Gasoil : 2,68 kg CO₂ par litre
- Pétrole lampant : Environ 2,5 kg de CO₂ par litre.
- Bougies : Les bougies sont principalement en paraffine, produisant environ 10 g de CO₂ par bougie.

5.2. Résultats de l'émission de CO₂ à l'état zéro (T0) par l'utilisation de combustible dans le fokontany d'Akonambohimenabe

Pour ce faire nous utiliserons la formule :

$$\text{Emissions}_{\text{source}} = \text{Quantité consommée}_{\text{source}} \times \text{Facteur d'émission}_{\text{source}} \quad (3.03)$$

Tableau 14 : Emission à T0 par type de ménages dans le FKT Akonambohimenabe

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (kg/an)	Facteur d'émission (kg CO ₂ /kg)	Émissions de CO ₂ par ménage (kg/an)	Nombre de ménages	Émissions totales (kg CO ₂ /an)
Ménage bas	Bois	1850	1,8	3330	67	222277,5
	Charbon, Bois	500/ 1000	2,9/ 1.8	1450, 1800	22	71862,5
	Pétrole, Bougie	36L, 200U	2,5;0.1	90; 20	36	3960
Ménage Moyen	Charbon	650	2,9	1885	78	147407
	Charbon, Bois	500; 1000	2,9; 1.8	1450; 1800	14	45210
Ménage Haut	Charbon	700	2,9	2030	9	18270
	Charbon, Bois	500, 1000	2,9; 1,8	3250	1	3250
	Charbon, Gaz	600, 50	2.9, 3,0	1890	1	1890
PME	Bois	1500 kg	1,8 kg CO ₂ /kg	2700	6	16200
	Charbon	1000 kg	2,9 kg CO ₂ /kg	2900	18	52200
Décortiqueuses	Gasoil	4015 litres	2,68 kg CO ₂ /litre	10760,2	8	86081,6
Soudeurs	Gasoil	1460 litres	2,68 kg CO ₂ /litre	3912,8	4	15651,2
TOTAL						684259,8

Ce tableau informe l'émission moyenne en dioxyde de carbone pour le fokontany Akonambohimenabe dans le chef-lieu de la commune Rurale de Mahavelona, en 2022 selon les enquêtes 684 tCO₂/an est émis par ce derniers. Donc à T0 nous avons 684 tCO₂/an comme référence pour le Fokontany d'Akonambohimenabe.

5.3. Résultats de l'émission de CO₂ à l'état zéro (T0) par l'utilisation de combustible dans le fokontany de Mahasolo

Le résultat à T0 pour le fokontany de Mahasolo est réparti selon le tableau ci-dessous avec la même méthode de calculs effectuée avec celle du Fokontany d'Akonambohimenabe.

Tableau 15 : Emission à T0 par type de ménages dans le FKT Mahasolo

Ménage	Combustible	Consommation par ménage (kg/an)	Facteur d'émission (kg CO ₂ /kg)	Émissions de CO ₂ par ménage (kg/an)	Nombre de ménages	Émissions totales (kg CO ₂ /an)
Ménage bas	Bois	1850	1,8	3330	444	1478520
	Charbon/ Bois	500/ 1000	2,9/ 1,8	1450/ 1800	148	481000
	Pétrole/ Bougie	36L/ 200U	2.5/0.1	90/20	88	9680
Ménage Moyen	Charbon	650	2,9	1885	317	598440,375
	Charbon/ Bois	500, 1000	2,9/ 1.8	1450/1800	56	182036,25
Ménage Haut	Charbon	700	2,9	2030	48	97440
	Charbon/Bois	500, 1000	2,9/ 1.8	3250	15	48750
	Charbon/Gaz	600, 50	2,9/3.0	1890	14	25515
PME	Bois	1500 kg	1,8 kg CO ₂ /kg	2700	14	37800
	Charbon	1000 kg	2,9 kg CO ₂ /kg	2900	40	116000
Décortiqueuses	Gasol	4015 litres	2,68 kg CO ₂ /litre	10760,2	15	161403
Soudeurs	Gasol	1460 litres	2,68 kg CO ₂ /litre	3912,8	20	78256
TOTAL						3314840,625

Ce tableau informe que l'émission moyenne pour le fokontany Mahasolo dans le chef-lieu de la commune de Mahasolo, en 2022 selon les enquêtes est de 3314 tCO₂/an. Donc à T0 l'émission de CO₂ de 3314 tCO₂/an est la référence pour le Fokontany de Mahasolo.

3. Conclusion

Les ménages des deux Communes Rurales de Mahavelona et de Mahasolo s'approvisionnent en bois énergie et en combustible fossile pour la satisfaction de leur besoin énergétique quotidien : usage domestique ou usage professionnel. L'utilisation de ces ressources menace la préservation de la ressource en bois énergie pour les ménages d'une part et d'autre part pour l'environnement pour l'utilisation des sources d'énergie fossile comme le gasoil pour leur activité quotidienne. Afin de faire face au réchauffement climatique dû à l'utilisation de ces ressources, la recherche d'autre ressource durable est une priorité et c'est dans ce contexte que ce travail de recherche a été focalisé sur l'étude de l'installation de mini réseau photovoltaïque dans l'optique de disposer des données qui seront utilisées ultérieurement pour modéliser la demande locale, établir des scénarios technico-économiques d'électrification, et estimer les émissions de CO₂ évitées en substituant les combustibles fossiles par une production photovoltaïque.

Référence

- [1] Renaud, F., Andrianirina, H., & Rakotoarison, L. (2020). Opportunités de valorisation carbone des projets solaires décentralisés à Madagascar. *Revue Énergie & Développement Durable*, 34(2), 45–59.
- [2] Bhattacharyya, S. C. (2013). *Rural Electrification Through Decentralised Off-grid Systems in Developing Countries*. Springer.
- [3] Glemarec, Y. (2012). Financing off-grid sustainable energy access for the poor: The role of carbon finance. *Energy Policy*, 47, 87–93.
- [4] Szabó, S., Bodis, K., Huld, T., & Moner-Girona, M. (2011). Energy solutions in rural Africa: mapping electrification costs of distributed solar and diesel generation versus grid extension. *Environmental Research Letters*, 6(3), 034002.
- [5] World Bank. (2019). *Mini Grids for Half a Billion People: Market Outlook and Handbook for Decision Makers*. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), Washington, DC.
- [6] Climate Policy Initiative (CPI). (2020). *Integrating Climate Co-benefits into Energy Access Projects*. Available