

Identification Du Modèle De Distillateur Solaire À Effet De Serre Adapté Au Sud De Madagascar : Approche Par Matrice De Pugh

Tsiry Angelos Andriamanampisoa¹, Eva Nivonirina Andriamanampisoa², Karl Zimmermann³, Harry Chaplin⁴, Edouard Andrianarison⁵

¹Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique, 101 Antananarivo-Madagascar

²Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique, 101 Antananarivo-Madagascar

³Tatirano Entreprise Sociale, Bazarikely, Fort-Dauphin, Madagascar

⁴Tatirano Entreprise Sociale, Bazarikely, Fort-Dauphin, Madagascar

⁵Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique, 101 Antananarivo-Madagascar



Résumé – Le Sud de Madagascar fait face à une grave pénurie d'eau. Pour remédier efficacement à cette situation, il est nécessaire de choisir la technologie adéquate pour le dessalement des eaux de mer ou eaux saumâtres. Cela implique la prise en compte des facteurs contextuels locaux. Cette étude présente l'application de la matrice de Pugh comme outil d'aide à la décision pour la sélection du modèle de distillateur solaire adapté au contexte de cette zone. La zone d'étude et la population cible ont été décrites, et sept modèles de distillateurs solaires ont été évalués en fonction des critères de coût, de durabilité, de technologie, de productivité et de qualité de l'eau distillée obtenue. La matrice de Pugh a été utilisée pour classer et comparer les plans, en tenant compte des résultats quantitatifs et qualitatifs liés à chaque critère. Selon cet outil, le distillateur solaire à double pente est le plus approprié. Cela démontre que la matrice de Pugh peut aider dans la lutte contre la pénurie d'eau en fournissant une approche systématique pour sélectionner les modèles de distillateur solaire. Les limites de l'étude ont été reconnues, soulignant la nécessité de poursuivre les recherches sur la considération d'autres critères de sélection et sur l'optimisation des distillateurs solaires. En conclusion, cette étude offre des informations précieuses aux décideurs, aux praticiens et aux chercheurs travaillant sur la gestion durable de l'eau dans le Sud de Madagascar, contribuant ainsi à la lutte contre la pénurie d'eau et à l'avancement des technologies renouvelables.

Mots clés – Lutte Contre La Pénurie D'eau ; Dessalement De L'eau De Mer ; Distillateur Solaire Passif ; Outil D'aide A La Décision

Abstract – Southern Madagascar is experiencing severe water scarcity. To address this issue effectively, it is crucial to select the appropriate technology for desalinating seawater or brackish water, taking into account local contextual factors. This study aims to present the application of the Pugh matrix as a decision support tool for selecting the solar distiller model best suited to the context of the region. The study area and target population were described, and seven solar distiller models were evaluated based on cost, sustainability, technology, productivity, and quality of distilled water obtained. The Pugh matrix was employed to rank and compare the designs, taking into account the quantitative and qualitative results related to each criterion. According to the tool, the double slope solar distiller was deemed the most suitable. This finding demonstrates that the Pugh matrix can aid in combating water scarcity by providing a systematic approach to selecting solar distiller models. However, the study acknowledged its limitations, emphasizing the need for further research on the consideration of other selection criteria and on the optimization of solar distillers. In conclusion, this study offers valuable information to policymakers, practitioners, and researchers working on sustainable water management in Southern Madagascar, thus contributing to the fight against water scarcity and the advancement of renewable technologies.

Keywords – Fight against water scarcity; eawater desalination; passive solar distiller; Decision support tool

I. INTRODUCTION

L'accès à l'eau potable, un droit humain fondamental, est compromis à l'échelle mondiale, touchant spécialement les régions arides telles que le sud de Madagascar. Les habitants de cette zone font face à des obstacles cruciaux pour répondre à ce besoin essentiel [1]. Caractérisée par des précipitations annuelles faibles et des taux d'évaporation élevés, la région souffre d'une disponibilité limitée en eaux douces en raison de ressources en eaux souterraines peu profondes et peu fiables [2]. Des communautés isolées géographiquement, sans réseau routier ou infrastructure adéquate, sont notamment affectées par des difficultés de transport et de distribution de l'eau potable [3]. De plus, pour cette région, l'eau saumâtre représente un défi pour l'agriculture, car une mauvaise irrigation peut nuire aux sols et, par conséquent, à la sécurité alimentaire. Le manque d'accès à l'électricité entrave l'implantation de technologies énergivores pour le traitement de l'eau. En outre, les défis socioéconomiques tels que la pauvreté, un accès limité à l'éducation et des installations de santé insuffisantes exacerbent la vulnérabilité face à la rareté de l'eau [4].

La communauté locale joue un rôle crucial en préservant des services écosystémiques essentiels via des pratiques culturelles enracinées [5]. Intégrer les perspectives communautaires dans les interventions pour atténuer les impacts climatiques et promouvoir la sécurité alimentaire, en reconnaissant l'importance des pratiques culturelles et des connaissances locales, est crucial [6] pour le dessalement de l'eau saumâtre, plusieurs technologies peuvent être appliquées, mais deux en particulier sont les plus utilisées [7]: l'osmose inverse (une technique consistant à pousser l'eau sous haute pression à travers une membrane pour être purifiée) [8] et la distillation (qui consiste à faire vaporiser l'eau saumâtre, à faire condenser la vapeur d'eau pour obtenir de l'eau purifiée) [9]. Mais l'application de l'osmose inverse est difficile pour les zones rurales et à faible ressource comme le sud de Madagascar. Il est plus préférable de se tourner vers les traitements passifs de l'eau qui ne requièrent aucun apport énergétique ni d'ajout de produit chimique [10]. Ces types de traitements de l'eau sont plus respectueux de l'environnement et sont à moindre coût. C'est ainsi que les distillateurs solaires se révèlent comme une solution durable aux défis de pénurie d'eau en permettant une purification efficace de l'eau dans les régions où les sources d'eau douce sont rares. Ils exploitent l'énergie solaire pour chauffer et purifier l'eau [11].

Les distillateurs solaires offrent une solution simple, économique et écologique pour la purification de l'eau, particulièrement adaptée aux régions ensoleillées [12]. En réduisant la dépendance aux ressources d'eau classiques, ils contribuent à la conservation des ressources en eau et à la durabilité [13]. Leur mise en place favorise l'autonomie et l'entrepreneuriat local [14]. Cependant, malgré leur simplicité, la productivité des distillateurs solaires dépend de plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques [15]. Des avancées récentes, incluant l'intégration de panneaux photovoltaïques et l'utilisation de réflecteurs, ont optimisé leur efficacité [16]. Plusieurs modèles de distillateurs solaires aux performances variables, influencées par la conception, les matériaux et le climat, existent [17]. Les figures 1, 2 et 3 montrent quelques exemples de distillateurs solaires.



Figure 3: Distillateur solaire à double pente [18]



Figure 3: Distillateur solaire



Figure 3: Distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe [20]

Cette étude vise à évaluer différents types de distillateurs solaires dans le contexte spécifique du sud de Madagascar, en se basant sur l'outil de décision « matrice de Pugh », pour sa simplicité d'utilisation, afin de choisir le modèle le plus approprié [21]. L'objectif est d'identifier la conception optimale pour répondre aux besoins locaux en considérant les aspects économiques, qualitatifs et de productivité. L'application de la matrice de Pugh pour évaluer les distillateurs solaires dans cette région permettra d'identifier la conception la plus adaptée pour améliorer l'accès à l'eau potable et promouvoir le développement durable [22]. Cette recherche apportera des connaissances précieuses aux décideurs et ingénieurs qui cherchent à mettre en place des systèmes solaires fixes dans le sud de Madagascar.

En somme, cette étude aspire à sélectionner un modèle de distillateur solaire efficace, reproductible et simple à utiliser par la population locale pour atténuer la pénurie d'eau et renforcer la santé publique.

II. REVUE DE LITTÉRATURE

Distillateurs solaires

Un motif populaire des distillateurs solaires fonctionne sur le principe de l'effet de serre, chauffant l'eau sous l'impact du flux de rayonnement solaire. Cette chaleur provoque l'évaporation d'une partie de l'eau, qui se condense ensuite sur l'intérieur de la couverture transparente, récupérée par un récepteur avec ajout d'eau pour compenser la production de distillat. La figure 4 présente le fonctionnement d'un distillateur solaire.

Les distillateurs solaires bénéficient d'avantages climatiques optimaux comme des températures élevées et un ensoleillement conséquent pour maximiser la production d'eau distillée [23] [24]. En plus de ces conditions, divers facteurs influent sur l'efficacité de ces distillateurs. Parmi eux, le coefficient d'absorption de l'eau salée, la profondeur du bassin, le matériau de condensation, et la hauteur du distillateur participent à cette efficacité [25].

L'angle d'inclinaison de la surface vitrée, adaptée à la latitude locale, et l'utilisation de matériaux absorbants spécifiques, tels que le ciment ou l'aluminium, permettent d'optimiser le processus [26]. Des avancées techniques telles que l'intégration de composants thermosiphons ou de matériau à changement de phase contribuent à une utilisation plus efficace de la chaleur solaire pour l'évaporation de l'eau [27].

Les distillateurs solaires pyramidaux, récemment développés avec des matériaux à stockage thermique ou des matériaux en mèche, améliorent nettement la production d'eau douce [28] [29]. L'intégration de technologies telles que les tubes sous vide et les nanofluides à base de carbone noir renforce également la performance des distillateurs solaires [30]. Malgré leurs avantages environnementaux (utilisation d'énergie renouvelable, absence de déchet chimique ...), ces distillateurs présentent un rendement d'eau douce relativement faible par rapport à l'énergie solaire reçue [31] [32].

Les recherches actuelles suggèrent de combler cet écart de rendement en explorant l'utilisation de nanomatériaux [33] ou des systèmes hybrides photovoltaïques-thermiques [34]. Ces avancées technologiques visent à améliorer significativement la production d'eau distillée, permettant ainsi une adaptation continue de ces dispositifs pour satisfaire les besoins croissants en eau potable.

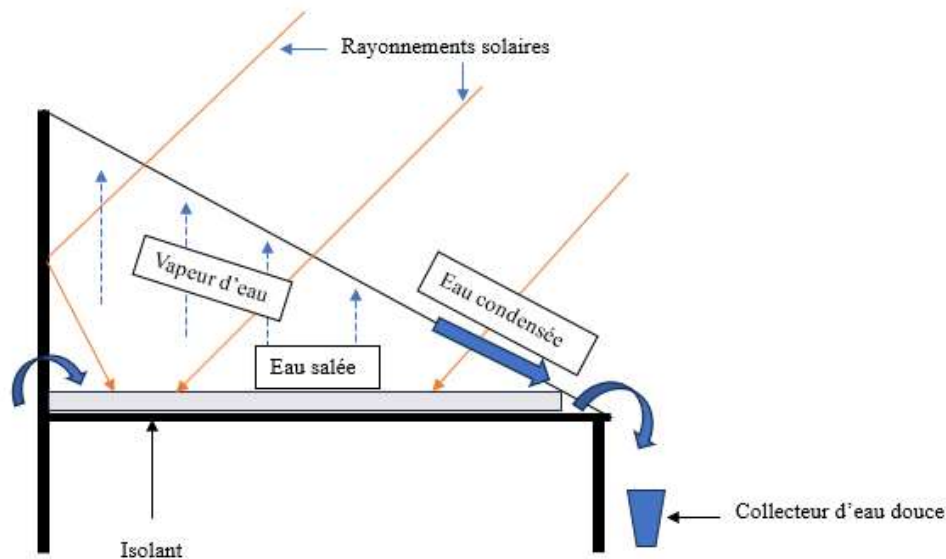


Figure 4 : Fonctionnement d'un distillateur solaire basique.

Différents types de distillateurs solaires

Les distillateurs solaires utilisés pour la désalinisation de l'eau se déclinent en différentes configurations. Parmi les variétés les plus répandues figurent les distillateurs solaires à bassin et les versions tubulaires, des modèles ayant une longue histoire d'utilisation [35]. Ces systèmes de distillation solaire peuvent être catégorisés selon leur conception (passifs ou actifs), ainsi qu'en uniques ou multifonctions [36]. De plus, ils peuvent être classés en fonction du mouvement de l'eau à distiller : les distillateurs statiques (où l'eau à distiller est immobile) et les distillateurs à ruissèlement (où l'eau à distiller est en mouvement) [37].

Méthodes de prise de décisions utilisées dans le cadre des distillateurs solaires

Les méthodes de prise de décision concernant les distillateurs solaires comprennent :

1. L'analyse exégétique pour évaluer l'efficacité thermodynamique [38] afin de mesurer la conversion précise de l'énergie solaire en eau distillée [39].
2. L'utilisation de techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning, ML) pour optimiser les performances des systèmes de distillation, notamment l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (ANN), capables de prédire et d'optimiser les performances des distillateurs solaires [40].
3. L'évaluation de diverses configurations et innovations technologiques visant à améliorer la productivité et l'efficacité des distillateurs solaires [29].

Ces méthodes de prise de décision et leur combinaison revêtent une importance capitale pour le développement de systèmes de distillation solaire à la fois efficaces et économiquement viables. Elles facilitent la prise de décisions éclairées dans le processus de développement et d'amélioration des distillateurs solaires.

Pour la sélection optimale d'un modèle de distillateur solaire, il est nécessaire d'évaluer divers paramètres et méthodes de prise de décision. Ces approches comprennent l'analyse exégétique des systèmes de désalinisation [41], l'évaluation de la performance et de la compétitivité (financière et de productivité) par rapport à d'autres systèmes [36], et l'analyse des innovations technologiques pour accroître l'efficacité [42]. Il est également crucial d'examiner une analyse économique adaptée prenant en compte le coût équivalent de la dégradation environnementale et les économies d'énergie de qualité supérieure [39], et une analyse sociale des capacités existant localement pour les opérations et maintenances, ainsi que l'acceptation de la technologie et la confiance par les utilisateurs d'eau.

Matrice de Pugh

La matrice de Pugh, également désignée sous les termes de « méthode de sélection conceptuelle » ou de « matrice de décision conceptuelle de Platts », représente un outil essentiel de prise de décision employé lors du processus de conception et de développement de nouveaux produits. Elle a par exemple été utilisée dans le choix de la conception de nouveaux équipements chirurgicaux, et son application a bénéficié en permettant d'éviter toute subjectivité lors de la sélection [43]. La matrice de Pugh figure parmi les outils de décision les plus utilisés, car elle fait évoluer la réflexion sur le problème et la solution [44].

Son objectif fondamental consiste à simplifier une évaluation structurée des différentes alternatives de conception, comparatives à une solution de référence, en se basant sur des critères établis et pondérés en fonction de leur importance. Chaque concept est ensuite évalué par rapport à cette solution de référence pour chaque critère, cela dans le but d'assurer une analyse objective [21]. Les étapes essentielles de l'analyse de la matrice Pugh incluent la détermination des critères d'évaluation, la sélection d'un concept de base ou de référence, la comparaison des autres concepts à cette référence, et l'attribution de scores indiquant si les autres concepts sont supérieurs, équivalents ou inférieurs à la référence pour chaque critère [45].

Des études antérieures ont démontré que l'utilisation appropriée de la matrice de Pugh, assortie d'un niveau de détail adéquat, peut se révéler un instrument puissant, stimulant une réflexion structurée basée sur des critères explicites et documentant le processus de prise de décision [47]. Une résistance subsiste parmi les ingénieurs et les gestionnaires quant à l'adoption de ces matrices, soulignant l'importance cruciale de l'adaptation et d'une communication efficace de cette méthode aux parties prenantes.

Bien que la matrice de Pugh traditionnelle propose de nombreux avantages, elle présente également certaines limites liées à la gestion de l'incertitude et de la subjectivité inhérentes à l'évaluation des concepts de design. Afin de pallier ces limitations, des approches hybrides et des extensions de la matrice de Pugh ont été développées. Ces avancées comprennent l'intégration de méthodes de décision multicritères floues (MCDM) et de processus analytiques hiérarchiques flous (FAHP) visant à traiter l'incertitude inhérente dans l'évaluation des concepts. Ces approches plus avancées sont particulièrement bénéfiques dans des environnements où les ressources sont limitées et où une évaluation précise est cruciale. Néanmoins, leur mise en œuvre peut être complexe en raison de la nécessité de gérer l'incertitude et l'imprécision liées aux jugements des décideurs, ainsi que de maintenir la cohérence des poids flous [45] [46].

Facteurs d'évaluation au sud de Madagascar

Les critères d'évaluation dans la matrice de Pugh pour déterminer le modèle approprié pour le contexte du sud de Madagascar doivent être soigneusement sélectionnés afin de refléter précisément les besoins locaux et les défis spécifiques de la région. Ces critères devraient englober des aspects techniques, économiques, environnementaux et sociopolitiques, comme préconisés par l'utilisation des méthodes de décision multicritères (MCDM) dans plusieurs domaines de la recherche [45] [46]. Les critères techniques pourraient inclure des éléments tels que la faisabilité, la performance et la durabilité des solutions, tandis que les critères économiques pourraient se concentrer sur des aspects comme le coût, le retour sur investissement et la viabilité à long terme. Les critères environnementaux devraient prendre en considération l'impact sur l'écosystème local, tandis que les critères sociopolitiques pourraient englober des aspects tels que l'acceptabilité par la communauté locale, l'alignement avec les politiques gouvernementales et la contribution au développement social. Adapter la matrice de Pugh en tenant compte de critères pertinents et en attribuant une pondération adéquate est essentiel pour garantir que le modèle sélectionné réponde au mieux aux exigences locales.

Alors que des recherches ont été menées pour améliorer l'efficacité et la production d'eau des distillateurs solaires, l'application spécifique de la matrice de Pugh dans ce domaine reste largement inexplorée [48]. Les études existantes sur les distillateurs solaires sont en grande partie focalisées sur l'amélioration des performances d'un modèle unique pour chaque étude à travers des expérimentations diverses et de l'utilisation de matériaux à changement de phase. Cependant, l'utilisation de la matrice de Pugh demeure rare, malgré son potentiel comme outil efficace dans ce domaine. Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour établir une corrélation entre le contexte climatique, géologique, politique, social et environnemental d'une région et le choix approprié d'un distillateur solaire.

Contextes du sud de Madagascar

Le sud de Madagascar est confronté à des défis climatiques importants, avec des sécheresses aggravées par le changement climatique anthropique. Les conditions de sécheresse sont rendues significativement plus probables entre 2017 et 2022 en raison des changements anthropiques dans le forçage radiatif [49], qui menacent aussi la sécurité alimentaire de plus de la moitié de la population des régions méridionales en 2022 [50]. Il est intéressant de noter que, bien que Madagascar contribue seulement à 0,2 % des émissions de CO₂ mondiales, les impacts du changement climatique sont particulièrement sévères dans cette région. Les tendances observées dans les précipitations, l'humidité du sol et la verdure de la végétation indiquent un retard dans le début de la saison des pluies, ce qui est cohérent avec les simulations des modèles climatiques qui prévoient une migration polaire du jet de moyenne latitude affectant la saisonnalité des précipitations [49]. L'eau disponible (eau souterraine, eau de mer, eau de surface) étant insuffisante et peu fiable, la détermination d'une technique, adéquate et efficace, de dessalement de l'eau est assez urgente. Pour cela, la forte incidence d'énergie solaire de cette région favorise l'utilisation des distillateurs solaires pour le traitement et le dessalement de l'eau de mer et saumâtre [51]. Pour être efficace dans la contribution à la lutte contre la pénurie de l'eau dans le sud de Madagascar, le distillateur solaire doit produire de l'eau qui réponde aux normes de potabilité et avoir un débit de production suffisamment grand pour répondre aux besoins de la population.

En ce qui concerne le contexte socioéconomique, le sud de Madagascar est particulièrement touché par la pauvreté, un très faible taux de scolarité et une grande insuffisance d'infrastructure. D'ailleurs, cette région est la plus à la traîne (en termes de développement socioéconomique) en comparaison avec les autres régions de Madagascar [4] alors que le pays lui-même est classé parmi les plus pauvres du monde. Ainsi, il est nécessaire que les stratégies d'adaptation et les solutions technologiques qui tiennent compte de ces conditions socioéconomiques pour être efficaces et équitables [50]. De ce fait, dans ces contextes, les facteurs coûts et facilité d'utilisation sont également importants. C'est ainsi que la simplicité et le faible coût initial des distillateurs solaires les rendent particulièrement appropriés pour les zones isolées et les habitations dispersées, comme c'est souvent le cas dans le sud de Madagascar [51].

En résumé, la sélection du distillateur solaire adapté au contexte du sud de Madagascar devrait tenir compte de son coût, de sa simplicité d'utilisation et de maintenance, de son débit de production et, évidemment, de sa capacité à produire un distillat ne présentant aucun risque pour la santé.

III. MÉTHODES

Zone d'étude

La zone d'étude, le district d'Ambovobe, fait partie de la région Androy qui se situe dans l'extrême Sud de Madagascar [3] et dont la population compte environ 900 000 personnes [52]. La région Androy se trouve à environ 1000km sud de la capitale de Madagascar et est limitée par les coordonnées géographiques suivantes en latitude : entre 24°13' et 25°24' Sud et en longitude : entre 45°20' et 46°26' Est. Elle couvre une superficie de 19 538 km², ce qui représente 3,33 % de la superficie totale de Madagascar [53].

La région appartient au domaine subaride du Sud de Madagascar et est soumise à un climat tropical semi-aride à aride avec deux saisons tranchées : saison humide (été) et saison sèche (hiver) [54]. Cette aridité est amplifiée par des températures toujours élevées (23 à 24 °C en moyenne par an) et par des vents forts, persistants et desséchants [53]. Sa pluviométrie est faible (inférieure à 500mm par an). La quantité d'eau évaporée est supérieure à la quantité d'eau de pluie reçue [53], réduisant la quantité disponible des eaux de surface qui, d'ailleurs, sont de qualité pas très bonne [55]. Le taux d'accès à l'eau potable de cette zone est de 39% [56].

Présentation des distillateurs solaires analysés dans cette étude

Comme mentionné dans la partie « Revue de littérature », il existe plusieurs types de distillateurs solaires. Cette étude se concentrera sur l'analyse de quelques distillateurs de type statique et de type à ruissèlement. Le Tableau 1 suivant présente les distillateurs solaires analysés dans cette étude. En plus, ces distillateurs ont été sélectionnés, car ils font partie des distillateurs solaires qui ont été étudiés ou dont l'étude est en cours par notre équipe de chercheurs.

Tableau 1 : Distillateurs solaires analysés dans cette étude.

Type de distillateur	Composant et conception	Source
DISTILLATEURS STATIQUES		
Distillateur solaire à effet de serre à double pente	- Un bac absorbant (plaque noire) en fibre de verre rempli par une couche de résine (polyester insaturé) - Une couverture en verre - Une cuve à niveau constant munie d'un flotteur - Un réservoir d'alimentation en eau saumâtre - Des tuyauteries en plastique - Deux cuves graduées - Le sable (isolant)	[57]
Distillateur solaire sphérique	-Un bac absorbant en cuivre revêtu en noir - Une vitre en plexiglas - Un isolant en polystyrène	[19]
Distillateur solaire à simple pente en cascade	- Un verre ordinaire - Un Bac absorbant en tôle galvanisée - De la laine de verre pour l'isolation - Un coffre en bois	[58]
Distillateur solaire à simple pente avec un réfracteur	- Un bac absorbant en verre - Un recouvrement en verre - Un coffre en bois pour l'isolation - Un entonnoir - Un tuyau - Un tube PVC	[59]
DISTILLATEURS À RUISSÈLEMENT		
Distillateur solaire à Film capillaire	- Une couverture vitrée - Un absorbeur-évaporateur (plaque d'acier galvanisé) - Un condenseur - Du tissu - Un système d'alimentation	[57]
Distillateur solaire incliné à mèche	- Un bac absorbant en tôle galvanisé - Une couverture verrière - Un isolant thermique en polystyrène	[60]

	- Un coffre extérieur en bois, Une bouteille graduée en verre	
Distillateur solaire à mèche avec un réflecteur externe	- Un bac absorbant en tôle galvanisé - Une couverture verrière - Une isolation thermique en laine de verre ou en polystyrène expansé - Un miroir - Une bouteille graduée, De la tuyauterie en PVC	[61]

Application de la matrice de Pugh dans la sélection du distillateur solaire le plus adapté au contexte du sud de Madagascar

Groupe de recherche

La matrice de Pugh, un outil simple d'aide à la décision multicritère, est basée l'importance que donne un certain nombre de décideurs (clients, concepteurs ...) sur les critères de sélection [62]. Le groupe de recherche est composé de six chercheurs qui seront dénommés « Chercheur 1 » à « Chercheur 6 ». Ils ont été sélectionnés par l'équipe de recherche pour leurs connaissances et expériences dans le domaine de l'adduction d'eau potable dans le sud de Madagascar.

Démarche de construction de la matrice

La mise en place de la matrice de Pugh implique le suivi de six étapes méthodologiques rigoureuses.

➤ Étape 1

La première étape requiert l'agrégation d'une quantité maximale de données concernant le domaine d'étude en question. Cela implique des recherches approfondies visant à obtenir une compréhension exhaustive du sujet traité. Cette phase préliminaire a été réalisée à travers la revue de littérature.

➤ Étape 2

La seconde étape consiste à établir une liste des potentielles solutions parmi lesquelles un choix devra être fait. Pour cette étude, la liste est composée des sept distillateurs solaires présentés dans le paragraphe 3.2.

➤ Étape 3

Cette étape implique la définition des critères de sélection nécessaires à la prise de décision. Conformément aux informations exposées dans la partie consacrée à la revue de littérature, cinq grands critères (Tableau 2) ont été définis pour la comparaison des distillateurs solaires. Ces critères englobent le coût, la technologie utilisée, la qualité du distillat obtenu, les exigences de maintenance, et enfin la quantité produite d'eau distillée. Chacun de ces critères est subdivisé en plusieurs sous-critères.

Tableau 2: Critères et sous-critères de comparaison des distillateurs solaires

Catégorie de critères	Sous - critères	Numérotation des critères
Coût	Coût de l'installation	Sous-critère 1
	Durée de vie de l'installation	Sous-critère 2
Technologie	Facilité de réalisation	Sous-critère 3
	Moyen utilisé pour l'appoint d'eau et récupération du distillat	Sous-critère 4
	Fréquence de nettoyage des sels dans le distillateur	Sous-critère 5
	Facilité de l'installation pour le déplacement ou le déplacé sur un autre endroit	Sous-critère 6

Qualité distillat	Qualité de l'eau du distillat	Sous-critère 7
Maintenance	Disponibilité des Pièces de rechange sur les locaux	Sous-critère 8
	Cout de la maintenance	Sous-critère 9
	Fréquence de remplacement des pièces consommables	Sous-critère 10
	Facilité de Manipulation	Sous-critère 11
Débit de production	Quantité de distillat obtenue	Sous-critère 12
	Quantité de distillat proportionnellement à l'ensoleillement d'Ambovombe - Androy	Sous-critère 13

➤ Étape 4

La quatrième étape consiste en l'attribution des notes ou points de chaque sous-critère par les membres du groupe de recherche. Elle encadre la définition des facteurs de pondération qui déterminent l'importance relative attribuée à chaque sous-critère par les décideurs. Pour effectuer la pondération des critères et des sous-critères et déterminer leur niveau d'importance respectif, il est nécessaire de calculer la somme des notes données à chaque sous-critère par les membres du groupe de recherche. Le critère dont la somme des notes est minimale revêt une importance prééminente, car la notation de l'ordre d'importance durant le sondage s'étend de 1 à 13 (allant du plus important au moins important). Les totaux attribués à chaque sous-critère représentent leurs facteurs de pondération respectifs.

➤ Étape 5

La cinquième étape implique la sélection de la solution de référence. La sélection de cette référence peut se faire selon 3 grands principes différents :

- Choisir le concept existant et qui est actuellement en usage ; [63]
- Choisir le concept le plus simple ; [64]
- Choisir le concept ayant des performances moyennes par rapport aux autres concepts. [65]

Afin de mener à bien cette étape, le respect des consignes suivantes est important :

- Il faut s'assurer que le choix du concept de référence soit aussi impartial que possible pour éviter de biaiser les résultats [64].
- Il faut veiller à ce que le concept choisi soit un concept que chaque membre du groupe de recherche comprenne bien. Cela facilite les discussions et les comparaisons [66].
- Si les résultats montrent que le concept de référence choisi ne permet pas une comparaison claire, alors il faut faire preuve de flexibilité et reconsidérer le choix [65].

Dans cette étude, le dernier principe (sélection du distillateur solaire à performances moyennes) sera appliqué, car il permet d'identifier plus clairement les forces et les faiblesses des différents concepts [65].

➤ Étape 6

Et enfin, la sixième étape implique l'évaluation des propositions de solution en les notant en fonction de leurs sous-critères, comparativement à ceux de la solution de référence : si c'est inférieur/ égal/ supérieur à celui de la référence. Ensuite, la moyenne pondérée des notes de chaque solution est calculée. La meilleure solution est celle qui obtient la plus petite moyenne pondérée.

IV. RÉSULTATS

Synthèses des sept distillateurs solaires étudiés

Le tableau 3 présente les valeurs des sous-critères de chacun des distillateurs solaires, évalué par la revue de la littérature. Concernant le sous-critère 7 qui est la qualité de l'eau distillée obtenue, le pH est l'indicateur utilisé. Les eaux distillées obtenues à partir des sept distillateurs ont des pH compris entre 6,5 et 8,5 qui sont conformes à la norme de potabilité [67]. Le tableau 4 montre les résultats de l'étude économique menée sur chacun des distillateurs solaires. Les chiffres économiques ont été obtenus en ramenant les données dans la littérature dans le contexte du sud de Madagascar et l'estimation a été faite selon les contextes locaux des coûts (1€ = 4700 Ar / 1 USD\$ = 4400 Ar).

Tableau 3: Sous-critères des sept distillateurs solaires étudiés

	Distillateur solaire double pente	Distillateur solaire sphérique	Distillateur solaire à simple pente en cascade	Distillateur solaire à simple pente avec un réfracteur	Distillateur solaire à Film capillaire	Distillateur solaire incliné à mèche	Distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe
Cout de l'installation	245 000	960 000	315 000	360 000	280 000	350 000	420 000
Durée de vie de l'installation	3 ans	Illimitée	3 ans	3 ans	3 ans	3 ans	3 ans
Facilité de réalisation	Facile	Difficile : Nécessite des personnes spécialisées	Moyen : Nécessite de l'électricité	Facile	Moyen : difficulté sur l'installation de la couche de mèche	Facile	Facile
Moyen utilisé pour l'appoint d'eau et récupération du distillat	Facile	Facile	Moyen	Facile	Moyen	Facile	Facile
Fréquence de nettoyage des sels dans le distillateur	À chaque fin de production	À chaque fin de production	À chaque fin de production	À chaque fin de production	À chaque fin de production	À chaque fin de production	À chaque fin de production
Facilité de l'installation pour le déplacement ou le déplacé sur un autre endroit	Facile	Difficile	Facile	Moyen	Moyen	Facile	Moyen
Qualité de l'eau du distillat	pH=6,7	pH= 6,5	pH= 6,6	pH=6,8	pH=6,9	pH=6,5	pH=6,5
Disponibilité des Pièces de rechange sur les locaux	Disponible localement	Certaines pièces ne sont pas	Disponible localement	Disponible localement	Disponible localement	Disponible localement	Disponible localement

		disponibles					
Cout de la maintenance	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Fréquence de remplacement des pièces consommables	Peinture noire : 3 mois Vanne de robinet : 6 mois	Peinture noire : 3 mois Vanne de robinet : 6 mois	Peinture noire : 3 mois Vanne de robinet : 6 mois	Peinture noire : 3 mois Vanne de robinet : 6 mois	Peinture noire : 3 mois Vanne de robinet : 6 mois	Peinture noire : 3 mois Vanne de robinet : 6 mois	Peinture noire : 3 mois Vanne de robinet : 6 Mois
Facilité de Manipulation	Facile	Facile	Facile	Facile	Difficile	Difficile	Difficile
Quantité de distillat obtenue	5580	5200	2000	1235	11250	4700	5000
Quantité de distillat proportionnellement à l'ensoleillement journalier d'Ambovombe - Androy	- Radiation solaire : 6315 W/m ² - Quantité de distillat obtenu : 4848 ml	- Radiation solaire : 5710 W/m ² - Quantité de distillat obtenu : 4 996 ml	- Radiation solaire : 5780 W/m ² - Quantité de distillat obtenu : 1 899 ml	- Radiation solaire : 6750 W/m ² - Quantité de distillat obtenu : 1003 ml	- Radiation solaire : 6120 W/m ² - Quantité de distillat obtenu : 10 086 ml	- Radiation solaire : 6910 W/m ² - Quantité de distillat obtenu : 3732 ml	- Radiation solaire : 65670W/m ² - Quantité de distillat obtenu : 4 838 ml

Tableau 4 : Étude économique des distillateurs solaires

PARAMÈTRES	Distillateur solaire à simple pente en cascade	Distillateur solaire à simple pente avec un réfracteur	Distillateur solaire sphérique	Distillateur solaire incliné à mèche	Distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe	Distillateur solaire à film capillaire	Distillateur solaire à double pente
Facteur de recouvrement	0,42	0,28	0,33	0,42	0,42	0,42	0,42
Facteur de fonds d'amortissement	0,30	0,16	0,21	0,30	0,30	0,30	0,30
Cout d'investissement initial (Ar)	315000	360000	960000	350000	420000	280000	245000
Cout fixe annuel (Ar)	131150	99868	144863	145722	174867	116578	102005
Valeur de récupération (Ar)	63000	72000	88000	70000	84000	56000	49000
Valeur de récupération	18670	11334	18413	20744	24893	16596	14521

annuelle (Ar)							
Cout annuel de maintenance (Ar)	6558	4993	7243	7286	8743	5829	5100
Productivité annuelle moyenne (L)	680	420	1768	1598	1700	3825	1897
Cout annuel (Ar)	119037	93527	133694	132264	158717	105811	92585
Cout de l'eau distillée par kilogramme (Ar/kg)	18,15	18,73	18,46	18,15	18,15	18,15	18,15
Période de récupération de l'investissement (mois)	4,53	3,12	3,65	4,53	4,53	04,53	4,53
Durée de vie utile du distillateur (années)	3	5	4	3	3	3	3
Taux d'intérêt annuel (%)	12	12	12	12	12	12	12
Quantité d'eau par jour (L/j)	2	1,235	5,2	4,7	5	11,25	5,58

D'après les données présentées dans le tableau 4, le classement des distillateurs solaires en fonction de leur coût d'installation, par ordre décroissant, est établi comme suit : le distillateur solaire sphérique, le distillateur à mèche avec réflecteur, le distillateur à simple pente avec réflecteur, le distillateur incliné à mèche, le distillateur à simple pente en cascade, le distillateur à film capillaire, et enfin le distillateur à double pente. Concernant la productivité, le classement décroissant des distillateurs solaires se présente comme suit : le distillateur à film capillaire, le distillateur à double pente, le distillateur sphérique, le distillateur avec réflecteur, le distillateur à mèche, le distillateur à simple pente en cascade, et enfin le distillateur solaire à simple pente avec un réflecteur.

Choix du distillateur solaire de référence

Le choix du distillateur solaire de référence commence par la notation des critères par les membres du groupe de recherche [37]. Dans cette étude, les notes varient de 1 à 13 où l'ordre d'importance est décroissant. Si un chercheur donne la note 1 à un sous-critère, cela veut dire que selon lui, ce sous-critère est le plus important. S'il donne la note 13 à un sous-critère, cela veut dire que selon lui, ce sous-critère est le moins important. Le tableau 5 présente les notes données à chaque sous-critère.

Tableau 5: Notes (ordre d'importance) de chaque sous-critère données par les membres du groupe de recherche

	Chercheur 1	Chercheur 2	Chercheur 3	Chercheur 4	Chercheur 5	Chercheur 6	Total
Cout de l'installation	2	3	4	3	1	4	17
Durée de vie de l'installation	3	5	3	9	5	1	26
Facilité de réalisation	7	4	12	11	7	5	46
Moyen utilisé pour l'appoint d'eau et récupération du distillat	12	8	7	10	8	12	57
Fréquence de nettoyage des	9	10	8	12	13	13	65

sels dans le distillateur							
Facilité de l'installation pour le déplacement ou le déplacé sur un autre endroit	6	11	13	2	2	2	36
Qualité de l'eau du distillat	4	6	9	5	9	6	39
Disponibilité des Pièces de rechange sur les locaux	10	13	10	6	11	8	58
Cout de la maintenance	13	12	11	4	12	9	61
Fréquence de remplacement des pièces consommables	8	7	5	7	6	10	43
Facilité de Manipulation	11	9	6	8	10	3	47
Quantité de distillat obtenue	5	2	2	1	3	7	20
Quantité de distillat proportionnellement à l'ensoleillement d'Ambovombe - Androy	1	1	1	13	4	11	31

Il peut être remarqué qu'il y a une grande différence entre chaque total des notes. Le sous-critère ayant le plus petit total des notes est le plus important et celui ayant le plus grand total est le moins important. Le tableau 5 montre que chaque membre du groupe a fait différents choix selon l'importance qu'ils donnent aux critères. Pour éviter toute subjectivité, une seule personne ne peut pas établir cette pondération [37]. Pour mieux voir, le tableau 6 présente le triage du total des notes du plus petit jusqu'au plus grand, montrant ainsi l'ordre d'importance des sous-critères.

Tableau 6 : Ordre d'importance de chaque sous-critère

Sous-critère	Numérotation sous-critère	Total des notes trié du plus petit au plus grand	Ordre d'importance
Cout de l'installation	Sous-critère 1	17	1
Quantité de distillat obtenue	Sous-critère 12	20	2
Facilité de réalisation	Sous-critère 2	26	3
Quantité de distillat proportionnellement à l'ensoleillement de Fort – Dauphin	Sous-critère 13	31	4
Qualité de l'eau	Sous-critère 6	36	5
Disponibilité des Pièces de rechange sur le local	Sous-critère 7	39	7
Facilité de Manipulation	Sous-critère 10	43	8
Technique utilisée pour l'appoint d'eau et récupération du distillat	Sous-critère 3	46	9
Durée de vie de l'installation	Sous-critère 11	47	6

Fréquence de nettoyage des sels dans le distillateur	Sous-critère 4	57	10
Cout de la maintenance	Sous-critère 8	58	11
Fréquence de remplacement des pièces	Sous-critère 9	61	12
Facilité de l'installation pour le déplacement ou le déplacé sur un autre endroit	Sous-critère 5	65	13

Ce tableau 6 montre que le premier sous-critère le plus important est le coût de l'installation (sous-critère 1), le deuxième est la quantité de distillat obtenue (le sous-critère 12) et le troisième le plus important est le facilité de réalisation (sous-critère 2) dont les coefficients de pondération (somme des notes) sont respectivement 17, 20 et 26. Les sous-critères 8, 9 et 5 sont les moins importants.

Ensuite, les distillateurs solaires ont été évalués selon les trois sous-critères les plus importants (1, 12, 2). Les critères 1 et 12 seront notés de 1 à 7 puisqu'il y a sept distillateurs. Pour le sous-critère 1, 1 est la note du distillateur solaire ayant le coût de l'installation le plus bas, et 7 le plus élevé. Pour le sous-critère 12, 1 est la note du distillateur solaire ayant produit la quantité de distillat la plus élevée, et 7 la plus basse. Le sous-critère 2 sera noté de 1, 2 et 3, car il n'existe que 3 choix possibles sur la facilité de réalisation. Pour ce sous-critère 2, 1 est la note si le distillateur solaire est facile à réaliser, 2 s'il n'est ni facile ni difficile à réaliser et 3 s'il est difficile à réaliser. Le tableau 7 présente l'évaluation de chaque distillateur solaire selon les trois sous-critères les plus importants.

Tableau 7: Évaluation des distillateurs solaires selon les trois sous-critères les plus importants

Distillateurs solaires	Cout de l'installation		Quantité de distillat obtenue		Facilité de réalisation	
	Valeur (Ar)	Note	Valeur (ml)	Note	Valeur	Note
Distillateur solaire à simple pente en cascade	315000	4	2000	6	Moyen	2
Distillateur solaire à simple pente avec réfracteur	235000	1	1235	7	Facile	1
Distillateur solaire sphérique	960000	7	5200	3	Difficile	3
Distillateur solaire à mèche	360000	5	4700	5	Facile	1
Distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe	420000	6	5000	4	Facile	1
Distillateur solaire à film capillaire	280000	3	11250	1	Moyen	2
Distillateur solaire à double pente	245000	22	5580	2	Facile	1

Afin de bien évaluer les distillateurs, il faut calculer la moyenne pondérée de leurs notes respectives [68]. Cela se calcule avec la formule 1 suivante :

$$\text{Moyenne pondérée} = \frac{\sum(\text{note du sous-critère} \times \text{son coefficient})}{\sum \text{coefficient}} \quad (1)$$

Le tableau 8 présente la moyenne pondérée de chaque distillateur solaire en les rangeant de la plus petite moyenne jusqu'à la plus grande. Celui ayant la plus petite moyenne sera choisi comme distillateur de référence, car c'est celui qui présente les meilleurs résultats pour les sous-critères le plus importants [37].

Tableau 8 : Moyennes pondérées des notes de chaque distillateur solaire

Distillateurs solaires	Coût de l'installation	Quantité de distillat obtenue	Facilité de réalisation	Moyenne pondérée
Coefficient de pondération	17	20	26	
Distillateur solaire à double pente	2	2	1	1,59
Distillateur solaire à film capillaire	3	1	2	1,95
Distillateur solaire à simple pente avec réfracteur	1	7	1	2,90
Distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe	6	4	1	3,30
Distillateur solaire incliné à mèche	5	5	1	3,35
Distillateur solaire à simple pente en cascade	4	6	2	3,81
Distillateur solaire sphérique	7	3	3	4,08

D'après ce tableau 8, le distillateur solaire ayant des performances moyennes est le distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe dont la moyenne pondérée est de 3,30.

Remplissage de la matrice

Il convient de rappeler que cette étape consiste à noter chaque distillateur solaire en comparaison avec le distillateur de référence. La notation se fait comme suit :

- note 1 : si le sous-critère du distillateur solaire est meilleur que celui de la référence ;
- note 2 : si le sous-critère du distillateur solaire présente le même niveau que celui de la référence ;
- note 3 : si le sous-critère du distillateur solaire est moins bien que celui de la référence.

Le tableau 9 présente les notes et les moyennes pondérées des distillateurs solaires par rapport au distillateur de référence.

Tableau 9 : Notes et moyennes pondérées des distillateurs solaires (DS) par rapport au distillateur de référence

Sous-critère	Pondération des critères	Distillateur solaire de référence : le distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe	DS à double pente	DS à simple pente avec réfracteur	DS à simple pente en cascade	DS à film capillaire	DS sphérique	DS incliné à mèche
Cout de l'installation	17		1	2	1	1	3	2
Durée de vie de l'installation	26		2	1	2	2	3	2
Facilité de réalisation	46		1	1	2	2	3	1
Moyen utilisé pour l'appoint d'eau et récupération du distillat	57		2	2	3	3	2	2
Fréquence de nettoyage des sels	65		2	2	2	2	2	2

dans le distillateur								
Facilité de l'installation pour le déplacement ou le déplacé sur un autre endroit	36		1	2	1	2	3	1
Qualité de l'eau du distillat	39		1	1	1	1	1	1
Disponibilité des Pièces de rechange sur les locaux	58		1	1	1	1	3	1
Cout de la maintenance	61		1	1	1	1	1	1
Fréquence de remplacement des pièces consommables	43		2	2	2	2	2	2
Facilité de Manipulation	47		1	1	1	3	1	3
Quantité de distillat obtenue	20		2	3	3	1	2	2
Quantité de distillat proportionnellement à l'ensoleillement d'Ambovombe - Androy	31		2	3	3	1	2	2
Total	546	Moyennes pondérées	1.44	1.59	1.73	1.78	2.07	1.65

Ce tableau 9 permet de classer les distillateurs solaires selon leur moyenne pondérée. Celui ayant la plus petite moyenne pondérée est le distillateur solaire à double pente (moyenne pondérée= 1,44). Arrive ensuite le distillateur solaire à simple pente avec réfracteur (moyenne pondérée= 1,59), puis le distillateur solaire incliné à mèche (moyenne pondérée= 1,65), le Distillateur solaire à simple pente en cascade (moyenne pondérée= 1,73), puis le distillateur solaire à film capillaire (moyenne pondérée= 1,78) et enfin le distillateur solaire sphérique (moyenne pondérée= 2,07).

V. DISCUSSION

Pour contribuer efficacement à la lutte contre la pénurie d'eau dans le sud de Madagascar, il est nécessaire de sélectionner et d'appliquer une stratégie qui prend en considération les besoins spécifiques et les contraintes de la région. Celle-ci se caractérise par un ensoleillement important, ce qui rend l'utilisation de distillateurs solaires particulièrement propice. Ces dispositifs s'avèrent adaptés pour le sud de Madagascar du fait de leur indépendance vis-à-vis de l'énergie électrique, une ressource difficilement accessible dans cette zone. Sept types de distillateurs solaires (le DS à simple pente avec réfracteur, le DS à cascade, le DS à

mèche, le DS à mèche avec réflecteur externe, le DS sphérique, le DS à film capillaire et le DS à double pente) ont été étudiés afin de déterminer celui qui est le mieux adapté au contexte établi. Pour orienter au mieux la décision, l'outil de décision "matrice de Pugh" a été employé.

Suite à une analyse approfondie, les sous-critères d'évaluation les plus importants sont le coût d'installation, la facilité de réalisation, la quantité d'eau distillée obtenue et la durabilité. Ils sont essentiels pour une adoption réussie dans les conditions du sud de Madagascar. L'importance des sous-critères "coût d'installation" et "facilité de réalisation" vient du fait que plusieurs parties du sud de Madagascar font face à une grande pauvreté. L'un des objectifs de cette étude étant de sélectionner le distillateur solaire qui soit facilement reproductible et utilisable par la population, ces sous-critères sont cruciaux. Par contre, pour les entreprises privées pouvant facilement trouver des financements, le coût d'installation est moins important. Quant au sous-critère "quantité d'eau distillée", son importance vient du besoin élevé en eau potable de la zone et de la difficulté rencontrée par la population pour en avoir.

Dans cette étude, le distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe est choisi comme référence, puisqu'il présente des performances moyennes par rapport à celles des autres distillateurs. Les valeurs des critères de ces derniers ont alors été comparées avec celles du distillateur de référence. Les résultats montrent des différences notables entre les différents modèles de distillateurs solaires.

Le distillateur solaire ayant la plus petite moyenne pondérée est le **distillateur solaire à double pente (1,44)**. Il se distingue par son coût d'installation relativement bas et sa facilité de réalisation et de manipulation. Ces critères font de ce distillateur un choix attractif pour des communautés rurales du Sud ayant un budget limité. Sa moyenne pondérée la plus basse vient du fait qu'il a sept notes de 1 (c'est-à-dire que pour sept critères, il est meilleur que la référence), six notes de 2 (c'est-à-dire que pour ces six critères, il présente les mêmes performances que la référence), et zéro note de 3. Cependant, sa durabilité pourrait poser problème à long terme.

Le distillateur solaire ayant la deuxième plus petite moyenne pondérée est celui **à simple pente avec réfracteur (1,59)**. Il présente de meilleurs résultats que le distillateur de référence sur la durabilité, la qualité de l'eau distillée obtenue et la facilité de réalisation et de maintenance. En ce qui concerne sa productivité journalière, elle est nettement inférieure à celle du distillateur de référence (1235 ml/j contre 5000 ml/j). Toutefois, le réfracteur améliore l'efficacité énergétique, ce qui est crucial dans une région à fort ensoleillement comme Ambovombe-Androy.

Les distillateurs solaires ayant les troisième, quatrième, et cinquième plus petites moyennes pondérées sont respectivement celui incliné à mèche (1,65), à simple pente en cascade (1,73) et à film capillaire (1,78). Ils ont tous des coûts de réalisation et de maintenance relativement faibles, et sont faciles à réaliser et à manipuler. Le distillateur solaire incliné à mèche possède l'avantage d'avoir une meilleure absorption d'eau (grâce aux mèches), mais présente un défi en termes de durabilité. Quant au distillateur solaire en cascade, il présente des inconvénients en termes de récupération du distillat et de fréquence de nettoyage. Pour le distillateur solaire à film capillaire, il produit une quantité de distillat relativement élevée. Par contre, son principal inconvénient est la nécessité fréquente d'entretien. En effet, les films capillaires peuvent être sujets à un encrassement rapide dans des conditions de forte salinité.

Le distillateur solaire sphérique est celui ayant la plus grande moyenne pondérée (2,07). Cette note est due au fait que ce distillateur solaire présente les coûts d'installation et de maintenance les plus élevés. Il est également difficile à réaliser et ses composants ne sont pas disponibles localement (notamment les demi-sphères en Plexiglas dont la conception nécessite des personnes spécialisées). Dans le cadre du sud de Madagascar, ses coûts élevés peuvent limiter son adoption, mais il pourrait être adapté pour des applications spécifiques nécessitant une production de haute qualité d'eau distillée.

En considérant ces résultats, le **distillateur solaire à double pente** se révèle être le plus adapté pour les conditions du sud de Madagascar. Sa valeur moyenne pondérée la plus basse indique qu'il a une performance globale supérieure sur plusieurs critères importants. Le **distillateur solaire à simple pente avec réfracteur** est également un choix viable, offrant une durabilité supérieure et une facilité de réalisation.

Cette étude fournit une base solide pour les futures décisions d'investissement et de déploiement de technologies de distillation solaire adaptées aux conditions spécifiques du sud de Madagascar. Afin de maximiser leur efficacité et leur durée de vie, une attention particulière doit être accordée à la formation des utilisateurs locaux sur l'entretien et l'opération de ces systèmes. Cette

étude démontre également l'applicabilité et l'efficacité de l'utilisation d'outil de décision telle que la matrice de Pugh dans la sélection de stratégie pour la lutte contre la pénurie d'eau dans le monde.

Il est essentiel de reconnaître certaines limites dans ce travail de recherche. L'évaluation des conceptions de distillateurs solaires s'est limitée à un ensemble restreint de critères, tandis que l'exploration des technologies innovantes demeure à approfondir. Des études ultérieures pourraient ainsi intégrer des variables additionnelles et se pencher plus profondément sur les nouvelles avancées technologiques. Il est également important de noter que cette étude s'est concentrée exclusivement sur le contexte spécifique du sud de Madagascar, ce qui implique que les résultats obtenus pourraient ne pas directement s'appliquer à d'autres régions caractérisées par des conditions environnementales et socioéconomiques différentes. Il est donc recommandé de faire preuve de prudence lors de toute extrapolation des conclusions à d'autres zones géographiques.

L'utilisation du distillateur solaire à double pente aura des répercussions significatives sur l'amélioration de la qualité de vie au quotidien de la population vulnérable du sud de Madagascar. Cela se traduira par des retombées positives tant sur le plan économique, avec une plus grande indépendance vis-à-vis des organismes de distribution et de vente d'eau, que sur le plan social, en permettant un accès plus aisé à de l'eau potable et en réduisant les risques de maladies liées à l'utilisation d'une eau de qualité douteuse. En adoptant et en mettant en œuvre la conception recommandée de distillateur solaire, la région du sud de Madagascar peut non seulement améliorer l'accès à l'eau potable, mais également renforcer l'autonomie des communautés locales. Les résultats issus de cette étude fournissent des orientations et des enseignements précieux aux différents acteurs impliqués dans le développement de solutions durables pour pallier la rareté d'eau dans les régions déficitaires en la ressource.

VI. RECOMMANDATIONS

Pour les travaux de recherche à venir, il serait bénéfique d'inclure des critères additionnels, tels que l'évolutivité et la durabilité environnementale, afin de proposer une évaluation plus exhaustive des distillateurs solaires. Une approche plus holistique permettra de mieux appréhender la performance de ces dispositifs dans leur intégralité, prenant en compte des considérations allant au-delà des aspects strictement techniques.

Il est également préconisé d'explorer les possibilités d'incorporer des technologies novatrices, telles que les alimentations automatisées de saumures ou les systèmes de filtration avancés, dans le dessein d'optimiser l'efficacité et la productivité des distillateurs solaires. Ces avancées technologiques pourraient offrir des pistes prometteuses pour renforcer les performances des distillateurs solaires, les rendant plus efficaces, durables et adaptés aux besoins spécifiques des régions où ces dispositifs sont déployés.

VII. CONCLUSION

L'objectif de cette recherche s'est focalisé sur l'application de la méthodologie de la matrice de Pugh afin de sélectionner des distillateurs solaires adaptés au contexte spécifique, à la fois climatique et socioéconomique, du sud de Madagascar. Cette étude a impliqué une évaluation de sept différentes conceptions de distillateurs solaires en se basant sur un ensemble de critères variés, comprenant, entre autres, le coût, la technologie employée, la qualité de l'eau distillée obtenue, la durabilité dans le temps et le débit de production. Cette évaluation a été conduite par un groupe de recherche composé de six chercheurs.

L'évaluation des conceptions de distillateurs solaires à travers l'utilisation de la matrice de Pugh a permis une comparaison et une classification méthodiques des divers modèles étudiés. Selon les résultats obtenus à partir de la matrice de Pugh, le distillateur solaire à double pente a révélé la moyenne pondérée la plus basse. Cela signifie que, parmi les divers types de distillateurs solaires examinés, il est le plus apte à répondre aux besoins en eau dans la région. Ses atouts résident notamment dans sa praticité : son coût compétitif, sa facilité d'installation et d'entretien, ainsi que la disponibilité locale de ses composants. Toutefois, la formation des populations locales, sur l'utilisation et l'entretien du distillateur solaire, est essentielle pour s'assurer de sa durabilité et de sa performance.

Il convient également de souligner que cette recherche démontre l'applicabilité fructueuse de la méthode de la matrice de Pugh pour la sélection de distillateurs solaires appropriés au contexte spécifique du sud de Madagascar. Cette étude contribue à l'enrichissement des connaissances existantes sur les distillateurs solaires et leur rôle crucial dans le domaine de lutte contre la pénurie d'eau et offre une approche systématique pour évaluer et classer les conceptions de distillateurs solaires selon divers paramètres. Les implications de cette recherche ont le potentiel d'éclairer les processus décisionnels et de soutenir la mise en œuvre de solutions durables en matière d'eau dans cette région. Les points forts de l'approche systématique, la prise en compte des

spécificités locales et la contribution à la littérature scientifique font de cette recherche une ressource précieuse pour les chercheurs, les praticiens et les décideurs engagés dans la promotion de solutions durables pour l'accès à l'eau.

VIII. REMERCIEMENTS

Nous adressons nos sincères remerciements à l'entreprise sociale TATIRANO pour son support. Sans son appui inestimable, cette étude n'aurait jamais pu être réalisée.

REFERENCES

- [1] Médecins sans frontières, Madagascar : dans le Grand Sud, la longue marche vers l'eau, 2022, [en ligne] <https://www.msf.fr/actualites/madagascar-dans-le-grand-Sud-la-longue-marche-vers-l-eau> consulté le 16/05/2024
- [2] Charmoille, A. (2016). Accès à l'eau dans le « Grand Sud » de Madagascar. Evaluation du potentiel hydrogéologique au niveau des zones d'intervention de l'ONG AVSF, Projets : ZOLOKE, SOHAVELO et FANANTENANA, [Rapport de recherches]
- [3] Ran'Eau, Médecins Sans Frontières, Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène, pS-Eau, Compte Rendu « L'Alimentation en Eau dans l'Extrême Sud », 2023
- [4] Banque Mondiale, Analyse Comparative de la Situation Socio-économique dans le Sud de Madagascar, 2017
- [5] Heland, J., Folke, C. (2014). A social contract with the ancestors—Culture and ecosystem services in southern Madagascar, *Global Environmental Change*, Volume 24, Pages 251-264, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.11.003>
- [6] Zambiazzi, E. et al. (2023). Centering community-based knowledge in food security response and climate resilience in southern Madagascar, *Front. Sustain. Food Syst.*, Sec. Social Movements, Institutions and Governance, Volume 7 |
- [7] Dunglas, J. (2014). Le dessalement de l'eau de mer – Une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau, *Académie d'Agriculture de France*
- [8] Tansakul, C. (2009). *Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse* (Doctoral dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse)
- [9] La Cité de la Mer, (2012). La mer à boire, Dossier médiathèque Archi'Média- Technopole Cherbourg-Normandie
- [10] Christian Wolkersdorfer, (2022). From Ground Water to Mine Water Environmental Hydrogeology in Mining, Mine Water Treatment, *Documanta Stadt Kassel*, Tshwane University of Technology
- [11] Li, C. et al. (2013), Solar assisted sea water desalination: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 136–163, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.059>
- [12] Sharon, H. et Reddy, K. S. (2015). A review of solar energy driven desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080–1118, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.002>
- [13] Shoeibi, S. et al. (2020), Application of simultaneous thermoelectric cooling and heating to improve the performance of a solar still: An experimental study and exergy analysis. *Applied Energy*, 263, 114581, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114581>
- [14] Chauhan, A. et Saini, R. P. (2015). Renewable energy based off-grid rural electrification in Uttarakhand state of India: Technology options, modelling method, barriers and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 662–681, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.043>
- [15] Bechki, D. (2011) Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes, Thèse de Doctorat, FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA
- [16] Abdullah, A. S. et al. (2024). Enhancing the performance of tubular solar stills for water purification: A comprehensive review and comparative analysis of methodologies and materials, *Results in Engineering* 21 101722, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101722>

- [17] Robert, F. (2017). Sunlight-powered purifier could clean water for the impoverished Solar still could aid victims of natural disasters, *Sciences*, <https://doi.org/10.1126/science.aal0699>
- [18] Saida, F. (2008). Modélisation Et Conception D'un Distillateur Solaire Des Eaux Saumâtres A Bas Coût Pour Les Communautés Rurales, Mémoire de Master, Université de Batna
- [19] Brahim, L. ; Chouchene, S. (2014). Fabrication et Expérimentation d'un Distillateur solaire sphérique, *Troisième Congrès Tunisien de Mécanique*
- [20] Deghfel, F. ; Chagra, S. (2019). Etude expérimentale d'un distillateur solaire à mèche avec réflecteur externe, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf – M'Sila
- [21] Guler, K. ; Petrisor, M. D. (2021), A Pugh Matrix based product development model for increased small design team efficiency, *Cogent Engineering*, 8: 1923383 19. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1923383>
- [22] Souriau, J. ; Lejars, C. ; Canneva, G. (2010). Les services d'eau potable et d'assainissement face aux exigences du développement durable : traduire les concepts en outils. <https://doi.org/10.13140/2.1.5006.7847>
- [23] Zaman, E. Dayer ; Hazim H. H. Al-Saleem (2018). Diagnostic of Water Purity by Using Solar Distiller, *Al-Mustansiriyah Journal of Science*, Volume 29, Issue 2, 23. <https://doi.org/10.23851/mjs.v29i2.348>
- [24] Omar, B. (2014). Étude Énergétique D'un Distillateur Solaire Multi-Étages, Mémoire de Master, Université de BATNA Algérie
- [25] Settafi, M. ; Zatout, I. (2021), Effet de quelques paramètres climatiques et opératoires sur la performance d'un distillateur solaire à parois vitrées, Mémoire de Master, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA
- [26] Guemari, S. ; Touahir, R. (2013). Amélioration de rendement d'un distillateur solaire, Université Kasdi Merbah Ouargla
- [27] Alwan, N.T. ; Shcheklein, S.E. ; Ali, O. M. (2021). Evaluation of distilled water quality and production costs from a modified solar still integrated with an outdoor solar water heater, *Case Studies in Thermal Engineering*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101216>
- [28] Fadl, A.E. et al., (2022). Improving the pyramid solar distiller performance by using pyramidal absorber, mirrors, condenser, and thermal storing material, *Case Studies in Thermal Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102515>
- [29] Hammoodi, K.A.; Dhahad, H.A.; Alawee, W.H.; Omara, Z.M.; Yusaf, T. (2023). Pyramid solar distillers: A comprehensive review of recent techniques, *Results in Engineering*, Volume 18, 2023, 101157, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101157>
- [30] Elshamy, S. M. et al. (2021). Performance assessment of a solar water distiller using circular parabolic absorber: An experimental investigation, *Case Studies in Thermal Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101508>
- [31] Singh, A. K. ; Yadav, R. K. ; Mishra, D. ; Prasad, R. ; Gupta, L. K. ; Kumar, P. (2020). Active solar distillation technology: A wide overview. *Desalination*, 493, 114652. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114652>
- [32] Saxena, A.; Cuce, E.; Kabeel, A. E.; Abdelgaied, M.; Goel. V. (2022). A thermodynamic review on solar stills, *Solar Energy*, Volume 237, 2022, Pages 377-413, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.001>
- [33] Saleh, B.; Essa, F.A.; Omara, Z.M.; Ahmed, M.H.; El-Sebaey, M.S.; Stephen, M.T.; Sundar, L.S.; Qasim, M.A.; Ramana, E.V.; Shanmugan, S.; et al. (2023) Using Direct Solar Energy Conversion in Distillation via Evacuated Solar Tube with and without Nanomaterials. *Processes* 2023, 11, 1734. <https://doi.org/10.3390/pr11061734>
- [34] Badran, O. ; Alahmer, A. ; Faik, A. H. ; Yousif, E.-T. ; Ghazi, Al-Marahle, Hamed, M.A. Al-Ahmadi (2023). Enhancement of solar distiller performance by photovoltaic heating system, *International Journal of Thermofluids*, Volume 18, 2023, 100315, ISSN 2666-2027, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100315>
- [35] Ahmed, M. M. Z., Alshammari, F., Abdullah, A. S., & Elashmawy, M. (2021). Basin and tubular solar distillation systems: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 150, 157–178. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.015>

- [36] Khadim, M.A.A.A. et al (2020) IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 928022046, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/2/022046>
- [37] Andrianambahy, A. L. (2022). Projet d'étude comparative des distillateurs solaires à effet de serre en vue de la production d'eau potable dans la région d'Ambovombe-Androy au sein de l'ONG TATIRANO, Mémoire de Master, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo
- [38] Monteiro, J. ; Baptista, A. ; Pinto, G. ; Ribeiro, L. ; Mariano, H. (2020). Assessment of the Use of Solar Desalination Distillers to Produce Fresh Water in Arid Areas, *Sustainability* 2020, 12, 53, <https://doi.org/10.3390/su12010053>
- [39] Ranjan, K. R. ; Kaushik, S. C. (2013). Energy, exergy and thermo-economic analysis of solar distillation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 709–723. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.025>
- [40] Prasanna, Y.S. ; Deshmukh, S.S. (2021). Solar Distillation Systems Enriched With Machine Learning Techniques: A Review. *Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 8B: Energy*
- [41] Kalogirou, S.A.(2024). Chapter 8 - Solar Desalination Systems, *Solar Energy Engineering (Third Edition)*, Academic Press, Pages 441-493, ISBN 9780323993500
- [42] Chaichan, M. T. ; Kazem, H. A. ; Al-Waeli, A. H. A. ; Elawee, W. H. ; Fayad, M. A. ; Sopian, K. (2024). Advanced techniques for enhancing solar distiller productivity: a review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 736–772
- [43] Tian-Lu Zhu et al. (2022). Research on the Design of Surgical Auxiliary Equipment Based on AHP, QFD, and PUGH Decision Matrix, *Mathematical Problems in Engineering*, <https://doi.org/10.1155/2022/4327390>
- [44] Gerrit Muller, (2012). Validation of Systems Engineering Methods and *Techniques in Industry*, *Procedia Computer Science*, Volume 8 ,Pages 321-326, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.01.067>
- [45] Olabanji, O.M. ; Mpofu, K. (2020). Fusing Multi-Attribute Decision Models for Decision Making to Achieve Optimal Product Design, *Foundations Of Computing And Decision Sciences*, Vol. 45 (2020) No. 4, 305-337, <https://doi.org/10.2478/fcds-2020-0016>
- [46] Asmae, A. ; Hussain, B. -A. ; Souhail, S. ; Moukhtar, Z. E. (2017). A fuzzy ontology-based support for multi-criteria decision-making in collaborative product development, *Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, Fez, Morocco, 2017, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ISACV.2017.8054953>
- [47] Lønmo, L., Muller, G. (2014). 7.1.2 Concept Selection - Applying Pugh Matrices in the Subsea Processing Domain. *INCOSE International Symposium*, 24(1), 583–598. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2014.tb03169.x>
- [48] Madke, Pranita & Jaybhaye, Maheshwar. (2016). Application of Pugh Selection Matrix for Fuel Level Sensing Technology Selection.
- [49] Rigden, A. ; Golden, C. ; Chan, D. ; Huybers, P. (2024). Climate change linked to drought in Southern Madagascar, *npj Climate and Atmospheric Science*, 7:41 ; <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00583-8>
- [50] Zambiazzi, E. ; Carr, E. ; Mahazotahy, S., Mahafake, C. ; Dickey, C. (2023) Centering community-based knowledge in food security response and climate resilience in southern Madagascar, *Front. Sustain. Food Syst., Sec. Social Movements, Institutions and Governance*, Volume 7 - 2023 | <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1234588>
- [51] Howe, E. D. ; Tleimat, B. W. (1967). Solar distillers for use on coral islands. *Desalination*, 2(1), 109–115. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(00\)80151-4](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(00)80151-4)
- [52] Instat Madagascar (2018), Troisième recensement général de la population et de l'habitation (RGPH-3), Résultats globaux du recensement général de la population et de l'habitation de 2018 de Madagascar, Tableaux Statistiques
- [53] Centre De Recherches, D'études Et D'appui A L'analyse Economique À Madagascar, MONOGRAPHIE RÉGION ANDROY, 2013

- [54] Ministère de l'Environnement et des Forêts Madagascar, La région de l'Androy et de l'Anosy face au projet de renforcement des sites web CHM
- [55] Brisset, N. (2022). Prospection hydrogéologique sur l'Androy pour la réalisation de six forages prospectifs, MSF France
- [56] Randriatsiferana, S. R., (2023) ATELIER SUR LA SITUATION DE L'ALIMENTATION EN EAU DANS L'EXTRÊME SUD, *Atelier Sur La Situation De L'alimentation En Eau Dans L'extrême Sud* du 23 au 24 mai 2023 à Ambovombe, Ministère de l'eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène Madagascar
- [57] BECHKI, D. (2011). Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d ' eau potable dans les zones arides sahariennes. [Thèse de Doctorat] p. 185
- [58] Bellet, N. ; Tabet, I. (2012). Etude, réalisation et simulation numérique d'un distillateur solaire à cascade, *Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa (2012)* 49 – 57
- [59] Khechekhouche, A. ; Boukhari, A. (2016). L'effet d'un réfracteur sur la productivité d'un distillateur solaire à simple pente, *Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables*
- [60] Laifa, I. (2018). Etude expérimentale d'un distillateur solaire à mèche, [Mémoire de Master], *Université Mohamed Boudiaf - M'sila*
- [61] Deghfel, F. ; Chagra, S. (2019). Étude expérimentale d'un distillateur solaire à mèche avec un réflecteur externe, [Mémoire de Master], *Université Mohamed Boudiaf - M'sila*
- [62] Guide des meilleures pratiques, La matrice de Pugh
- [63] Burge, S. (2009). The Systems Engineering Tool Box
- [64] Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D. (2012). Product Design and Development, McGraw-Hill.
- [65] Pugh, S. (1990). Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. Addison-Wesley.
- [66] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H. (1996). Engineering Design, A Systematic Approach, Springer
- [67] Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable (2015). Le pH de l'eau potable, *Santé Canada*,
- [68] Chools (2021), Pugh Matrix.