

Potentiel Et Performance Des Distillateurs Solaires Pour L'eau Potable Dans Le Sud Aride De Madagascar : Revue PRISMA

Manampy Randrianantenaina¹, Tsiry Angelos Andriamanampisoa², Kelly Wang Djack Henderson Binguir³,

Edouard Ravalison Andrianarison⁴

^{1, 2, 3, 4} Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique, 101 Antananarivo-Madagascar

Auteur correspondant : Manampy Randrianantenaina



Résumé : Le développement économique mondial repose sur l'accès à l'eau douce, ressource critique dans les régions arides et semi-arides. À Madagascar, cette problématique est particulièrement aiguë dans le Sud, où seulement 12% des établissements scolaires publics disposent d'infrastructures d'hygiène, d'assainissement et d'approvisionnement en eau fonctionnelles. Ce territoire, marqué par une pluviométrie inférieure à 400 mm/an et un ensoleillement supérieur à 2 800 h/an, présente un fort potentiel pour la distillation solaire. Une revue systématique conforme aux lignes PRISMA a porté sur 55 études publiées entre 2015 et 2025, sélectionnées parmi 262 articles de Google Scholar, ResearchGate et ScienceDirect. Les travaux retenus concernaient la conception, la performance et les applications des distillateurs solaires en zones arides. Les données, traitées sous Microsoft Excel, incluaient productivité journalière, irradiance solaire, matériaux et paramètres d'optimisation. Les résultats indiquent une productivité moyenne de $3,82 \pm 2,21 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ pour les distillateurs passifs (67,3%), $7,35 \pm 5,58$ pour les actifs (21,8%) et $6,02 \pm 3,67$ pour les hybrides (10,9%). L'ANOVA a révélé un effet significatif du type de distillateur ($F(2,52)=5,445$, $p=0,007$), confirmant la prédominance de la configuration technologique sur l'irradiance solaire. Ces résultats démontrent la pertinence et la faisabilité des distillateurs solaires pour le Sud de Madagascar. L'utilisation de matériaux locaux réduit les coûts et facilite la maintenance, tandis que les perspectives incluent le développement de prototypes hybrides, essais pilotes in situ et renforcement des compétences locales.

Mots-clés : Ressource en eau, irradiance solaire, matériaux locaux

Abstract: Global economic development critically depends on access to freshwater, a scarce resource in arid and semi-arid regions. In Madagascar, this challenge is acute in the southern region, where only 12% of public schools are equipped with functional WASH infrastructure. Characterized by annual rainfall below 400 mm and solar irradiance exceeding 2,800 hours per year, this area offers significant potential for solar distillation technologies. A systematic review adhering to PRISMA guidelines was conducted on 55 studies published from 2015 to 2025, selected from 262 articles identified via Google Scholar, ResearchGate, and ScienceDirect. The selected works focused on the design, performance, and practical applications of solar distillers in arid environments. Key data extracted and analyzed with Microsoft Excel included daily productivity, solar irradiance, materials, and optimization parameters. Results revealed average daily productivities of $3.82 \pm 2.21 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ for passive distillers (67.3%), 7.35 ± 5.58 for active distillers (21.8%), and 6.02 ± 3.67 for hybrid systems (10.9%). ANOVA indicated a significant effect of distiller type ($F(2,52) = 5.445$, $p = 0.007$), underscoring the dominant influence of technological configuration over solar irradiance. This quantitative synthesis confirms the feasibility and suitability of solar distillation for water provision in southern Madagascar. Utilizing local materials lowers costs and facilitates maintenance, while future directions include hybrid prototype development, in situ pilot testing, and strengthening of local technical capacities.

Keywords: Water resource, solar irradiance, local materials

I. INTRODUCTION

Le développement économique d'un pays repose principalement sur la disponibilité et la gestion durable des ressources en eau. Élément vital pour la vie, l'eau est indispensable à l'agriculture, à l'industrie et aux infrastructures humaines. Pourtant, malgré la prédominance apparente de l'eau sur Terre, sa répartition demeure profondément inégale. En effet, 97 % des réserves mondiales sont constituées d'eau salée, tandis que près de 2 % sont emprisonnées dans les glaciers et les calottes polaires. Seul 1 % de l'eau de la planète est douce et directement accessible pour répondre aux besoins agricoles, domestiques et industriels [1]. Cette infime proportion d'eau exploitable souligne l'urgence d'identifier des solutions technologiques capables d'en optimiser l'utilisation.

À Madagascar, l'accès à l'eau potable et à des services d'assainissement adéquats constituent un enjeu structurel majeur. Les rapports sectoriels récents classent le pays parmi les quatre nations les plus défavorisées au monde en matière de couverture EAH (Eau, Assainissement, Hygiène). Seuls 51 % des habitants disposent d'une source d'eau améliorée, contre une moyenne de 68 % en Afrique subsaharienne, et moins de 10 % bénéficient d'un service d'assainissement de base. Cette situation est encore plus critique dans le Sud du pays, où seulement 12 % des établissements scolaires publics disposent d'infrastructures EAH fonctionnelles [2]. Ce déficit structurel compromet directement la santé publique, la sécurité alimentaire et le développement socio-économique des communautés locales.

Le Sud de Madagascar présente des caractéristiques climatiques extrêmes qui accentuent la précarité hydrique. La région se distingue par un climat aride à semi-aride, marqué par une pluviométrie annuelle inférieure à 400 mm, concentrée sur trois mois seulement (janvier à mars), suivie d'une sécheresse prolongée [3]. Les températures, comprises entre 30 et 35 °C, combinées à un fort rayonnement solaire — plus de 2 800 heures d'ensoleillement par an [4] — intensifient l'évaporation et réduisent la disponibilité en eau douce [5]. Toutefois, l'épuisement rapide des eaux superficielles et la vulnérabilité des nappes phréatiques face aux sécheresses récurrentes imposent la mise en œuvre de stratégies innovantes d'approvisionnement en eau [6].

Dans ce contexte, l'adoption de technologies autonomes et durables, adaptées aux conditions climatiques extrêmes du Sud malgache, apparaît comme une voie prioritaire. Les distillateurs solaires, fondés sur le principe d'évaporation-condensation naturelle, offrent une solution écologiquement responsable et économiquement accessible pour la production d'eau potable à petite échelle. Utilisant exclusivement l'énergie solaire, ces systèmes ne nécessitent pas de source d'énergie externe, ce qui en fait des dispositifs particulièrement adaptés aux zones isolées. Ainsi, pour évaluer les performances des systèmes de distillation solaire et analyser de manière critique leur pertinence, leur faisabilité et leur applicabilité dans le contexte climatique et socio-économique de Sud de Madagascar, le présent article propose une revue systématique des publications scientifiques, à accès ouvert, parues entre 2015 et 2025, sur ces technologies.

II. METHODOLOGIE

La stratégie de recherche constitue une étape déterminante dans l'élaboration d'une revue systématique, dans la mesure où elle conditionne directement l'identification et la sélection des études pertinentes. Dans le cadre de la présente revue, la conception de cette stratégie a été réalisée en respectant rigoureusement les étapes méthodologiques recommandées par les lignes directrices PRISMA. L'application de cette méthodologie implique le suivi rigoureux de 3 étapes clairement définies.

Étape 1 : Définir clairement la question de recherche

Le cadre PICOT (Population, Intervention, Comparaison, *Outcome* ou résultat, Temps) a été utilisé pour structurer notre stratégie de recherche.

- Population (P) : Articles scientifiques à accès ouvert
- Intervention (I) : Revue systématique de la littérature
- Comparaison (C) : Revue de littérature à visée méta-analytique
- *Outcome* ou résultat (O) : Pertinence et faisabilité du distillateur solaire dans le sud de Madagascar
- Temps (T) : Période couvrant les dix dernières années (2015-2025)

Étape 2 : Critères d'inclusion et d'exclusion des études

Les critères d'inclusion de la présente revue systématique étaient définis de manière à ne retenir que les études publiées au cours des dix dernières années dans des revues ou articles scientifiques à comité de lecture, rédigés en français ou en anglais. Les travaux sélectionnés doivent traiter spécifiquement de la conception, de la performance et des applications pratiques des distillateurs solaires.

À l'inverse, les critères d'exclusion éliminaient les publications antérieures à la période de référence de dix ans, ainsi que celles traitant de technologies autres que les distillateurs solaires. Ont également été écartées les études ne présentant pas d'applications pratiques ou n'évaluant pas la faisabilité technique, en particulier lorsqu'aucune donnée relative à la performance des distillateurs n'était fournie.

Étape 3 : Stratégie de recherche

L'élaboration d'un inventaire de mots-clés et de synonymes pertinents, reflétant les concepts centraux de la problématique de recherche, a constitué une étape essentielle. Cet inventaire comprend notamment les termes : "distillation solaire", "eau potable" et "Madagascar". À partir de ces mots-clés, une équation de recherche a été construite en mobilisant des opérateurs booléens. Elle a servi à interroger différentes bases de données scientifiques, parmi lesquelles *Google Scholar*, *ResearchGate* et *ScienceDirect*.

L'équation de recherche a été appliquée comme suit :

("solar distillation" OR "solar still" OR "solar desalination")
AND ("performance")
AND ("semi-arid" OR "rural" OR "Madagascar")
AND ("potable water")

2.1. Extraction des données

Microsoft Excel a été choisi comme outil principal pour structurer, organiser et faciliter l'extraction des données. Pour garantir une collecte d'informations rigoureuse et cohérente, un formulaire d'extraction standardisé a été conçu et utilisé. Ce formulaire, élaboré pour recueillir les éléments essentiels de chaque étude incluse dans l'analyse, s'est concentré sur des dimensions clés (auteurs, année de publication, type de distillateur solaire étudié, productivité, matériaux utilisés, etc.).

2.2. Critères des études

- Référence bibliographique : auteur(s), année de publication.
- Type de distillateurs solaire utilisé
- Localisation géographique : pays présentant des similarités avec le sud de Madagascar
- Méthode employée : expérimentale, expérimentale et numérique ou théorique (analytique)
- Mots-clés et termes spécifiques : présence de concepts fondamentaux.

2.3. Extraction des résultats

Les résultats extraits ont mis en évidence :

- Les données quantitatives relatives à l'efficacité des technologies de distillation solaire :
 - La production journalière ($L/m^2/j$) ;
 - L'irradiance solaire (W/m^2).
- Les données qualitatives sur la conception et les applications pratiques :

- Les matériaux utilisés dans la conception des distillateurs solaires ;
- Les facteurs influençant le rendement ;
- Les types de distillateurs étudiés (actif, passif et hybride) ;

III. RÉSULTATS

3.1. Résultats de la recherche documentaire

Parmi les 262 rapports initialement recueillis, 83 documents en double ont été éliminés, réduisant le corpus à 179 rapports. Après une première évaluation, 11 rapports ont été exclus. Pour l'évaluation en texte intégral, 168 rapports ont été analysés. Deux critères principaux ont entraîné l'exclusion de 113 documents : une partie a été rejetée après lecture intégrale pour divers motifs, tandis qu'une autre portion a été exclue en raison de l'absence de données quantitatives sur les performances dans la revue. Finalement, 55 études répondant aux critères de qualité et de pertinence ont été incluses dans la synthèse et l'analyse comparative.

La figure 1 présente le diagramme PRISMA détaillant le processus de sélection.

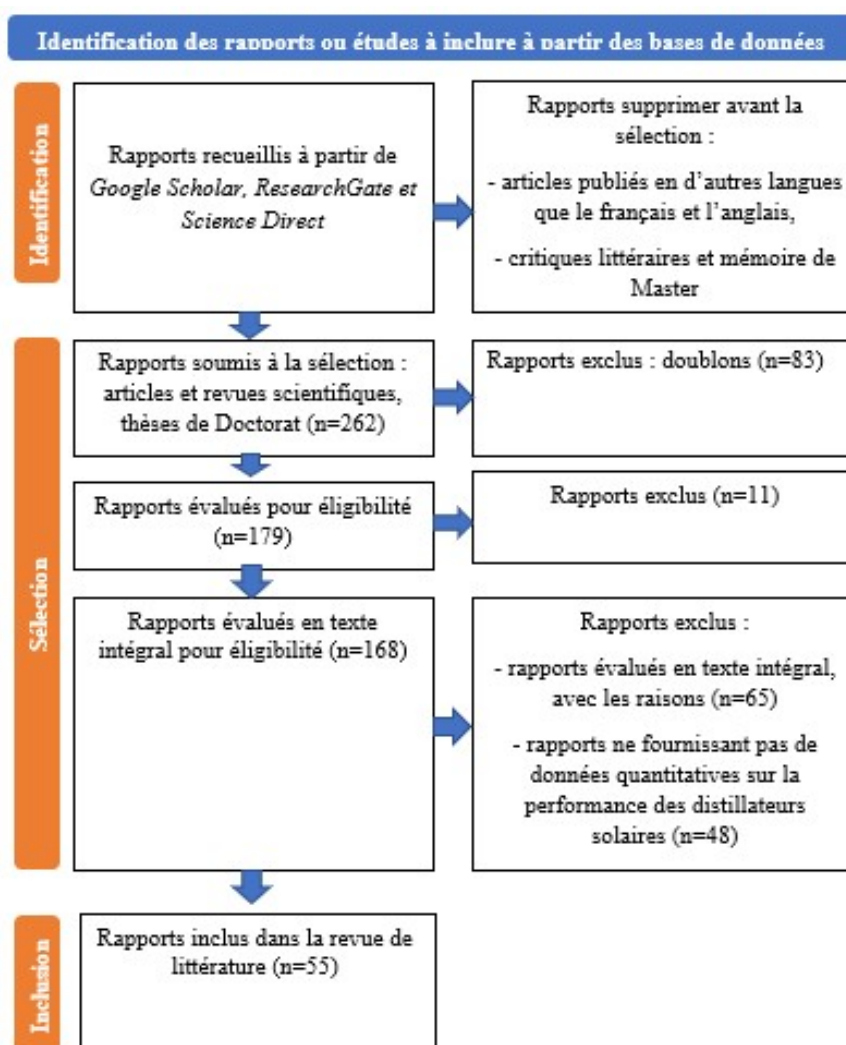


Figure 1 : Diagramme de flux de la sélection des études (PRISMA)

3.2. Caractéristique des études incluses

3.2.1. Années et continents de publication

La figure 2 illustre l'évolution du nombre d'articles publiés au cours de la période 2015–2025, répartis par année et par continent. Elle met en évidence les dynamiques géographiques et temporelles de la recherche sur les distillateurs solaires. Elle montre une nette prédominance de l'Asie du Sud dans la production scientifique. La tendance générale révèle, toutefois, un léger déclin du rythme de publication au fil de la période, passant d'un maximum observé au début de l'intervalle étudié à une stabilisation autour de deux articles par an à partir de 2020. L'Afrique et le Moyen-Orient affichent une progression régulière mais limitée, oscillant entre une et deux publications annuelles, tandis que l'Europe et l'Amérique du Sud demeurent faiblement représentés.

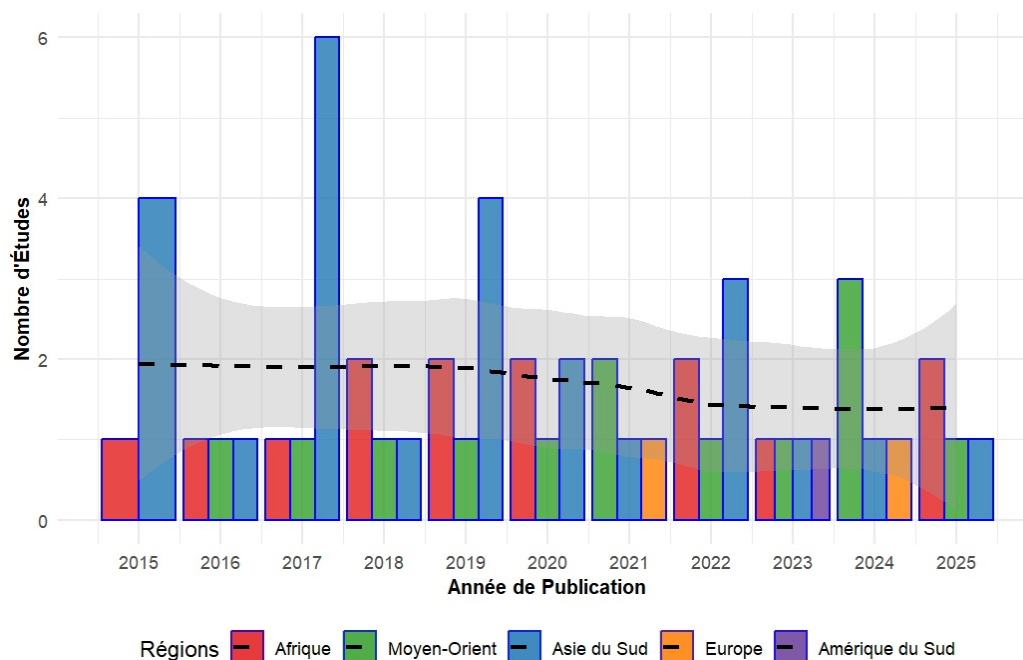


Figure 2 : Analyse régionale et temporelle des publications sur les distillateurs solaires (2015-2025)

3.2.2. Technologies de distillateurs solaires observés

La figure 3 présente la répartition des types de distillateurs solaires utilisés dans la littérature.

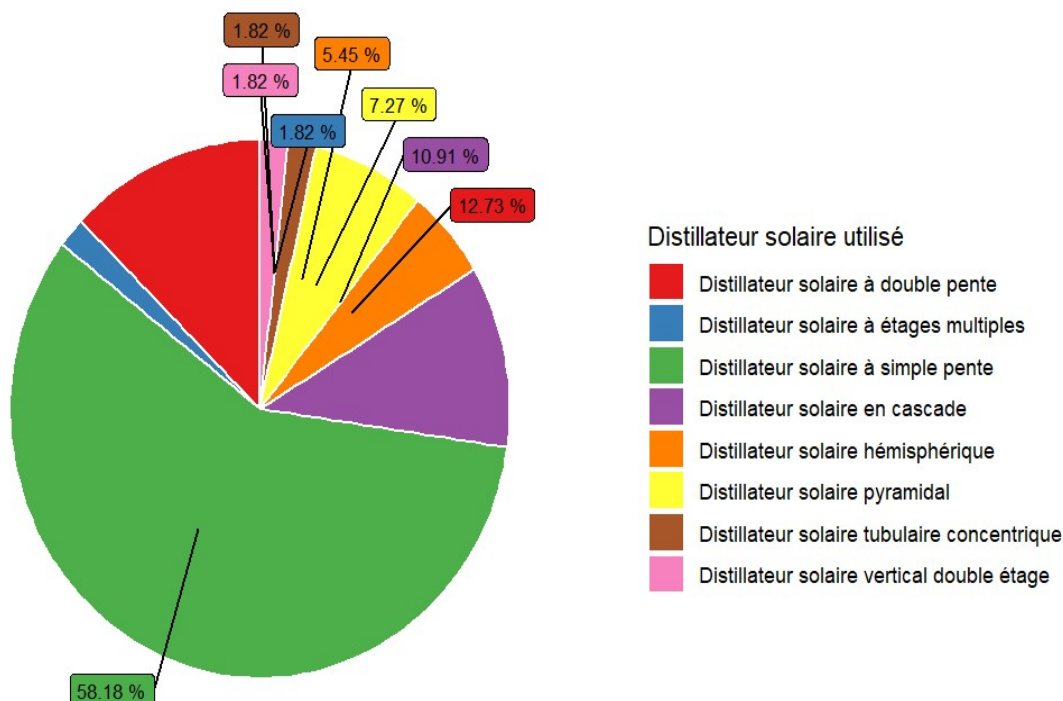


Figure 3 : Technologie de distillateurs solaires observés dans la littérature

Le distillateur solaire à simple pente est le plus étudié, il constitue 58,18 % des travaux recensés. Vient ensuite le distillateur solaire à double pente, présent dans 12,73 % des publications, suivi des modèles en cascade, hémisphérique et pyramidal. Les autres technologies, telles que les distillateurs à étages multiples, tubulaire concentrique ou vertical double étage, sont beaucoup moins représentées.

Cette figure 3 illustre clairement que la littérature scientifique privilégie les distillateurs à simple pente, en cohérence avec l'objectif de développer des dispositifs accessibles et adaptés à la production d'eau potable dans les régions arides et semi-arides.

3.2.3. Types de distillateurs

Le tableau 1 présente la répartition des études incluses par type de distillateur. L'analyse des types de distillateurs étudiés dans la littérature révèle une prédominance marquée du distillateur passif, qui représente 67,27 % des études incluses. Les distillateurs actifs, qui mobilisent des mécanismes ou sources d'énergie externe pour améliorer le processus de distillation, constituent 21,82 % des travaux recensés. Enfin, les systèmes hybrides, combinant les caractéristiques des distillateurs passifs et actifs, sont les moins représentés, avec seulement 10,91 % des études. Globalement, ces résultats illustrent la diversification des approches technologiques dans le domaine de la distillation solaire, tout en mettant en exergue une préférence notable pour les solutions passives dans la recherche scientifique.

Tableau 1 : Répartition des études par type de distillateur

Type de distillateur	Nombre d'études	Pourcentage (%)
Actif	12	21,82
Hybride	6	10,91
Passif	37	67,27

3.3. Synthèse des résultats

Toutes les études incluses présentent un caractère expérimental. Plus précisément, 41 travaux adoptent une approche exclusivement expérimentale, tandis que 8 combinent une approche expérimentale et une modélisation numérique tridimensionnelle, et 6 associent une démarche expérimentale à une analyse théorique (ou analytique).

Sur l'ensemble des 55 études retenues, 53 correspondent à des articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, auxquelles s'ajoutent une thèse de doctorat et un article de conférence.

Deux des études retenues ont menés à Madagascar. Le tableau 2 présente la synthèse de ces travaux scientifiques.

Tableau 2 : Caractéristiques des études sur les distillateurs solaires réalisées à Madagascar

Auteurs, Année	Titre de la Revue	Type de publication	Type d'étude	Distillateur solaire utilisé	Productivité (L/m ² /j)
Vincent <i>et al.</i> , 2022 [7]	Conception et Réalisation d'un Distillateur Solaire en Cascade Avec Appoint	Article Scientifique	Expérimentale	Distillateur solaire en cascade (HYBRIDE)	2,65
Randrianantenaina <i>et al.</i> , 2025 [8]	<i>Reliability Analysis of a 2D Model of a Solar Still Developed Using Comsol® Multiphysics</i>	Article Scientifique	Expérimentale et Modeling	Distillateur solaire en cascade (PASSIF)	2,00

Les deux études mentionnées dans le tableau 2 traitent le distillateur solaire en cascade, exploré aussi bien sous une forme hybride que dans des approches passives. Elles reposent sur des démarches expérimentales et combinant expérimentation et modélisation numérique. Cette orientation confirme la dynamique des recherches locales visant à adapter et optimiser cette technologie dans le contexte malgache.

Le tableau 3 présente un extrait des données qualitatives recueillies concernant la conception des distillateurs solaires et leurs applications pratiques. Il montre la nature des matériaux utilisés ainsi que les facteurs déterminants qui influencent le rendement de ces dispositifs.

Tableau 3 : Extrait des caractéristiques techniques des distillateurs solaires dans la littérature

Auteurs, Année	Distillateur solaire utilisé	Productivité (L/m ² /j)	Matériaux utilisés	Composantes auxiliaires
Arunkumar & Kabeel, 2017 [9]	Distillateur solaire tubulaire concentrique (HYBRIDE)	5,78	Cuivre, verre borosilicate	Matériau à changement de phase (paraffine) entre doubles tubes
Tahir Siddiqui & Jain, 2015 [10]	Distillateur solaire à simple pente (PASSIF)	2,58	Acier galvanisé, verre 4-5 mm, bois	Réflecteur miroir intégré
Panchal <i>et al.</i> , 2020 [11]	Distillateur solaire à simple pente (PASSIF)	2,37	Bois, acier galvanisé peint, verre 4mm	Ailettes verticales et inclinées (30°) en acier, tuyaux carillon éolien recyclés

L'analyse des données révèle que la performance des distillateurs solaires est étroitement conditionnée par le choix des matériaux, la conception structurelle et l'intégration de dispositifs auxiliaires. L'emploi de matériaux à forte conductivité thermique, tels que le cuivre, l'aluminium ou l'acier galvanisé, combiné à des absorbeurs noirs, des surfaces réfléchissantes ou des matériaux à changement de phase, favorise une absorption et un stockage optimaux de l'énergie solaire, se traduisant par une amélioration notable de la productivité.

Par ailleurs, l'ajout de composants auxiliaires confère aux distillateurs des performances supérieures grâce à une gestion thermique plus efficace. Dans une perspective de durabilité et d'adaptation contextuelle, l'utilisation de matériaux locaux tels que la pierre, le bois, le métal ou les fibres végétales représente une voie prometteuse, notamment pour les régions semi-arides du Sud de Madagascar. En définitive, la performance et la pertinence des distillateurs solaires reposent sur la synergie entre conception innovante, matériaux adaptés et technologies auxiliaires, garantissant à la fois efficacité, accessibilité et robustesse.

3.4. Méta-analyse de l'évaluation de la pertinence et la faisabilité des distillateurs solaires dans le Sud de Madagascar

Pour la réalisation de cette méta-analyse, le logiciel libre R a été utilisé afin de garantir une approche méthodique et reproductible.

3.4.1. Analyses descriptives détaillées

Les statistiques globales de la productivité ont été calculées et présentées dans le tableau 4. Des analyses par type de distillateur ont permis de décrire la distribution des valeurs et d'effectuer des tests d'ANOVA (analyse de variance) pour évaluer les différences inter-groupes.

Tableau 4 : Statistiques descriptives de la productivité selon le type de distillateur solaire

Type de distillateur	Nombre d'études	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Productivité min (L/m ² /j)	Productivité max (L/m ² /j)
Actif	12	7,35	5,58	5,91	2,76	23,65
Hybride	6	6,02	3,67	4,79	2,65	12,17
Passif	37	3,82	2,21	3,61	0,46	11,90

Les résultats montrent que les distillateurs actifs présentent la productivité moyenne la plus élevée, mais aussi la plus variable, tandis que les distillateurs passifs ont une productivité significativement plus faible et plus homogène. Les distillateurs hybrides affichent une productivité intermédiaire avec une variabilité modérée. Ces différences soulignent l'importance du choix technologique pour maximiser la capacité de production d'eau par distillation solaire dans le Sud de Madagascar.

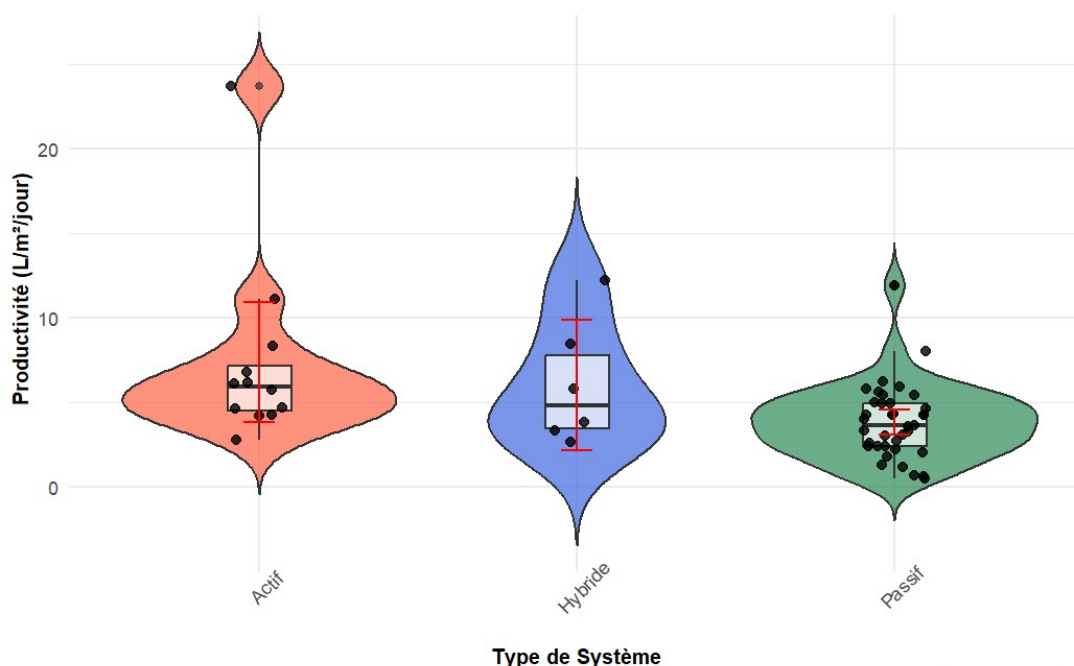
Le tableau 5 présente les résultats de l'ANOVA.

Tableau 5 : Résultats de l'ANOVA pour l'effet du type de distillateur sur la productivité

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	Valeur de F	Probabilité associée à F
Type de distillateur	2	122,7	61,35	5,445	0,00713
Résidus	52	585,9	11,27		

L'ANOVA met en évidence un effet significatif du type de distillateur sur la productivité des distillateurs solaires ($F(2,52) = 5,445$, $p = 0,00713$). Cette valeur de F montre que la variabilité observée entre les types de distillateurs dépasse largement celle attribuable au hasard, soulignant ainsi l'importance du choix technologique dans la performance du procédé. La somme des carrés associée au facteur confirme que le type de distillateur constitue un déterminant majeur de la variabilité de la production d'eau distillée, renforçant la pertinence de ce paramètre dans l'analyse des performances.

La figure 4 illustre et corrobore ces propos. Le graphique en violon, associé aux boîtes à moustaches, met en évidence des différences nettes de productivité selon le type de distillateur.



Graphiques en violon + boîtes à moustaches

Figure 4 : Comparaison graphique de la productivité des distillateurs solaires selon le type de système : actif, hybride et passif

Cette distribution confirme l'impact déterminant du choix technologique sur la production d'eau distillée, soulignant la supériorité des distillateurs actifs et hybrides dans les contextes semi-arides du Sud de Madagascar.

3.4.2. Méta-analyses principales

➤ Analyse de sous-groupe

Afin d'intégrer et de comparer de manière rigoureuse les résultats des différentes études recensées, une méta-analyse à effets aléatoires a été réalisée en utilisant la méthode REML (Restricted Maximum Likelihood), considérée comme la plus appropriée pour estimer la productivité des distillateurs dans un contexte de forte hétérogénéité entre études.

Les tableaux 6 et 7 synthétisent les résultats principaux du modèle à effets mixtes REML, en analysant la variance de la productivité en fonction du type de distillateur.

Tableau 6 : Paramètres de synthèse du modèle à effets mixtes pour la productivité des distillateurs solaires

Paramètres	Valeur
Nombre d'études (k)	55
Estimateur de τ^2 (hétérogénéité résiduelle)	8,6551 (SE = 1,8348)
τ (racine de τ^2)	2,9420
I^2 (part de variabilité inexpliquée)	97,81%
H^2 (variabilité non expliquée / variabilité d'échantillonnage)	45,72
Test d'hétérogénéité résiduelle (QE, ddl = 52)	1459,55 ; $p < 0,0001$
Test des modérateurs (QM, ddl = 3)	138,63 ; $p < 0,0001$

Le modèle mixte à effets aléatoires, estimé sur 55 études, montre une hétérogénéité résiduelle très élevée ($\tau^2 = 8,66$; $I^2 = 97,81\%$). Cela indique que l'essentiel de la variabilité observée n'est pas explicable par l'erreur d'échantillonnage, mais par des différences

intrinsèques entre études, probablement liées aux contextes d'application ou aux caractéristiques techniques des distillateurs solaires. Le test d'hétérogénéité (QE) est fortement significatif ($p < 0,0001$), confirmant la présence manifeste d'une dispersion inter-études non expliquée par le modèle de base. Par ailleurs, le test des modérateurs (QM) révèle que le facteur « type de distillateur » exerce une influence globale très significative sur la productivité ($p < 0,0001$).

Tableau 7 : Estimations des effets du type de distillateur sur la productivité selon le modèle à effets mixtes

Type de distillateur	Estimation	Erreur standard	z	p-value	IC 95% inférieure	IC 95% supérieure	Significativité
Actif	7,35	0,97	7,59	$< 0,0001$	5,45	9,25	***
Hybride	5,98	1,35	4,42	$< 0,0001$	3,33	8,63	***
Passif	3,82	0,49	7,84	$< 0,0001$	2,86	4,78	***

Codes de signification : *** : $p < 0,001$ ** : $p < 0,01$ * : $p < 0,05$. : $p < 0,1$

IC : Intervalle de Confiance

Les estimations du modèle indiquent que les distillateurs actifs offrent, en moyenne, la productivité la plus élevée (7,35 L/m²/j ; IC 95% [5,45 — 9,25]), suivis des hybrides (5,98 L/m²/j ; IC95% [3,33 — 8,63]) et des passifs (3,82 L/m²/j ; IC95% [2,86 — 4,78]). Elles sont toutes significatives à un niveau très élevé ($p < 0,0001$). Ces résultats confirment que le choix technologique influence grandement la performance et suggèrent, en contexte semi-aride, une préférence stratégique pour les systèmes actifs ou hybrides, sous réserve de considérations locales et économiques.

➤ Méta-Régression

La relation linéaire entre productivité et irradiance solaire a été étudiée avec une méta-régression univariée, suivie d'une régression multiple (Irradiance + Type de distillateur). La figure 5 présente la distribution de la productivité quotidienne des distillateurs solaires en fonction de l'irradiance solaire mesurée. Elle met en perspective les différences de rendement selon la technologie utilisée (passif, actif ou hybride).

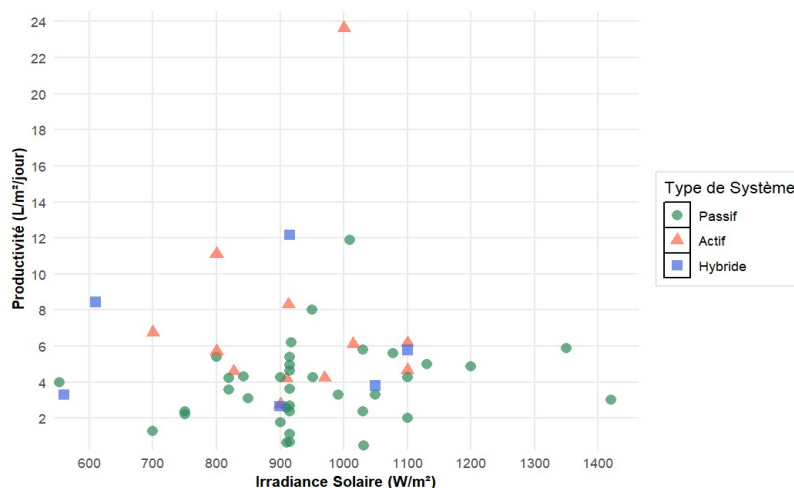


Figure 1 : Relation entre l'irradiance solaire et la productivité des distillateurs selon le type de système

Il peut être constaté que, quel que soit le type de distillateur, la productivité tend à augmenter avec l'irradiance, confirmant l'influence déterminante de l'énergie solaire reçue sur les performances. Toutefois, l'amplitude des valeurs suggère une forte variabilité intra- et intercatégorielle. Les distillateurs actifs sont représentés par des valeurs de productivité souvent supérieures, certains atteignant des niveaux nettement plus élevés (jusqu'à 24 L/m²/j), tandis que les systèmes hybrides et passifs affichent des rendements généralement inférieurs et plus resserrés. Cette distribution met en évidence non seulement l'importance du type

technologique, mais aussi celle des conditions locales d'irradiance, qui conditionnent de manière synergique le volume d'eau distillée généré quotidiennement.

Cela étant, les tableaux 8 et 9 présentent les estimations des coefficients issus de la méta-régression multiple, quantifiant l'impact de l'irradiance solaire ainsi que des différentes technologies de distillateur sur la productivité moyenne mesurée dans les études incluses.

Tableau 8 : Résultats détaillés de la méta-régression multiple évaluant l'effet de l'irradiance solaire et du type de distillateur sur la productivité

Paramètre	Estimation	Erreur standard (SE)	z	p-value	IC 95% bas	IC 95% haut	Signification
Intercept	5,7652	2,7111	2,13	0,0335	0,4516	11,0788	*
Irradiance	0,0017	0,0027	0,63	0,5284	-0,0036	0,0071	n.s.
Type : Hybride	-2,4280	1,8484	-1,31	0,1890	-6,0509	1,1948	n.s.
Type : Passif	-3,4278	1,1658	-2,94	0,0033	-5,7128	-1,1428	p < 0.01

Codes de signification : 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1 ; n.s : Non Significatif

Tableau 9 : Indicateurs d'hétérogénéité et d'effet global du modèle de méta-régression

Indicateur d'hétérogénéité	Valeur	Interprétation
tau² (variance résiduelle)	9,5589	Hétérogénéité élevée
tau (écart-type)	3,0918	Dispersion importante
I²	97,95 %	Variabilité non due au hasard
H²	48,86	Variabilité réelle élevée
R²	12,77 %	Variabilité expliquée limitée
QE(42) = 1241,86 ; p < 0.0001	Hétérogénéité significative	
QM(3) = 8,77 ; p = 0,0325	Effet global significatif des modérateurs	

La méta-régression multiple fondée sur le modèle à effets mixtes ($k = 46$) met en évidence une forte hétérogénéité entre les études ($I^2 = 97,95\%$, $p < 0,0001$), traduisant la diversité des performances des distillateurs solaires recensés. Bien que le modèle n'explique que 12,77 % de cette variabilité (R^2), l'effet global des modérateurs demeure significatif ($p = 0,0335$). Les résultats montrent que l'irradiance ne constitue pas un facteur déterminant de la productivité ($p = 0,5284$), alors que le type de distillateur exerce une influence notable. Dans l'ensemble, la méta-régression indique que la performance des distillateurs solaires dépend principalement de leur configuration technologique plutôt que de l'intensité du rayonnement solaire. Lorsque l'irradiance, uniquement, est considérée, elle apparaît comme fortement corrélée à la productivité. Mais lorsque le type de distillateur est ajouté, cette relation disparaît, cela indique une confusion (effet de colinéarité) : les différences de productivité ne proviennent pas seulement du rayonnement solaire, mais aussi du type de technologie utilisée. Cela souligne le rôle prépondérant de la conception thermodynamique dans l'optimisation du rendement en eau distillée.

3.4.3. Évaluation du biais de publication

Afin d'évaluer la présence d'un éventuel biais de publication au sein des études incluses dans la méta-analyse, un graphique en entonnoir a été tracé à partir des données de productivité des distillateurs solaires (figure 6). Ce type de représentation permet d'examiner la symétrie des estimations individuelles autour de la moyenne pondérée, en fonction de leur erreur standard, et constitue un indicateur visuel de la robustesse des résultats synthétisés.

L'examen de la figure 6 montre une répartition globalement symétrique des études de part et d'autre de la moyenne estimée (autour de 5 L/m²/j), suggérant une absence majeure de biais de publication dans l'ensemble des travaux analysés. La concentration des points dans la zone centrale traduit la cohérence entre les études à faible variance, tandis que la dispersion modérée en périphérie

reflète la variabilité attendue pour les échantillons de petite taille. Cette symétrie témoigne d'une représentativité satisfaisante des données et d'une homogénéité méthodologique acceptable au sein du corpus étudié.

Cependant, une légère asymétrie observée dans la partie inférieure gauche du graphique peut indiquer une sous-représentation des études à faibles productivités et à grandes erreurs standards, souvent non publiées en raison de résultats jugés moins valorisants. Ce phénomène, bien que limité, souligne l'importance de renforcer la transparence et la diffusion systématique des résultats expérimentaux, quel que soit leur niveau de performance. Dans l'ensemble, le biais de publication apparaît restreint, ce qui conforte la validité interne et externe de la méta-analyse menée sur la productivité des distillateurs solaires, par extension, sur leur pertinence pour le contexte semi-aride du Sud de Madagascar.

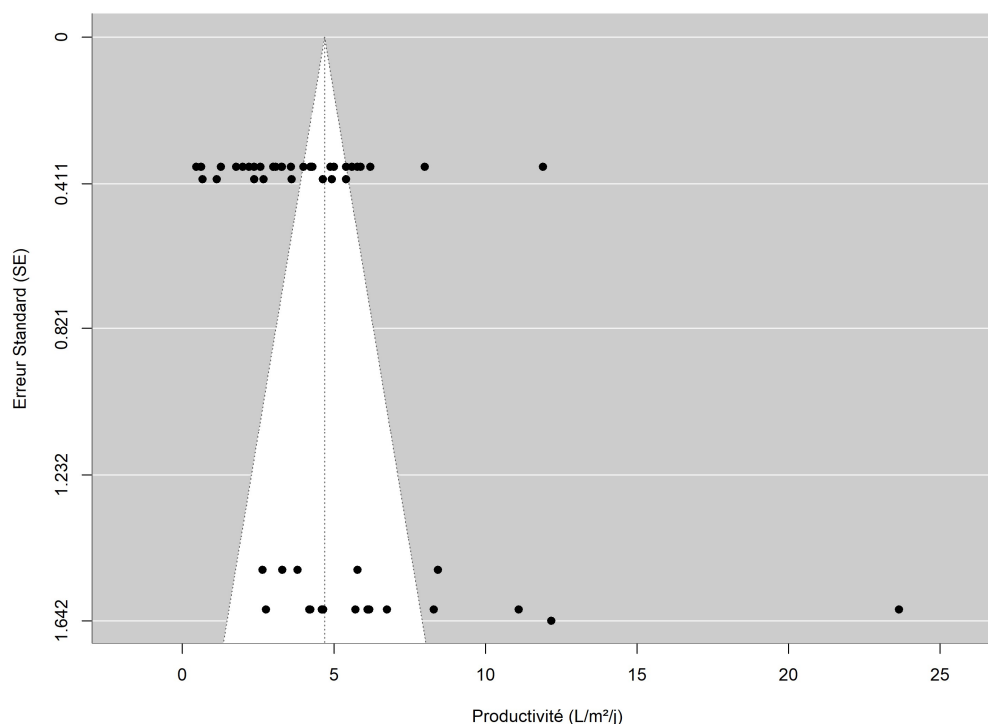


Figure 2 : Graphique en entonnoir - Détection du biais de publication

3.4.4. *Références africaines pour l'évaluation de la faisabilité au Sud de Madagascar*

Afin d'évaluer la pertinence et la faisabilité des distillateurs solaires dans le contexte du Sud de Madagascar, il a été jugé essentiel d'examiner les études réalisées sur le continent africain. Ces dernières présentent, en effet, des conditions climatiques et technologiques comparables, offrant ainsi une base de référence pertinente pour la transposition des résultats.

L'analyse de quatorze études africaines a révélé une productivité moyenne pondérée, estimée à 5,13 L/m²/j (IC 95 % [2,33 ; 7,92]). Cela constitue une valeur centrale robuste et révèle une incertitude notable. Certaines études rapportent des rendements extrêmes, jusqu'à 23,65 L/m²/j, tandis que d'autres affichent des valeurs marginales (0,67 à 8 L/m²/j), soulignant le potentiel, mais aussi les limites des dispositifs selon les conditions locales.

Cette variabilité marque la nécessité d'une interprétation prudente des résultats. La majorité des productivités se situant entre 2 et 6 L/m²/j suggère une faisabilité technique pour un usage domestique ou communautaire. Par contre, les rendements extrêmes et les intervalles de confiance larges indiquent que la performance dépend fortement de la conception du distillateur, des conditions climatiques régionales et du savoir-faire technique. Ainsi, aucune conclusion générale ne peut être transposée sans contextualisation : il est essentiel d'analyser les facteurs déterminants tels que le type de distillateur, l'environnement local et l'expertise mobilisée afin de guider des recommandations fiables pour le Sud de Madagascar.

IV. DISCUSSION

➤ *Synthèse et interprétation des résultats*

La revue systématique a retenu 55 études publiées entre 2015 et 2025, couvrant diverses configurations de distillateurs solaires (passifs, actifs et hybrides). Les distillateurs passifs offrent une productivité moyenne modérée ($3,82 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1} \pm 2,21$), avec peu de variabilité extrême. Les distillateurs actifs atteignent la productivité la plus élevée ($7,35 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1} \pm 5,58$), mais présentent une dispersion importante. Les systèmes hybrides se situent entre les deux précédents ($6,02 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1} \pm 3,67$) et combinent avantages passifs et actifs. L'ANOVA et la méta-analyse à effets aléatoires ont confirmé que le type de distillateur est un déterminant statistiquement significatif de la performance ($F(2,52)=5,445$, $p=0,007$; $QM=138,63$, $p<0,0001$). Cette hiérarchisation des performances a corroboré les conclusions de Bhargva & Yadav (2021) qui ont démontré que l'intégration de composants auxiliaires avait permis d'améliorer de manière significative l'efficacité des systèmes de distillation solaire [12].

➤ *Facteurs déterminants de la performance*

La méta-analyse a révélé que la conception thermodynamique avait primé sur l'irradiance solaire en tant que facteur déterminant de la productivité. Cette conclusion a contrasté avec l'hypothèse intuitive selon laquelle l'intensité du rayonnement solaire aurait constitué le principal déterminant des performances. Cette découverte a aligné nos résultats avec ceux d'Alwan *et al.* (2024), qui ont démontré que l'optimisation des paramètres de conception avait permis de compenser partiellement les variations climatiques [13].

➤ *Implications pour le Sud de Madagascar*

- **Pertinence** : Les rendements moyens ($2-6 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) sont compatibles avec un approvisionnement en eau potable pour des usages domestiques ou communautaires à petite échelle, compte tenu des niveaux d'irradiation solaire élevés dans la région.
- **Faisabilité** : L'emploi de matériaux locaux (galvanisation, verre, sable, fibres végétales) et de dispositifs passifs simples minimise les coûts d'investissement et facilite la maintenance. Toutefois, l'intégration de composants auxiliaires comme les pompes ou les matériaux à changement de phase pourrait améliorer substantiellement les rendements, sous réserve d'une formation technique et d'un approvisionnement en pièces détachées adaptées.

➤ *Limites méthodologiques et biais potentiels*

- **Hétérogénéité entre les études** : Le taux d'hétérogénéité particulièrement élevé ($I^2 > 97\%$) a indiqué que la variabilité observée ne provenait pas uniquement des fluctuations d'échantillonnage, mais résultait principalement de divergences liées à la conception des dispositifs, aux conditions climatiques et aux méthodologies expérimentales employées.
- **Biais de publication** : L'analyse du graphique en entonnoir (figure 6) a mis en évidence une légère asymétrie, suggérant une sous-représentation des études présentant une faible productivité et une forte incertitude. Cette tendance aurait pu conduire à une surestimation de la performance moyenne des distillateurs solaires rapportée dans la littérature.
- **Qualité des données** : Plusieurs études se sont révélées dépourvues de mesures normalisées relatives à l'irradiation et à la température. Cela a limité la comparabilité inter-expérimentale et a réduit la robustesse des conclusions globales de la méta-analyse.

➤ *Recommandations et perspectives*

1. **Standardisation méthodologique** : Adopter des protocoles expérimentaux harmonisés incluant la mesure simultanée de l'irradiance, de la température et de la profondeur d'eau.
2. **Développement de prototypes hybrides adaptés** : Ajouter aux systèmes passifs simples des systèmes de stockage thermique ou de circulation forcée, en privilégiant des matériaux locaux et peu coûteux.
3. **Réalisation d'essais** : Réaliser des essais pilotes dans le Sud de Madagascar pour évaluer la durabilité, l'acceptabilité sociale et les coûts opérationnels réels.

4. **Formation et transfert de compétences** : Renforcer les capacités locales pour la construction, l'entretien et l'optimisation des distillateurs solaires.
5. **Publication systématique** : Encourager la diffusion de tous les résultats, même peu performants, pour limiter le biais de publication et affiner les recommandations.

V. CONCLUSION

Cette revue systématique, menée selon les lignes directrices PRISMA et fondée sur 55 études publiées entre 2015 et 2025, a permis de caractériser de manière rigoureuse les performances, la faisabilité et la pertinence des distillateurs solaires pour le contexte semi-aride du Sud de Madagascar. Les analyses statistiques, incluant l'ANOVA et la méta-analyse à effets mixtes, ont démontré que la configuration technologique constitue le principal déterminant de la productivité, surpassant l'influence directe de l'irradiance solaire. Les distillateurs actifs et hybrides affichent les rendements les plus élevés, tandis que les systèmes passifs demeurent les plus accessibles pour une mise en œuvre locale à faible coût.

Ces résultats confirment la viabilité des technologies de distillation solaire comme solution durable d'approvisionnement en eau potable dans les zones rurales malgaches. Toutefois, l'hétérogénéité méthodologique observée entre les études et la variabilité des rendements montre un potentiel biais de publication nécessitant des précautions d'interprétation contextuelle.

Les perspectives de recherche prioritaires comprennent : (1) la standardisation des protocoles d'évaluation, (2) le développement de prototypes hybrides adaptés utilisant des matériaux locaux, (3) la réalisation d'essais pilotes in-situ, et (4) le renforcement des capacités techniques locales. Ces recommandations opérationnelles visent l'optimisation de l'acceptabilité sociale, de la durabilité économique et de la performance technique des distillateurs solaires dans le Sud de Madagascar.

Références

- [1] Younis, O., Hussein, A. K., Attia, M. E. H., Aljibori, H. S. S., Kolsi, L., Togun, H., Ali, B., Abderrahmane, A., Subkrajang, K., & Jirawattanapanit, A. (2022). Comprehensive Review on Solar Stills—Latest Developments and Overview. *In Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 16). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su141610136>
- [2] UNICEF. (n.d.). MADAGASCAR WASH INVESTMENT CASE EXECUTIVE SUMMARY. Consulté le 15 Aout 2025, from <https://www.unicef.org/esa/sites/unicef.org.esa/files/2019-05/UNICEF-Madagascar-2019-WASH-Investment-Case-Executive-Summary.pdf>
- [3] Rigden, A., Golden, C., Chan, D., & Huybers, P. (2024). Climate change linked to drought in Southern Madagascar. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00583-8>
- [4] La force du soleil : Madagascar se lance dans la production d'énergie renouvelable. (n.d.). Consulté le 23 Aout 2025, from <https://www.banquemondiale.org/fr/news/feature/2018/10/10/the-force-of-the-sun-madagascar-embarks-on-renewable-energy-production>
- [5] Delpy, L., Delcroix, C. G., Galon, M., Lallau, B., & Droy, I. (2024). Southern Madagascar, polycrisis and project failures: A scoping review. *PLoS ONE*, 19 (7 July). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305359>
- [6] Ratsaramody, J. (2022). Estimation of the Hydrological Potential of the Ungauged Watershed of Efaho (Madagascar) from the Daily Rainfall of an Average Year. *Resources and Environment*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.5923/j.re.20221201.01>
- [7] Vincent, M., Jean Luc, R., Achille, R., & Jean de Dieu, R. (2022). Conception Et Réalisation D'un Distillateur Solaire En Cascade Avec Appoint. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 1, 45–58.
- [8] Randrianantenaina, M., Andriamanampisoa, T. A., Randrianarison, M. P., Zimmermann, K., Chaplin, H., & Andrianarison, E. (2025). Reliability Analysis of a 2D Model of a Solar Still Developed Using Comsol Multiphysics. *Open Journal of Modelling and Simulation*, 13(01), 20–50. <https://doi.org/10.4236/ojmsi.2025.131002>

-
- [9] Arunkumar, T., & Kabeel, A. E. (2017). Effect of phase change material on concentric circular tubular solar still-Integration meets enhancement. *Desalination*, 414, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.035>
- [10] Tahir Siddiqui, M., & Jain, A. (2015). Analysis Of Solar Still With Reflector. *International Journal For Technological Research In Engineering*, 2(7), 1211–1216.
- [11] Panchal, H., Mevada, D., Sadasivuni, K. K., Essa, F. A., Shanmugan, S., & Khalid, M. (2020). Experimental and water quality analysis of solar stills with vertical and inclined fins. *Groundwater for Sustainable Development*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100410>
- [12] Bhargva, M., & Yadav, A. (2021). Factors affecting the performance of a solar still and productivity enhancement methods: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 54383–54402. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15983-z>
- [13] Alwan, N. T., Ali, B. M., Alomar, O. R., Abdulrazzaq, N. M., Ali, O. M., & Abed, R. M. (2024). Performance of solar still units and enhancement techniques: A review investigation. *Heliyon*, 10(18). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37693>