



**INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU
ET DE L'ENVIRONNEMENT**

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'INSTITUT 2iE

Spécialité : **Energie**

Présentée et soutenue publiquement

Par LEKOMBO Claude Sara

Le 17/01/2025

Réf :2iE/2025-01

**Analyse socio-économique et expérimentale des chauffe-eau solaires dans
des régions arides et humides d'Afrique de l'Ouest**

JURY

M. Comlan Aristide HOUNGAN	Professeur Titulaire (CAMES)	Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM), Bénin	Président
M. Bienvenu Macaire AGBOMAHENA	Professeur Titulaire (CAMES)	Université d'Abomey-Calavi, Bénin	Rapporteur
M. Salmwendé Eloi TIENDREBEOGO	Maître de Conférences (CAMES)	Ecole Normale Supérieure, Burkina Faso	Rapporteur
M. Yendoubé LARE	Professeur Titulaire (CAMES)	Université de Lomé, Togo	Examineur
M. Serge Wendsida IGO	Directeur de Recherche (CAMES)	Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Burkina Faso	Examineur
M. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE	Maître de Conférences (CAMES)	Institut 2iE, Burkina Faso	Directeur de thèse

Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE)

DEDICACE

Je dédie ce travail à ma chère mère, dont la foi en moi n'a jamais vacillé, ainsi qu'à moi-même pour ma résilience que cette thèse m'a apportée, une véritable école d'humilité. À mes futurs enfants, je souhaite qu'ils y trouvent la force et le courage de poursuivre leurs rêves et de faire ce qui les passionne, tout en recherchant l'excellence.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse. Votre soutien, vos conseils éclairés et vos encouragements constants ont été d'une aide précieuse tout au long de ce parcours.

Il m'est difficile de citer chaque personne ayant joué un rôle dans cette aventure, tant vous êtes nombreux et vos contributions variées. Sachez cependant que chacun d'entre vous a marqué ce travail de manière indélébile.

Comme l'a dit John F. Kennedy : « Le succès a de nombreux pères, mais l'échec est orphelin. ». Cette thèse est le fruit d'un effort collectif, et je suis honoré d'avoir été entouré par des personnes aussi exceptionnelles.

Je souhaite adresser mes plus vifs remerciements à M. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE, mon Directeur de thèse, Maître de Conférences (CAMES) à l'Institut 2iE. Son accompagnement attentif, ses précieux conseils et sa disponibilité ont été d'une aide inestimable dans toutes les étapes de cette recherche. Il m'a soutenu sur le terrain et confié des travaux pratiques et dirigés, dont l'objectif étant d'enrichir mes compétences tout en approfondissant ma propre réflexion sur le sujet. Sa rigueur scientifique et son approche humaine en ont fait un encadrant admirable, et je lui adresse mes plus sincères remerciements pour sa contribution essentielle à mon développement intellectuel et professionnel.

Je remercie particulièrement M. Comlan Aristide HOUNGAN, Professeur Titulaire (CAMES) à l'UNSTIM du Bénin, pour avoir accepté de présider le jury d'évaluation de cette thèse. Mes remerciements vont également à M. Salmwendé Eloi TIENDREBEOGO, Maître de Conférences (CAMES) à l'École Normale Supérieure du Burkina Faso, et à M. Bienvenu Macaire AGBOMAHENA, Professeur Titulaire (CAMES) à l'Université d'Abomey-Calavi du Bénin, pour avoir accepté de rapporter ce travail de recherche.

Je voudrais aussi remercier M. Yendoubé LARE, Professeur Titulaire (CAMES) à l'Université de Lomé (Togo), et M. Serge Wendsida IGO, Directeur de Recherche (CAMES) au Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST, Burkina Faso), pour avoir accepté d'examiner ce travail de recherche.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Kodjo Sédi AGBOKOU, Ingénieur de Recherche à l'Institut 2iE, pour son soutien précieux et multiforme dans la mise en place de

l'instrumentation, ainsi que pour son sens de l'amitié, qui a marqué ce travail de manière significative.

Je souhaite également remercier Dr Marie SAWADOGO, responsable du LabEREE à l'Institut 2iE, pour avoir instauré un environnement de travail rigoureux et stimulant. Je suis également reconnaissant envers l'ensemble de l'équipe pédagogique et scientifique du LabEREE, notamment Pr Moussa SORO, Pr Igor OUEDRAOGO, Dr Aboubakar GOMNA, Dr Sayon dit Sadio SIDIBE, Dr Daniel YAMEGUEU, Dr Yohan RICHARDSON, Dr Moussa KADRI, M. Madieumbe GAYE, M. Justin BASSOLE, M. Ahmed ZONGO, M. Romaric SAMAGNOUGA, M. Theodore BELEMGNEGRE, Mme Salamata CONGO et Mme Karoll NABALLOUM, pour leur appui constant et leurs précieuses contributions au cours de ces trois années.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toute la grande famille de l'Institut 2iE, en particulier Pr Adamah MESSAN et Dr Amadou KEITA, pour leurs conseils et leur soutien pendant mes tests sur le monitoring des températures. Mes remerciements vont également au Pr Harouna KARAMBIRI pour son sens de l'écoute, ses encouragements et ses précieux conseils qui m'ont été d'une grande aide tout au long de ce travail. Enfin, je remercie chaleureusement Mme Obi KAM, Mme Flavy GNAMBIO, Mme Françoise YEDAN, Mme Madina TRIANDE, Mme Bénédicte BOUDA, M. Lassina COULIBALY, M. Georges YAMEOGO, M. Abdel Kader OUEDRAOGO, M. Camille SOME, M. Claude OUEDRAOGO, M. Sylvain BOURGOU, et Mme Lina MENDY, pour leur efficacité et leur professionnalisme, qui ont grandement facilité mon parcours administratif au sein de l'Institut 2iE.

Je tiens également à remercier nos partenaires externes pour leur appui logistique et la mise à disposition de leurs installations : l'Hôtel Résidence Alice, l'HOSCO, ainsi que les familles KABORE et AMUZU.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers l'ensemble de la promotion S5 (semestre 2022) pour leur participation active aux enquêtes menées à Ouagadougou.

Durant ce voyage, j'ai évolué dans une atmosphère de camaraderie et de collaboration, une expérience enrichissante grâce à mes collègues doctorants de l'Institut 2iE. Je suis particulièrement reconnaissant envers mes camarades du LabEREE, avec qui j'ai partagé bien plus que des moments de travail. Je pense notamment à Fernand ZOMA, Yasmina OUEDRAOGO, Sabba GWODA, Ladj ACKA TANO, Roger ESSUI KONAN, Souwera Stan Lionnel SOMDA, Mame Sokhna Thiane SECK, Stéphanie NOUNAGNON, Fabrice CHINI, Hamado OUEDRAOGO, Jean KAFANDO, Adanyro ATILAGO, Boniface EHLAN et Cléfasse

KOULA, avec qui j'ai eu le plaisir d'échanger sur nos recherches et nos vies, créant ainsi des liens inestimables.

Je rends également hommage aux aînés et mentors, Ahmed SAWADOGO, Ouo Adeline OUATTARA et Rock Aymar DAKE, qui ont été des exemples de détermination, de solidarité et de soutien constant. Mention spéciale à ceux qui sont désormais Docteurs : Dr Fanta BARRY, Dr Laetitia HEMA, Dr Laetitia YOSSA, Dr Brice HAPPI, Dr Komlan Hector Seth TETE, Dr Kodami BADZA et Dr Bassalia OUATTARA.

À toute ma famille de PAUWES, en particulier Nkumbe Enongene Rex, Aminata SOW née KONÉ, Ulrich Etché et David Moïse Kouame Zaucyn, je vous remercie pour votre soutien multiforme. Nous y arriverons ensemble.

Je tiens à remercier également ma promotion de 2011 à Lomé pour la fraternité, le soutien et les encouragements. Merci particulièrement à Itoua Poto et Chelga Tsimba.

Je suis profondément reconnaissante envers Ullysse F. BASSOUKISSA, pour son soutien multiforme, son sens de la critique constructive, ses encouragements et ses précieux conseils. Sa passion pour son métier et son implication sincère dans l'aide aux autres sont une véritable source d'inspiration. Pour lui, la réussite réside dans le fait que chacun puisse bénéficier de l'accompagnement des autres.

Un grand merci à la grande communauté congolaise de Lomé et de Ouagadougou pour leur accueil, leur fraternité et leur soutien constant.

Je suis également profondément reconnaissante envers ma famille de Karmel, pour la nourriture spirituelle, la fraternité et l'amour qu'ils m'ont prodigués. Merci à la Cellule Catholique de 2iE pour l'amitié et la fraternité partagée.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers mes frères et sœurs, Lorenzo Marion, Edward Tamod, Ruddy, Beatrice Viny, Fortune, Hyno, Jessica, Reine, Jolie, Divine, Mag Lekombo. Vous avez été ma source de motivation, jour et nuit. C'est en grande partie grâce à vous que je trouve l'énergie pour surmonter les défis et atteindre mes objectifs.

RESUME

L'Afrique de l'Ouest, avec son potentiel solaire abondant, présente des perspectives considérables pour la prolifération des chauffe-eau solaires (CES). Cependant, leur utilisation reste limitée par des obstacles économiques, techniques et sociaux. Cette thèse entreprend une étude socio-économique et expérimentale complète des CES dans des environnements arides et humides. Pour atteindre cet objectif, une méthodologie combinant des enquêtes de terrain et des études de cas a été adoptée. Des données ont été collectées à partir de différents types d'installations : un CES autostockeur dans une buanderie d'hôpital, un CES à capteur plan installé dans un hôtel et un autre dans un ménage à Ouagadougou, ainsi qu'un CES à tubes sous-vide dans un ménage à Lomé. Les performances des systèmes ont été évaluées sur une période de 12 mois, avec des mesures spécifiques concernant l'efficacité énergétique, la rentabilité économique, et l'impact environnemental des systèmes. Les données ont été complétées par des enquêtes sur les habitudes de consommation d'eau chaude dans les deux villes et par des analyses des politiques publiques et des dynamiques sociales locales. Les résultats indiquent des variations substantielles entre les régions : à Ouagadougou, 70 % des ménages utilisent le gaz en raison des subventions, tandis que 9 % adoptent le CES, contre seulement 0,4 % à Lomé, où le charbon de bois prédomine. La performance des CES diffère également entre les sites étudiés : à l'hôpital, le système génère 2 070 kWh, avec un rendement annuel de 38 % et un taux de couverture de 17 %. Le CES a démontré une moyenne de 770 kWh à l'hôtel, malgré des pertes de chaleur significatives (30-50 %), atteignant un rendement modeste de 14 à 17 %. A Lomé, un CES domestique a produit 1 055 kWh avec un rendement de 39 %, tandis qu'à Ouagadougou, une famille a consommé 1 313 kWh en un an, dont 1 243 kWh ont été fournis par l'énergie solaire, atteignant un rendement moyen de 38 %. Le temps de retour sur investissement varie de 2,4 à 10 ans, selon l'installation, et les CES réduisent les émissions de CO₂ de 0,3 à 1,75 tonne par an. Malgré la satisfaction de 80 % des utilisateurs, leur adoption est entravée par des coûts initiaux élevés, des défaillances techniques (par exemple des flotteurs défectueux), des systèmes sous-dimensionnés, un manque de financement et une coordination institutionnelle limitée. Néanmoins, les perspectives sont encourageantes en raison du potentiel solaire substantiel, de la maturité technologique des CES, des politiques favorables et des partenariats public-privé. Pour parvenir à une adoption généralisée, il est nécessaire de réduire les coûts, d'améliorer la fiabilité des systèmes et de mettre en place des programmes de sensibilisation du public, qui doivent tous être adaptés à la culture. La mise en œuvre de ces stratégies optimisera l'impact économique et environnemental des CES, facilitant ainsi le développement durable en Afrique de l'Ouest.

Mots clés : Chauffe-eau solaires thermiques; Eau chaude sanitaire; Adoption technologique; Efficacité énergétique; Taux de couverture solaire; Buanderie solaire; Rentabilité économique; Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

West Africa, with its abundant solar potential, offers considerable prospects for the proliferation of solar water heaters (SWH). However, their usage remains limited due to economic, technical, and social barriers. This thesis undertakes a comprehensive socio-economic and experimental study of SWHs in arid and humid environments in West Africa. To achieve this objective, a methodology combining field surveys and case studies was adopted. Data were collected from various types of installations: an integrated collector storage SWH in a hospital laundry, a flat-plate collector SWH installed in a hotel and another in a household in Ouagadougou, as well as an evacuated-tube SWH in a household in Lomé. The performance of the systems was evaluated over a 12-month period, with specific measurements concerning energy efficiency, economic profitability, and the environmental impact of the systems. The data were supplemented by surveys on hot water consumption habits in the two cities and analyses of public policies and local social dynamics. The results reveal substantial regional variations: in Ouagadougou, 70% of households use LPG due to subsidies, while 9% adopt SWHs, compared to just 0.4% in Lomé, where charcoal is predominant. The performance of the SWHs also differs across the studied sites: in the hospital, the system generated 2,070 kWh, with an annual efficiency of 38% and a solar fraction of 17%. The SWH in the hotel produced an average of 770 kWh despite significant heat losses (30-50%), achieving a modest efficiency of 14-17%. In Lomé, a domestic SWH produced 1,055 kWh with an efficiency of 39%, while in Ouagadougou, the household consumed 1,313 kWh in a year, of which 1,243 kWh were provided by solar energy, achieving an average efficiency of 34%. The payback period varies between 2.4 and 10 years, depending on the installation, and SWHs reduce CO₂ emissions by 0.3 to 1.75 tonnes annually. Despite 80% user satisfaction, their adoption is hindered by high initial costs, technical failures (e.g., faulty floats), undersized systems, a lack of financing, and limited institutional coordination. Nevertheless, the outlook is promising due to substantial solar potential, the technological maturity of SWHs, favourable policies, and public-private partnerships. To achieve widespread adoption, it is necessary to lower costs, improve system reliability, and implement public awareness programmes, all tailored to the local culture. The implementation of these strategies will optimise the economic and environmental impact of SWHs, thereby facilitating sustainable development in West Africa.

Keywords: Solar water heating; Domestic hot water; Technological adoption; Energy efficiency; Solar fraction; Solar washing; Economic viability; West Africa.

TABLEAU DES MATIERES

DEDICACE	II
REMERCIEMENTS	III
RESUME	VI
ABSTRACT	VII
TABLEAU DES MATIERES	VIII
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XIV
NOMENCLATURE	XV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1. APERÇU ET ÉTAT DES LIEUX DES SYSTÈMES D'EAU CHAUDE SOLAIRE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CADRE THÉORIQUE	6
I. INTRODUCTION : MARCHÉ MONDIAL DE L'ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE	7
II. EAU CHAUDE SOLAIRE EN AFRIQUE DE L'OUEST	9
II.1. CONDITIONS CLIMATIQUES, RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES ET POLITIQUES POUR LE SOLAIRE THERMIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST	9
II.1.1. Zones climatiques et ressources solaires en Afrique de l'Ouest	9
II.1.2. Consommation d'énergie thermique et options alternatives dans la région	12
II.1.3. Objectifs et politiques pour l'eau chaude solaire en Afrique de l'Ouest	14
II.2. TECHNOLOGIES DE CHAUFFE-EAU SOLAIRES NON-CONCENTRATEURS EN AFRIQUE DE L'OUEST	29
II.2.1. Aperçu de l'adoption des chauffe-eau solaires en Afrique de l'Ouest	29
II.2.1. Développement de l'industrie des CES dans la région	29
III. CONTEXTE GLOBAL ET CADRE THÉORIQUE	35
III.1. USAGES DE L'EAU CHAUDE DANS DIFFÉRENTS SECTEURS	35
III.1.1. Installations domestiques individuelles	35
III.1.2. Installations dans le secteur tertiaire	36
III.2. MÉTHODOLOGIES ET APPROCHES DANS LES ÉTUDES SOLAIRES THERMIQUES	38
IV. CONCLUSIONS ET ENJEUX DE RECHERCHE	41

CHAPITRE 2. ENQUETE TERRAIN SUR LES CHAUFFE-EAU SOLAIRES THERMIQUES DOMESTIQUES EN MILIEU URBAIN OUEST-AFRICAIN	44
I. INTRODUCTION	45
II. PRÉSENTATION DES ZONES D'ÉTUDE	47
III. MÉTHODOLOGIE DE L'ENQUÊTE	48
III.1. CADRE GÉNÉRAL ET ÉLABORATION DES QUESTIONNAIRES	48
III.2. DÉTERMINATION DE LA PÉRIODE DE MISE EN ŒUVRE DE L'ENQUÊTE	49
III.3. RECRUTEMENT DES ENQUÊTEURS	51
III.4. ECHANTILLONNAGE ET MISE EN ŒUVRE DE L'ENQUÊTE	51
III.5. ANALYSE DES DONNÉES	52
IV. RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE	52
IV.1. USAGES D'EAU CHAUDE	53
IV.2. DIVERSITÉ DES SOURCES D'ÉNERGIE POUR CHAUFFER L'EAU ET CARACTÉRISTIQUES DE LA DEMANDE EN EAU CHAUDE	53
IV.3. PROFILS TEMPORELS ET SAISONNIERS DE CONSOMMATION D'EAU CHAUDE	55
IV.4. PERFORMANCE ET SATISFACTION DES UTILISATEURS DES SYSTÈMES DE CES	56
IV.5. DÉFIS ET PROBLÈMES LIÉS AUX CES	58
IV.6. MOTIVATION ET OBSTACLES À L'ADOPTION DES CES	58
V. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	60
V.1. SOURCES D'ÉNERGIE POUR CHAUFFER L'EAU	60
V.2. PROFIL D'UTILISATION SAISONNIERS ET QUOTIDIENS	62
V.3. PERFORMANCE ET SATISFACTION DES UTILISATEURS DES SYSTÈMES DE CES	63
V.4. DÉFIS ET PROBLÈMES LIÉS AUX CES	64
V.5. MOTIVATION ET OBSTACLES À L'ADOPTION	65
V.6. LIMITATIONS ET RECHERCHES FUTURES	66
VI. CONCLUSIONS	67
CHAPITRE 3. METHODOLOGIE D'ETUDE ET DESCRIPTION DES SYSTEMES DE CHAUFFE-EAU SOLAIRES THERMIQUES ANALYSES EN SITUATION REELLE DANS DES RÉGIONS HUMIDES ET ARIDES D'AFRIQUE DE L'OUEST	70
I. INTRODUCTION	71
II. TYPOLOGIE ET CARACTÉRISTIQUES DES INSTALLATIONS DE CHAUFFE-EAU SOLAIRES THERMIQUES SUIVIS	71

II.1. INSTALLATIONS DANS LE SECTEUR TERTIAIRE	71
II.1.1. Chauffe-eau solaire auto-stockeur : application en buanderie hospitalière à Ouagadougou	71
II.1.2. Chauffe-eau solaire à capteurs plans : utilisation dans un hôtel à Ouagadougou	74
II.2. INSTALLATIONS DOMESTIQUES INDIVIDUELLES	76
II.2.1. Chauffe-eau solaire à tubes sous vide : cas d'un ménage à Lomé	76
II.2.2. Chauffe-eau solaire à capteurs plans : cas d'un ménage à Ouagadougou	78
III. MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE	79
III.1. INSTRUMENTATION ET COLLECTE DE DONNÉES	79
III.2. ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES	84
III.3. ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉCONOMIQUES	86
III.3.1. Principes généraux	86
III.3.2. Analyse des cas d'étude et scénarios économiques	88
III.4. ÉVALUATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES	92
IV. CONCLUSIONS	93
CHAPITRE 4. ANALYSE DES PERFORMANCES TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES DES CHAUFFE-EAU SOLAIRES THERMIQUES DANS DES RÉGIONS HUMIDES ET ARIDES D'AFRIQUE DE L'OUEST	94
I. INTRODUCTION	95
II. ANALYSE DES PERFORMANCES TECHNIQUES	95
II.1. CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEURS AUTOSTOCKEURS DANS LA BUANDERIE D'UN HÔPITAL À OUAGADOUGOU	95
II.2. CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEUR PLAN DANS UN HOTEL À OUAGADOUGOU	107
II.3. CHAUFFE-EAU SOLAIRE À TUBES SOUS-VIDE DANS UN MÉNAGE À LOMÉ	112
II.4. CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEUR PLAN DANS UN MÉNAGE À OUAGADOUGOU	118
III. ANALYSE DES PERFORMANCES ÉCONOMIQUES	118
III.1. CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEURS AUTOSTOCKEURS DANS LA BUANDERIE D'UN HÔPITAL À OUAGADOUGOU	118
III.2. CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEUR PLAN DANS UN HOTEL À OUAGADOUGOU	120
III.3. CHAUFFE-EAU SOLAIRE À TUBES SOUS-VIDE DANS UN MÉNAGE À LOMÉ	121
III.4. CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEUR PLAN DANS UN MÉNAGE À OUAGADOUGOU	122

IV. ANALYSE DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES	123
V. CONCLUSION	124
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	127
BIBLIOGRAPHIE	131

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Capacité mondiale des systèmes d'énergie renouvelable en exploitation en 2022 [GW_{el}], [GW_{th}] et énergie fournie [TWh_{el}], [TWh_{th}] [10].	7
Figure 2. Principales zones climatiques en Afrique de l'Ouest.	10
Figure 3. Carte d'Afrique de l'Ouest (a) de l'irradiation horizontale globale et (b) de l'irradiation normale directe. Ces cartes sont générées à partir de Solargis: https://solargis.com .	11
Figure 4. Prix de l'électricité pour un entrepôt commercial en 2019, selon les données des rapports Doing Business 2020 de la Banque mondiale [41].	13
Figure 5. Consommations spécifiques de combustibles ligneux dans l'espace UEMOA en 2018 (kg par jour et par ménage) [40].	14
Figure 6. CES de fabrication locale installés dans un lotissement ENAREM à Niamey (Niger) dans les années 1970.	35
Figure 7. Températures ambiantes et irradiation solaire mensuelle à (a) Ouagadougou et (b) Lomé. Sources des données : irradiation horizontale globale et température ambiante moyenne : logiciel RETScreen [150] ; températures moyenne maximale et minimale : base de données MERRA-2 de la NASA (moyenne des données de 2000 à 2022).	47
Figure 8 : Répartition de la consommation d'eau chaude par activité des ménages à (a) Ouagadougou et (b) Lomé.	53
Figure 9 : Répartition des sources d'énergie utilisées pour chauffer l'eau(a) Ouagadougou et (b) Lomé.	54
Figure 10 : Profils temporels de l'utilisation de l'eau chaude selon la période de la journée à (a) Ouagadougou et (b) à Lomé.	55
Figure 11 : Profils temporels de la consommation d'eau chaude par saison à (a) Ouagadougou et (b) à Lomé.	56
Figure 12 : Répartition des CES selon le type de capteur à (a) Ouagadougou et (b) à Lomé.	57
Figure 13 : Niveaux de satisfaction liés aux CES à Ouagadougou.	57
Figure 14 : Principaux problèmes rencontrés avec les CES à Ouagadougou.	58
Figure 15 : Réponses à la question « Seriez-vous prêt à payer/adopter la technologie du CES ? Pourquoi ? » à (a) Ouagadougou et (b) à Lomé.	60
Figure 16. CES autostockeur SUNEKO et (b) sa section transversale (adapté des Réf. [160,161]).	72
Figure 17. CES et principaux composants de surveillance sur le mur du bâtiment de la buanderie	73
Figure 18. CES et principaux composants du suivi sur le mur du bâtiment de la buanderie à l'hôpital.	74
Figure 19. (a) CES suivi dans l'hôtel à Ouagadougou (nettoyé), (b) recouvert de poussière, et (c) vue éclatée du réservoir.	76
Figure 20. CES installé sur le toit du ménage à Lomé.	77
Figure 21. CES installé sur le toit du ménage à Ouagadougou.	78
Figure 22. Mise en place des éléments du compteur de chaleur : exemple (a) du CES à l'hôtel à Ouagadougou et (b) dans le ménage à Lomé.	82
Figure 23. (a) Valeurs mesurées et (b) répartition de l'irradiation solaire journalière sur un plan horizontal à Ouagadougou (du 13 avril 2022 au 12 avril 2023).	96
Figure 24. Irradiation solaire mesurée sur un plan horizontal à Ouagadougou (du 13 avril 2022 au 12 avril 2023) et valeurs calculées sur une surface inclinée à 35° à l'aide de RETScreen. Pour assurer l'uniformité des représentations annuelles avec les autres sites, les données sont représentées de janvier à décembre, en attribuant chaque valeur au mois correspondant à la période de mesure. Par exemple, "Janvier" correspond à janvier 2023 tandis que "Juillet" correspond juillet 2022.	97
Figure 25. Buanderie d'hôpital : (a) température ambiante, (b) température d'entrée et (c) de sortie du CES.	98
Figure 26. Buanderie d'hôpital : répartition de la température d'entrée de l'eau du CES en fonctionnement en fonction de la température ambiante. Les températures « élevées » de l'eau froide, en particulier celles dépassant 35°C , coïncident généralement avec les premières prises d'eau, correspondant à l'eau stockée dans les canalisations pendant un certain temps et influencée par la température ambiante et une potentielle conduction thermique depuis le CES.	99
Figure 27. Buanderie d'hôpital : évolution du volume quotidien cumulé d'eau chaude fournie par le CES, de l'irradiation solaire, ainsi que des températures d'entrée et de sortie de l'eau du CES en fonctionnement, durant la semaine du 9 au 16 janvier 2023.	99

Figure 28. Buanderie d'hôpital : consommation mensuelle d'eau et énergie utile fournie par le CES (du 13 avril 2022 au 12 avril 2023).	101
Figure 29. Buanderie d'hôpital : énergie utile quotidienne fournie par le CES en fonction de la consommation quotidienne d'eau (du 13 avril 2022 au 14 février 2023).	101
Figure 30. Buanderie d'hôpital : fraction solaire mensuelle estimée et rendement du CES (du 13 avril 2022 au 12 avril 2023).	102
Figure 31. Buanderie d'hôpital : installation du CES à tubes sous-vide à côté du CES autostokeur.	106
Figure 32. Buanderie d'hôpital : consommation quotidienne d'eau et énergie utile cumulée fournie par le CES à tubes sous-vide à la machine à laver, du 21 décembre 2023 au 20 janvier 2024.	107
Figure 33. Hôtel : (a) profil annuel de consommation d'eau chaude et (b) profil de production d'énergie utile basé sur les données mesurées. La valeur inhabituelle observée en août 2023 a été exclue du calcul du profil moyen. La température ambiante correspond à la température moyenne mensuelle enregistrée sur le campus de 2iE d'octobre 2019 à octobre 2024. L'histogramme représente la moyenne sur cette période de quatre ans des irradiances globales mensuelles dans le plan inclinée du CES.	109
Figure 34. Hôtel : énergie utile fournie en fonction du volume d'eau extrait.	110
Figure 35. Hôtel : bilan énergétique annuel et rendement (basé sur la surface brute) du CES au cours des quatre dernières années.	112
Figure 36. Ménage à Lomé : (a) température ambiante, (b) température d'entrée et (c) de sortie du CES.	113
Figure 37 : Ménage à Lomé : distribution horaire de la température sur l'année.	114
Figure 38. Ménage à Lomé : distribution de la température de l'eau à l'entrée du CES pendant le fonctionnement en fonction de la température ambiante.	115
Figure 39. Ménage à Lomé : utilisation mensuelle d'eau mensuelle et énergie utile fournie par le CES.	116
Figure 40. Ménage à Lomé : estimation du rendement mensuel du système	117

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Cibles définies pour le chauffage solaire de l'eau d'ici 2030 dans les plans d'action nationaux pour les énergies renouvelables des pays d'Afrique de l'Ouest et mécanismes de soutien existants.	16
Tableau 2 : Aperçu de l'utilisation et du développement des CES en Afrique de l'Ouest [11].	30
Tableau 3. Questionnaire retenu pour l'enquête.	50
Tableau 4 : Dépenses journalières (F CFA) pour la préparation d'eau chaude à l'aide de charbon de bois	55
Tableau 5 : Typologie des chauffe-eau solaires thermiques suivis à Ouagadougou et à Lomé.	71
Tableau 6. Caractéristiques techniques et coût du CES installé à la buanderie de l'hôpital à Ouagadougou [160,161]	73
Tableau 7. Caractéristiques techniques et coût du CES installé dans l'hôtel à Ouagadougou [165,166].....	75
Tableau 8. Caractéristiques techniques et coût du CES installé dans le ménage à Lomé [167].....	77
Tableau 9. Caractéristiques techniques et coût du CES installé dans le ménage à Ouagadougou [168].....	78
Tableau 10 : Grandeurs mesurées et matériels utilisés.	80
Tableau 11 : Spécification des compteurs de chaleur utilisés.	81
Tableau 12. Période de suivi des installations.....	82
Tableau 13. Récapitulatif des coûts et scénarios d'évaluation économique des CES.	88
Tableau 14. Facteurs d'émission de CO ₂ adoptés par source d'énergie conventionnelle.....	93
Tableau 15. Comparaison des différents types de systèmes thermosiphons dans le contexte local.	105
Tableau 16. Données techniques et économiques du système expérimental du CES à tubes sous-vide.	105
Tableau 17. Buanderie d'hôpital fonctionnant avec le CES autostokeur : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années.	119
Tableau 18. Buanderie d'hôpital fonctionnant avec le CES à tubes sous-vide : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années.	120
Tableau 19. Hôtel : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années. Coût moyen de l'électricité suivant les factures de 2023 : 159 FCFA/kWh.....	121
Tableau 20. Ménage à Lomé : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années.	121
Tableau 21. Ménage à Ouagadougou : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années.....	122
Tableau 22. Emissions de CO ₂ évitées grâce aux CES.	123
Tableau 23. Emissions de CO ₂ évitées grâce aux CES exprimées en nombre d'arbres plantés par an.	123

NOMENCLATURE

Abréviations

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASN	Association senegalaise de normalisation
BAD	Banque africaine de développement
BEIE	Bureau de l'Efficacité et de l'Innovation Énergétique
CEAO	Communauté Économique de l'Afrique de l'Ouest
CEDEAO	Communauté Économique des États de l'Afrique de l'Ouest
CEE	Chauffe-eau électrique
CEET	Compagnie Énergie Électrique du Togo
CES	Chauffe-eau solaire
CNESOLER	Centre National de l'Énergie Solaire et des Énergies Renouvelables
CRES	Centre Régional de l'Énergie Solaire
CSP	Solaire thermique à concentration
CSPro	Census and Survey Processing System
DPP	Temps de retour sur investissement actualisé
ECS	Eau chaude sanitaire
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
ISO	Organisation internationale de normalisation
MENA	La région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord
NESP	Nigerian Energy Support Programme [Programme nigérian de soutien à l'énergie]
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONG	Organisation non gouvernementale
PANER	Plan d'Actions National des Energies Renouvelables
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PV	Photovoltaïque
PVT	Capteur photovoltaïque thermique
R&D	Recherche et développement
SON	Standards Organisation of Nigeria [Agence Nigériane de Normalisation]
TSVD	Capteur tubes sous-vide direct
TVA	Taxe sur la valeur ajoutée
UEMOA	Union Economique et Monétaire Ouest-Africaine
USD	Dollar américains
VAN	Valeur actuelle nette

Symboles

A	Surface du capteur	[m ²]
c	Capacité calorifique spécifique de l'eau	[J/kg/°C]
CF	Flux de trésorerie annuel	[FCFA]
DPP	Temps de retour sur investissement actualisé	[an]
EF	Facteur d'émission	[kgCO ₂ /kWh]
f	Taux de couverture solaire	[-]
i	Taux d'actualisation	[-]
I	Irradiation	[kWh/m ²]
m	Quantité d'eau fournie pour l'usage	[m ³ /s]
Q _{aux}	Energie auxiliaire requise (énergie électrique)	[kWh]
Q _{DHW}	Besoin net en chaleur	[kWh]
Q _s	Chaleur fournie par le capteur solaire	[kWh]
Q _u	Chaleur utile fournie par le chauffe-eau solaire	[kWh]
S	Économies annuelles	[FCFA]
SPP	Temps de retour sur investissement simple	[an]
SSY	Production solaire spécifique	[kWh/m ²]
t	Temps	[s ou h]
T _{ci}	Température d'entrée de l'eau dans le chauffe-eau solaire	[°C]
T _{co}	Température de sortie de l'eau du chauffe-eau solaire	[°C]
t _f	Temps final	[s ou h]
t _i	Temps initial	[s ou h]
T _{ref}	Température de référence	[°C]
η _f	Rendement de conversion	[-]
η _{sol}	Rendement du circuit primaire	[-]
η _{sys}	Rendement du système	[-]
ΔC0	Coût supplémentaire en capital (investissement initial)	[FCFA]

INTRODUCTION GENERALE

L'Afrique de l'Ouest est l'une des régions à la croissance démographique la plus rapide au monde [1,2], avec une population qui dépassera celle de l'Europe d'ici 2050 [3]. Cependant, elle est particulièrement vulnérable aux changements climatiques, avec des températures augmentant 1,5 fois plus vite que la moyenne mondiale [4]. L'accès à l'électricité y est limité (56% seulement) [5] et les coupures de courant fréquentes, notamment en saison sèche. La majorité de la population dépend de la biomasse traditionnelle pour la cuisson et le chauffage, ce qui entraîne des problèmes de santé et de déforestation [6,7].

Cependant, les systèmes solaires thermiques offrent une solution durable pour réduire la dépendance au bois et aux combustibles fossiles, améliorer la stabilité des réseaux électriques [8], et accroître l'accès et la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. En effet, éviter de dégrader et de gaspiller l'électricité en la dédiant au chauffage de l'eau et privilégier l'utilisation de systèmes spécifiques de chauffage d'eau, tels que les chauffe-eau solaires (CES), permettrait de réserver cette énergie, plus noble, à des usages plus exigeants. Cela contribuerait également à réduire les délestages, et à augmenter le taux de pénétration des énergies renouvelables.

Bien que tous les pays de la région incluent les énergies renouvelables dans leurs stratégies, la visibilité de la technologie solaire thermique reste limitée dans les agendas nationaux. Malgré un ensoleillement abondant, l'exploitation des technologies solaires thermiques est peu intégrée dans les usages actuels dans la région [9]. Cette adoption limitée reflète divers obstacles, tels qu'un manque de confiance des utilisateurs dans les avantages économiques des chauffe-eau solaires (CES) et l'absence de démonstrations concrètes de leurs performances en conditions réelles [9]. Pourtant, les utilisations actuelles suggèrent un potentiel significatif non exploité pour répondre aux besoins variés en eau chaude que ce soit dans les infrastructures domestiques ou tertiaires.

Dans ce contexte, plusieurs questions se posent : pourquoi le potentiel solaire n'est-il pas pleinement exploité pour répondre aux besoins en eau chaude des ménages ? Quels sont les principaux obstacles à l'adoption des CES en Afrique de l'Ouest, notamment dans les zones urbaines ? Les performances techniques et économiques des CES en conditions réelles sont-elles suffisamment convaincantes pour justifier leur promotion comme solution énergétique durable ?

Pour répondre efficacement à ces enjeux, il est impératif de renforcer les connaissances sur les besoins spécifiques en eau chaude des différents types de bâtiments, tels que les ménages, les

hôtels, les écoles et les établissements de santé. Par ailleurs, une évaluation rigoureuse des performances des CES en conditions réelles d'utilisation est indispensable pour démontrer leur pertinence et leur capacité à satisfaire les exigences locales.

Cette thèse s'inscrit dans une démarche scientifique visant à combler les lacunes existantes en matière de données sur les besoins en eau chaude, les performances des systèmes de chauffage solaires, la faisabilité technique et économique des CES dans divers contextes spécifiques à l'Afrique de l'Ouest. Elle cherche à établir des bases solides pour une intégration accrue et rationnelle de ces technologies, en prenant en compte les réalités socioculturelles, économiques et climatiques de la région.

L'analyse se concentre spécifiquement sur les performances des CES dans des infrastructures domestiques et tertiaires, notamment les ménages, les hôtels et les structures sanitaires. Ces segments d'application, en raison de leurs besoins variés et de leur potentiel en termes d'économie d'énergie, offrent des opportunités stratégiques pour évaluer le rendement des systèmes de CES et identifier des leviers pour encourager leur adoption.

Enfin, cette recherche met en lumière, à travers des évaluations approfondies en conditions réelles, les performances techniques et économiques des CES. Ces résultats seront essentiels pour surmonter les obstacles actuels à leur déploiement à grande échelle et pour promouvoir les systèmes solaires thermiques comme des solutions viables et durables dans le cadre de la transition énergétique régionale.

Ce travail de recherche part de l'hypothèse que les chauffe-eau solaires thermiques peuvent constituer une alternative économiquement viable et techniquement performante dans les zones urbaines d'Afrique de l'Ouest, à condition de surmonter certains obstacles spécifiques liés aux contextes locaux. Il est également supposé que la compréhension des pratiques actuelles, des perceptions des utilisateurs et des performances des systèmes en situation réelle peut éclairer les décisions en matière de conception, de promotion et de politiques publiques.

L'objectif général de cette recherche est de contribuer à la valorisation des technologies solaires thermiques, en particulier des CES, en Afrique de l'Ouest. Cette recherche a pour but de démontrer leur pertinence technique et économique pour la fourniture de services énergétiques durables, adaptés aux besoins locaux et aux réalités socio-économiques de la région. Pour atteindre cet objectif, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis :

- Faire un état des lieux des technologies de CES en Afrique de l'Ouest, y compris les cadres réglementaires et les initiatives existantes.
- Identifier les pratiques et perceptions des ménages concernant les CES, à travers une enquête terrain.
- Évaluer les performances techniques, économiques et environnementales des systèmes de CES en conditions réelles, dans les zones arides et humides d'Afrique de l'Ouest, sur une période de 12 mois au moins.

L'ensemble des travaux menés dans le cadre de cette thèse est structuré en quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre présente un aperçu des systèmes de chauffe-eau solaire en Afrique de l'Ouest ainsi qu'un cadre théorique pour guider l'analyse du potentiel des technologies solaires thermiques pour répondre aux besoins en eau chaude dans la région. Ce chapitre décrit les cadres politiques et techniques existantes, en mettant en évidence les politiques énergétiques régionales et les mesures de soutien. Il présente également une revue des travaux antérieurs sur les CES dans la région.

Le deuxième chapitre détaille les résultats d'une enquête de terrain réalisée dans des zones urbaines de Ouagadougou (Burkina Faso) et de Lomé (Togo). Cette enquête a pour objectif de documenter les pratiques actuelles de chauffage de l'eau, d'évaluer les besoins en eau chaude des ménages, et de mesurer leur niveau d'adoption des technologies de chauffe-eau solaires. Ce chapitre aborde également les obstacles identifiés, qu'ils soient d'ordre financier, technique ou socioculturel, qui freinent l'intégration de ces systèmes.

Le troisième chapitre est consacré à la méthodologie d'étude des systèmes de chauffage d'eau solaire en situation réelle, avec une présentation détaillée des systèmes de CES thermiques analysés en situation réelle. Il décrit les protocoles de collecte de données, les outils d'analyse, ainsi que les critères utilisés pour évaluer la viabilité technique, économique et environnementale des systèmes étudiés. Ce chapitre prend en compte les spécificités climatiques sahéliennes et côtières, qui influencent le fonctionnement des systèmes CES dans la région.

Le quatrième chapitre se concentre sur l'analyse des performances techniques et économiques des systèmes de CES thermiques étudiés. En utilisant les données collectées, ce chapitre évalue l'efficacité énergétique, la fiabilité technique, et la rentabilité économique des systèmes observés. Les résultats sont comparés à ceux d'études internationales pour identifier les

spécificités des systèmes dans la région ouest-africaine. Ce chapitre souligne également les facteurs limitants et les opportunités d'amélioration.

CHAPITRE 1. APERÇU ET ÉTAT DES LIEUX DES SYSTÈMES D'EAU CHAUDE SOLAIRE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CADRE THÉORIQUE

I. INTRODUCTION : MARCHÉ MONDIAL DE L'ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE

La technologie des CES constitue la troisième source d'énergie renouvelable à l'échelle mondiale, se classant après l'énergie éolienne et le solaire photovoltaïque (PV) en termes de capacité installée et de production énergétique (Figure 1).

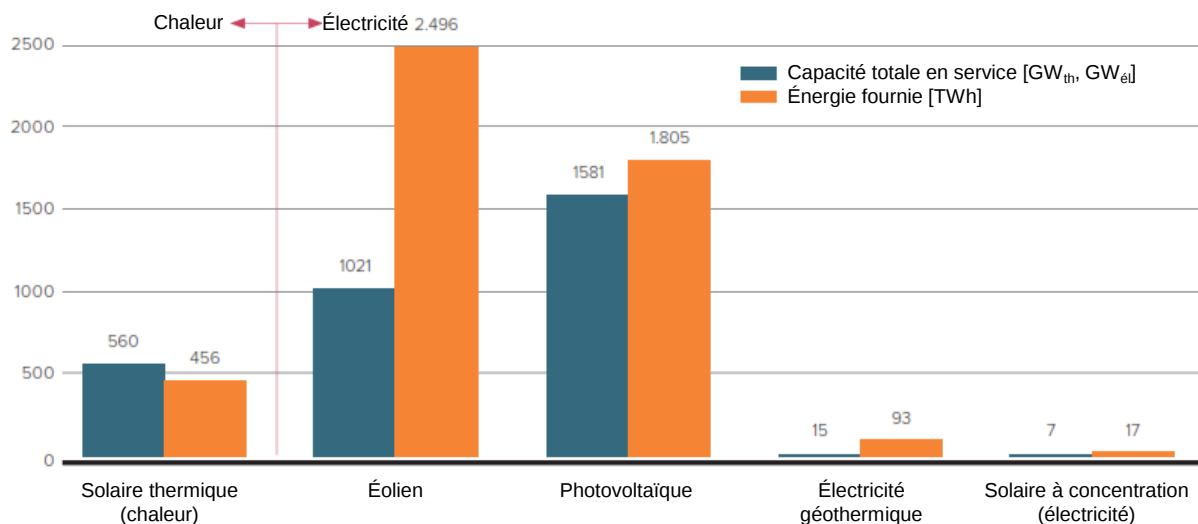


Figure 1. Capacité mondiale des systèmes d'énergie renouvelable en exploitation en 2022 [GW_{el}], [GW_{th}] et énergie fournie [TWh_{el}], [TWh_{th}] [10].

L'utilisation de l'énergie solaire thermique dépend fortement de la localisation géographique et peut être généralement classée en fonction du type de capteur solaire thermique utilisé (tubes sous vide, capteurs plans vitrés ou non vitrés pour l'eau, capteurs vitrés ou non vitrés pour l'air, capteurs à concentration), de la méthode de circulation du fluide caloporteur (circulation naturelle par thermosiphon ou circulation forcée par des systèmes de pompage), ainsi que du type d'application (production d'eau chaude sanitaire, chauffage des locaux ou des piscines, chauffage solaire urbain, refroidissement solaire par sorption, chauffage des procédés industriels, cuisson et séchage solaires) [11]. Les pays présentant la plus grande capacité installée par habitant ($\text{kW}_{\text{th}}/\text{habitant}$) en systèmes solaires thermiques, notamment pour la production d'eau chaude sanitaire, se situent principalement dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) [10].

L'utilisation du CES constitue l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. La transition des sources d'énergie conventionnelles, telles que l'électricité, le gaz ou le bois de chauffage, vers le CES offre de nombreux avantages, en particulier dans les pays en développement. Comme le souligne le Programme des Nations Unies pour l'Environnement

(PNUE) [12], ces avantages comprennent : le renforcement de la sécurité énergétique, la création de nouvelles opportunités de développement économique, l'amélioration de l'accès à une énergie durable, ainsi que la stabilité et la résilience accrues des réseaux électriques. Par ailleurs, cette technologie contribue de manière significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les estimations indiquent que la production d'eau chaude sanitaire représentait 94 % de l'énergie générée par les CES, principalement grâce aux petits systèmes installés dans les maisons individuelles (58 %), ainsi qu'aux systèmes de plus grande envergure raccordés à des maisons collectives, hôtels, écoles, etc. (36 %) [13]. Dans les régions tempérées, les CES peuvent généralement couvrir entre 40 % et 80 % des besoins en eau chaude sanitaire, et jusqu'à 100 % dans les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement et de faibles variations saisonnières (par exemple, dans les zones équatoriales) [12]. En 2022, 122 millions de CES étaient en fonctionnement, dont 55 % étaient des systèmes à thermosiphon [10].

Les régions chaudes, notamment l'Afrique, l'Amérique du Sud, le sud de l'Europe et la zone MENA, sont celles où les systèmes à thermosiphon sont les plus répandus. Dans ces zones, les capteurs plans sont généralement privilégiés, tandis qu'en Chine, les capteurs à tubes-sous vide dominent le marché [10].

Les CES sont déployés à différentes échelles, allant des installations individuelles pour les ménages aux systèmes de distribution de chaleur à l'échelle urbaine. La chaleur solaire est également utilisée dans les processus industriels pour répondre aux besoins thermiques d'au moins 975 unités de production à travers le monde, avec une surface totale de capteurs atteignant 1,23 million de m² en 2021. Ces applications concernent principalement les secteurs minier, agroalimentaire et textile [14].

Plusieurs pays ont mis en place diverses politiques pour encourager le développement des CES [15]. En Afrique, des stratégies spécifiques, des plans volontaires ou des feuilles de route ont été élaborés dans les régions de l'Afrique australe [16–18], d'Afrique du Nord [19,20], qui correspondent à peu près aux zones les plus froides du continent [21,22], ainsi qu'en Afrique de l'Est [23,24]. Le programme le plus réussi est probablement PROSOL [19,20], qui est également le programme de diffusion des CES de référence dans le monde, du moins dans les pays en développement.

En Europe et en Chine, les applications de CES ont récemment perdu des parts de marché en raison de la concurrence accrue des systèmes photovoltaïques et des pompes à chaleur [14]. De

plus, une technologie émergente, les capteurs photovoltaïques thermiques (PVT), permet la production simultanée de chaleur solaire et d'électricité solaire au sein d'un même capteur, offrant ainsi des rendements énergétiques plus élevés par unité de surface [13].

II. EAU CHAUDE SOLAIRE EN AFRIQUE DE L'OUEST

II.1. Conditions climatiques, ressources énergétiques et politiques pour le solaire thermique en Afrique de l'Ouest

II.1.1. Zones climatiques et ressources solaires en Afrique de l'Ouest

Les conditions climatiques influencent de manière déterminante l'utilisation, les besoins et les performances des technologies solaires thermiques, il est donc essentiel de présenter brièvement les spécificités climatiques de l'Afrique de l'Ouest. En effet, cette région se caractérise par une diversité remarquable de zones climatiques (Figure 2) [25,26], allant des régions tropicales humides du sud jusqu'aux zones arides du nord, en bordure du désert du Sahara. Entre ces deux extrêmes se trouve une zone de transition, souvent désignée sous le nom de Sahel, qui marque la frontière entre le climat de savane tropicale et les régions désertiques, avec un paysage typique de steppe aride.

Par ailleurs, il convient de souligner que l'Afrique de l'Ouest est, en moyenne, la région la plus chaude du monde, avec le Burkina Faso et le Mali en tête des pays les plus chauds, sur la base de la température ambiante moyenne annuelle [21,22]. De plus, le climat régional est principalement régi par la mousson d'Afrique de l'Ouest, qui entraîne une inversion saisonnière des vents dominants. Ainsi, en saison sèche froide, l'Harmattan, un vent sec soufflant du nord-est depuis le Sahara, transporte d'importantes quantités de sable et de poussière vers le sud. En revanche, pendant les mois de la saison de pluie, ces vents cèdent la place aux alizés de mousson provenant du sud-ouest, apportant ainsi les précipitations annuelles [27]. En ce qui concerne les précipitations, la région connaît généralement une seule saison des pluies, dont la durée varie d'un à six mois, s'étendant du sud du Sahara jusqu'aux zones côtières humides. Toutefois, il est important de noter que les régions méridionales des pays côtiers, allant du Libéria au Nigéria, se distinguent par la présence de deux saisons des pluies : une longue suivie d'une plus courte [26,28].

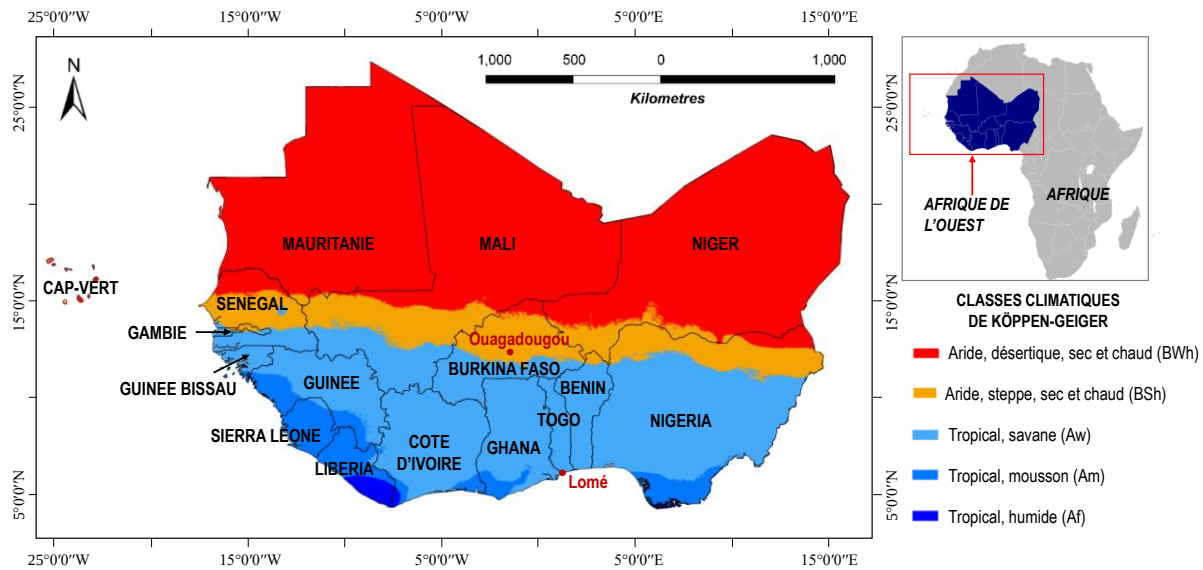


Figure 2. Principales zones climatiques en Afrique de l'Ouest.

Par exemple, Ouagadougou est située dans la zone aride, au sein de la région sahélienne. La saison des pluies s'étend généralement de mai à octobre, août étant le mois le plus pluvieux. En revanche, la période de l'Harmattan, qui dure de fin novembre à mi-mars [9], et correspond à l'hiver local, les températures ambiantes atteignent leurs valeurs minimales, notamment le matin (10–15 °C). En ce qui concerne Lomé, située en zone humide, la ville bénéficie d'un climat tropical marqué par quatre saisons distinctes, composées de deux périodes pluvieuses et deux périodes sèches. La première saison des pluies, qui est la plus longue, s'étend de la fin mars à juillet et génère des précipitations importantes dans la région. Cette période est suivie par une saison des pluies plus courte, qui a lieu en septembre et octobre. Entre ces deux phases, Lomé traverse une saison sèche plus fraîche, qui dure de juillet à août, offrant ainsi un répit temporaire à la chaleur. Enfin, la saison sèche principale, qui se déroule de novembre à mars, est caractérisée par des températures plus élevées (~33 °C) et des précipitations presque inexistantes.

La production d'énergie par les technologies solaires est généralement proportionnelle à l'irradiation solaire disponible sur chaque site. En effet, la plupart des technologies solaires thermiques reposent sur l'irradiation globale, tandis que les applications à concentration, quant à elles, nécessitent une irradiation normale directe. La Figure 3 présente la répartition des ressources solaires en Afrique de l'Ouest, illustrant ainsi la variabilité des conditions climatiques et leur impact sur la production d'énergie solaire dans la région.

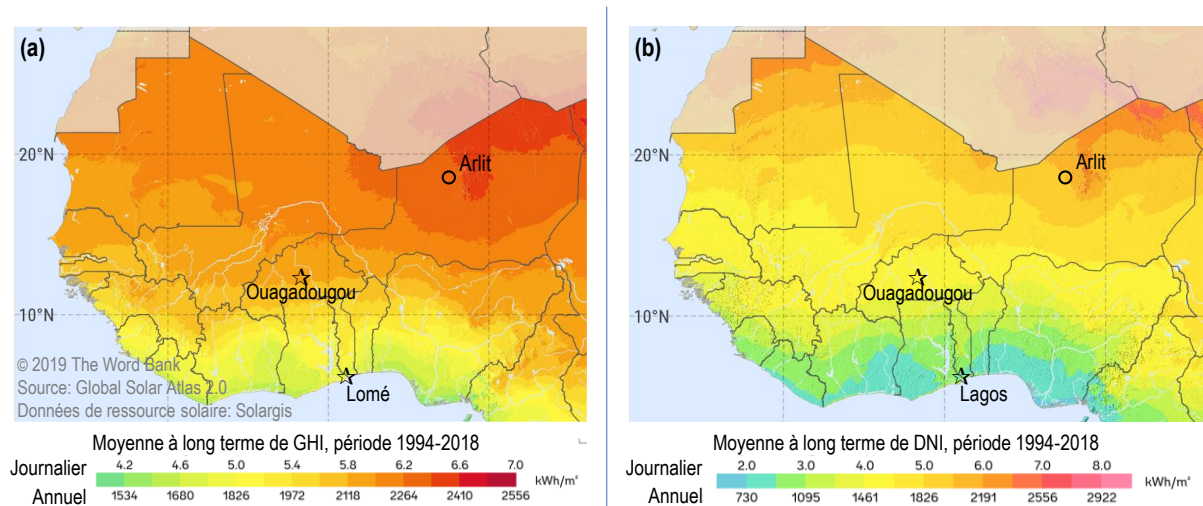


Figure 3. Carte d'Afrique de l'Ouest (a) de l'irradiation horizontale globale et (b) de l'irradiation normale directe. Ces cartes sont générées à partir de Solargis: <https://solargis.com>.

L'irradiation solaire en Afrique de l'Ouest présente des valeurs comprises entre 1500 et 2600 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ (Figure 3a), avec des variations mensuelles relativement limitées. Il est intéressant de noter que, quelle que soit la localisation, la moyenne quotidienne du mois le moins ensoleillé demeure toujours supérieure à la moitié de celle du mois le plus ensoleillé. Par exemple, selon les données de Retscreen [29], à Lomé (Togo), la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire journalière est minimale en août et vaut $4,34 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$, tandis que le maximum atteint $5,61 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$ en février. De même, à Ouagadougou (Burkina Faso), l'irradiation minimale observée en décembre est de $5,32 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$, tandis que le maximum en mars s'élève à $6,45 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$. À Arlit (Niger), les valeurs varient de $4,40 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$ en décembre à un maximum de $7,31 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$ en mai.

Par ailleurs, l'irradiation normale directe est également abondante dans la région. Toutefois, elle demeure relativement faible dans les zones situées au sud (Figure 3b). En revanche, dans le nord de la région, elle est particulièrement élevée et considérée comme optimale pour l'implantation de centrales solaires à concentration (CSP), comme en témoigne le cas d'Arlit au Niger (Figure 3b) [30].

Enfin, des études récentes [31] soulignent que le changement climatique pourrait engendrer une diminution de l'irradiation solaire dans la région, avec des effets plus prononcés dans la zone sahélienne.

II.1.2. Consommation d'énergie thermique et options alternatives dans la région

La production d'eau chaude en Afrique de l'Ouest dépend largement des ressources disponibles localement. Dans les zones rurales, elle repose principalement sur la biomasse traditionnelle, tandis que dans les zones urbaines, le charbon de bois et le gaz de pétrole liquéfié (GPL) sont couramment utilisés. L'utilisation du kérosène est également répandue, en particulier dans des pays producteurs de pétrole comme le Nigeria [32]. Quant à l'électricité, elle est principalement utilisée pour la production d'eau chaude dans le secteur tertiaire, notamment dans les hôtels et les hôpitaux.

Le taux d'accès à l'électricité en Afrique de l'Ouest s'élève à 56 %, ce qui constitue la moyenne régionale la plus élevée en Afrique subsaharienne, bien qu'il existe un contraste saisissant entre les zones rurales et urbaines [5]. Environ 70 % de la population de cette région vit en milieu rural, mais seulement 28 % de cette population a accès à l'électricité, contre 87 % en milieu urbain [5]. Le taux d'accès à l'électricité en milieu rural peut être aussi bas que 2 % dans certains pays sahéliens comme le Burkina Faso ou le Niger, alors qu'il atteint 75 % au Ghana et même 89 % au Cabo Verde. En 2020, trois (3) des vingt (20) pays affichant les plus grands déficits d'accès à l'électricité dans le monde se trouvent en Afrique de l'Ouest [33]. L'électricité fournie dans la région est généralement de mauvaise qualité, coûteuse et peu fiable [34]. La production électrique (en TWh) en Afrique de l'Ouest est principalement dominée par les centrales utilisant des combustibles fossiles (environ 70 %) [35]. Les pays de la région figurent parmi ceux ayant les tarifs d'électricité domestique les plus élevés d'Afrique [36,37]. Les tarifs de l'électricité pour les entrepôts commerciaux en 2019 dans cette région sont présentés à la Figure 4. On note que les tarifs peuvent passer du simple au triple d'un pays à un autre, les pays affichant les tarifs les plus bas (Nigeria et Côte d'Ivoire) étant des exportateurs nets d'électricité. Il faut garder à l'esprit que la Figure 4 offre un aperçu général de la situation, car selon les contextes nationaux, les prix peuvent varier presque chaque année. Par exemple, au Ghana, une formule d'ajustement automatique est appliquée pour garantir la viabilité des services publics sans subventions gouvernementales [38,39]. En revanche, au Burkina Faso, les tarifs sont gelés depuis 2006, et le réaménagement d'octobre 2023 a principalement modifié les plages horaires de tarification (heures pleines, heures creuses), sans incidence sur les ménages. Comme ces tarifs sont exprimés en dollars américains (USD), le classement peut également dépendre des fluctuations des taux de change des devises locales. Par exemple, le tarif moyen appliqué aux utilisateurs finaux au Ghana en 2019 est 7,4 fois supérieur à celui de 2007, mais en USD, ce rapport n'est que de 1,4 [39]. Toutefois, la comparaison est plus cohérente parmi

les huit (8) pays de l'Union Economique et Monétaire Ouest-Africaine (UEMOA) à savoir le Bénin, le Burkina Faso, la Guinée-Bissau, la Côte d'Ivoire, le Mali, le Niger, le Sénégal et le Togo puisque ces pays utilisent une monnaie commune. Par ailleurs, lorsque les tarifs sont présentés hors taxes, le classement peut être complètement différent (par exemple, Tableau 10 dans [40]).

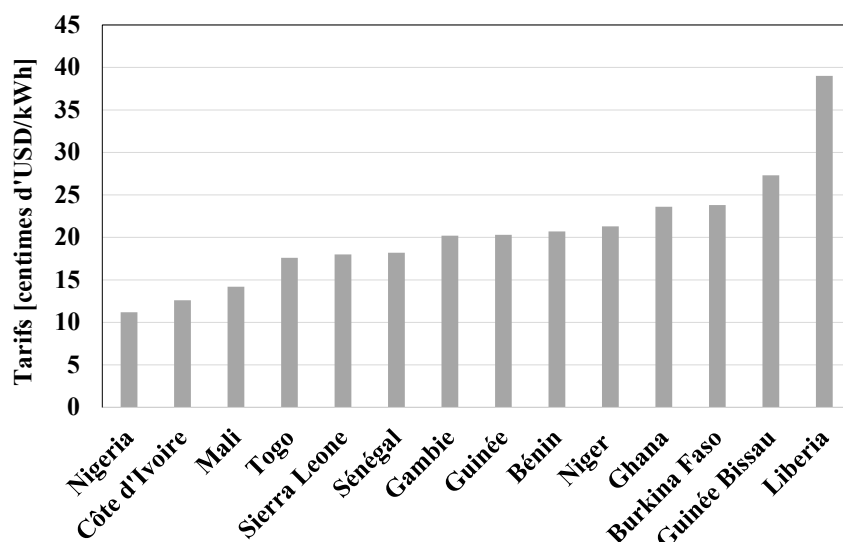


Figure 4. Prix de l'électricité pour un entrepôt commercial en 2019, selon les données des rapports Doing Business 2020 de la Banque mondiale [41].

La biomasse traditionnelle, principalement utilisée pour la cuisson, représente la majeure partie de la consommation finale d'énergie dans la région, atteignant souvent plus de 70 % dans la plupart des pays [7,40]: Environ 75 % de la population dépend du bois ou du charbon de bois pour leurs besoins quotidiens en cuisine. Par exemple, au Nigeria, près de 80 % des besoins énergétiques domestiques sont satisfaits par la combustion du bois de chauffage [8]. Au Ghana, le bois sous forme de bois de chauffe ou de charbon de bois constitue également la principale source d'énergie utilisée dans les ménages [38]. Malgré les initiatives visant à promouvoir le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le charbon de bois reste le combustible prédominant dans les zones urbaines (Figure 5), tandis que les populations rurales préfèrent utiliser le bois de chauffe dans des foyers traditionnels. L'utilisation croissante du bois de chauffe exerce une pression négative sur les écosystèmes forestiers en raison de la croissance démographique et de l'urbanisation, et a des répercussions sur la santé et la qualité de vie des populations, en particulier des femmes, des filles et des enfants [7]. Ces derniers sont souvent chargés de la collecte du bois et des tâches domestiques, comme la cuisson des repas ou le chauffage de l'eau. En effet, la cuisson se fait généralement sur des feux ouverts à trois pierres ou des foyers inefficaces. Cette pratique présente plusieurs inconvénients majeurs : elle est coûteuse, a un

impact environnemental négatif et constitue un danger pour la santé humaine. En outre, elle affecte les performances scolaires des jeunes filles, souvent contraintes de parcourir de nombreux kilomètres pour collecter du bois. Une fois ce bois utilisé, la combustion expose quotidiennement les femmes et les enfants, notamment ceux de moins de cinq (5) ans, à des niveaux de fumée toxique pouvant atteindre jusqu'à 100 fois la concentration maximale recommandée par l'OMS, entraînant ainsi de graves maladies respiratoires [42].

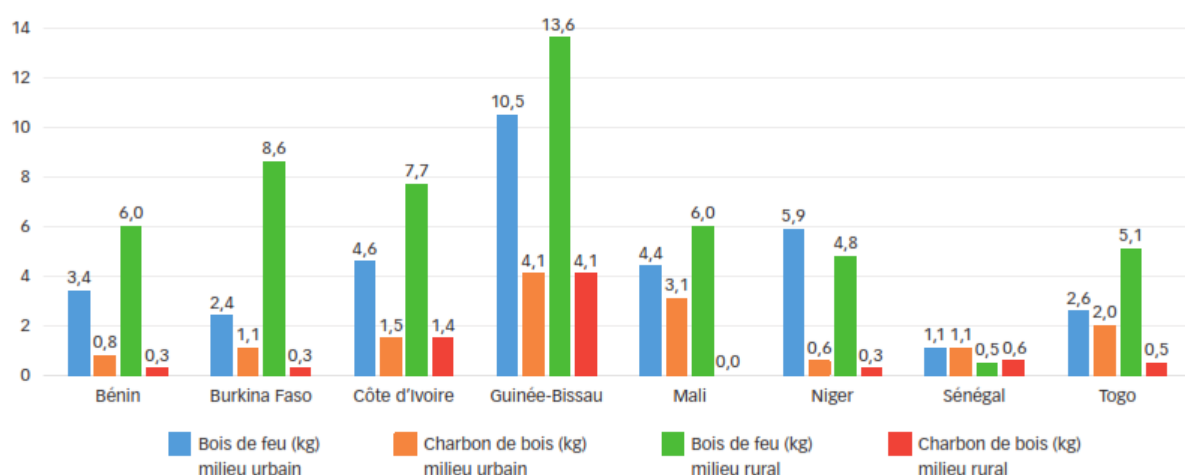


Figure 5. Consommations spécifiques de combustibles ligneux dans l'espace UEMOA en 2018 (kg par jour et par ménage) [40].

II.1.3. Objectifs et politiques pour l'eau chaude solaire en Afrique de l'Ouest

La CEDEAO a établi une politique régionale sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique [43] appuyée par les Plans d'Action Nationaux pour les Énergies Renouvelables (PANER), visant à renforcer l'utilisation des technologies d'énergies renouvelables dans les pays d'Afrique de l'Ouest [8]. Pour les CES, les objectifs fixés pour 2020 et 2030 se déclinent en plusieurs axes : (i) le nombre de résidences équipées de CES, (ii) le pourcentage de centres de santé, maternités, cuisines scolaires et internats dotés de CES, (iii) la proportion d'industries agroalimentaires utilisant les CES pour le préchauffage de l'eau de process, et (iv) la part d'hôtels équipés de CES. Le Tableau 1 présente ces cibles par pays de même que les actions prévues pour soutenir le développement des technologies solaires thermiques dans la région.

Les pays sahéliens enclavés, comme le Burkina Faso, le Niger, le Mali et la Gambie, ont instauré l'exonération des droits de douanes et de la taxe sur la valeur ajoutée (TVA) pour les CES. La Gambie garantit ces mesures sur 15 ans, et le Burkina Faso les applique depuis une décennie. En Côte d'Ivoire, une réduction de 50% de TVA existe pour les équipements solaires,

mais sa mise en œuvre reste limitée. Le Nigeria, principal producteur de pétrole en Afrique, n'offre aucune incitation. Seul le Cap-Vert impose l'usage obligatoire des CES dans certains bâtiments [44], tandis qu'en Côte d'Ivoire, une part minimale de 10% des besoins en eau chaude doit être couverte par les CES dans les grands bâtiments résidentiels et tertiaires [45].

À ce jour, aucune norme régionale spécifique aux CES n'existe. Cependant, le Sénégal dispose depuis 2014 de normes nationales (NS 013-012 et NS 013-013) pour les CES [46]. Le Ghana a également adopté deux normes ISO (GS ISO 9459-1 : 2007Ψ et GS ISO 9459-2 : 2007Ψ) pour les essais [47]. Dans certains pays, les normes européennes sont appliquées. Par exemple, des labels tels que Solar Keymark ou CSTBat ont été requis lors d'un appel d'offres public au Togo en 2020 [48].

Tableau 1 : Cibles définies pour le chauffage solaire de l'eau d'ici 2030 dans les plans d'action nationaux pour les énergies renouvelables des pays d'Afrique de l'Ouest et mécanismes de soutien existants.

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
Bénin [49]	200	80	50	80	Décret-N°2019-422 (Article 14): exonération des droits d'importation et de la TVA pour les matériels, équipements et accessoires destinés à l'installation de systèmes photovoltaïques et solaires thermiques [50].
Burkina Faso [51]		50	25	25	Article 29 de la Loi de finances n°051-2012/AN [52] et article 308 de la Loi de finances n°058-2017/AN [53]: exonération des droits de douane et de la TVA pour les équipements solaires. L'arrêté interministériel n°2020-033/ME/MINEFID/MCIA de mars 2020 [54] a précisé la liste des équipements solaires pouvant bénéficier des dispositions de la loi de finances (liste déjà incluse dans la Loi de finances n°058-2017/AN) : CES, cuiseurs solaires,

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					capteurs solaires, y compris les concentrateurs, échangeurs de chaleur, fluides caloporteurs, y compris les sels solaires, etc.
Cap-Vert [44]	▪ 100 % des nouveaux bâtiments doivent être équipés de CES ▪ et plus 20% des résidences anciennes doivent	> 20%	-	> 20%	Loi n° 86/IX/2020 (page 1184) : déduction de 30 % (au lieu de 50 % auparavant) de l'impôt sur les sociétés pour les investissements pertinents dans la production d'énergie renouvelable, la fabrication et l'assemblage d'équipements liés aux énergies renouvelables, ainsi que la recherche scientifique et les études [55]. Loi n° 16/X/2022 : exonération des droits de douane sur l'importation d'équipements et accessoires neufs et modernes destinés à la production d'énergie renouvelable, y compris les panneaux solaires (uniquement PV ?) [56].

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
	également être équipées				
Côte d'Ivoire [57]	71 939	20	20	20	Le décret interministériel n°134/MPEER/MCLU de novembre 2020 prévoit la possibilité de bénéficier d'avantages fiscaux et d'une réduction des droits de douane pour certains équipements, notamment les CES (article 25). Toutefois, il est nécessaire de se référer chaque année à la décision de la loi de finances pour obtenir une idée précise des éventuels incitatifs fiscaux. Article 359 du Code Général des Impôts : réduction de 50 % de la TVA sur les « matériels de production de l'énergie solaire ».

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					Article 7 : au moins 10 % de la demande en eau chaude sanitaire (ECS) doit être couverte par des énergies renouvelables, en particulier par des CES, dans les bâtiments résidentiels de plus de 100 m² et les bâtiments tertiaires de plus de 500 m² [45].
Gambie		-	25%	50%	Loi sur les Énergies Renouvelables (2013) : exonération fiscale pour les installations d'énergies renouvelables, incluant l'exonération des taxes d'importation et des droits de douane, de l'impôt sur les sociétés, de la TVA et des taxes sur les ventes au détail, pour une durée de 15 ans [58–60].
Ghana [61]	-	-	-	-	Le Plan Directeur pour les Énergies Renouvelables du Ghana vise l'installation de 135 000 CES d'ici 2030 et prévoit les stratégies de promotion suivantes :

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					(i) Mise en place d'un mécanisme financier offrant des incitations (subventions) aux hôtels et institutions qui installent des systèmes de chauffage de l'eau [61,62], (ii) Établissement d'un cadre facilitant l'intégration de volets de recherche et développement sur les CES dans les institutions scientifiques et d'ingénierie [62].
Guinée-Bissau [63]	20%	80	50		Il n'existe pas de cadre réglementaire spécifique aux énergies renouvelables, mais certaines mesures financières et réglementaires sont prévues pour promouvoir la technologie des CES, notamment en favorisant le développement du marché du solaire thermique [63].
Libéria [64]	52 900	10	15	15	Le décret exécutif n°107 d'avril 2022 suspend les taxes sur les droits d'importation pour divers produits solaires,

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					notamment les CES, les séchoirs solaires, les cuisinières solaires, les incubateurs à œufs solaires et les chambres froides solaires. Il est à noter que, pour la description des « CES », le décret mentionne des « systèmes de chauffage d'eau en courant continu et accessoires » [65]. Le plan d'action pour l'efficacité énergétique, en vigueur de 2016 à 2030, a mis en place certaines mesures réglementaires dans le secteur de l'énergie [66]. Il vise également à : (i) établir les procédures et conditions pour que les installateurs obtiennent un certificat d'installation d'énergies renouvelables, incluant les systèmes solaires thermiques, et organiser des formations à cet effet ;

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					(ii) promouvoir l'entrepreneuriat dans le domaine des systèmes solaires thermiques.
Mali [67]	206 000	62,49	68,81	21,42	Le décret n°2020-012/P-RM du 23 mars 2020 prévoit l'exonération de TVA, des droits d'importation et des taxes pour les équipements liés aux énergies renouvelables [68]. Depuis 2010, un mécanisme de financement des énergies renouvelables est en place dans le cadre de la stratégie développement de la maîtrise de l'énergie au Mali [69]. Depuis 2016, un cadre financier soutient un programme politique visant à promouvoir l'installation de chauffe-eau solaires (CES) au niveau résidentiel. Ce programme ambitionne d'équiper environ 200 000 foyers maliens de CES d'ici 2030 [70].

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					Un investissement de 218 millions d'euros est prévu pour équiper des maisons résidentielles, des hôtels et des centres de santé avec des CES entre 2010 et 2030 [71]. Pour le CES « ConfSol », fabriqué par le Centre National de l'Énergie Solaire et des Énergies Renouvelables (CNESOLER), un mécanisme de subvention a été mis en place. Ces CES sont subventionnés à hauteur de 90 % par des financements extérieurs et 10 % par le budget de l'État [72]. Par ailleurs, un cadre de transfert technologique est en cours de mise en place pour externaliser la production des CES ConfSol vers le secteur privé [72].
Niger [73]	91 455	50	100	50	La loi n°2016-05 du 17 mai 2016 (Article 69) prévoit une exonération des droits et taxes d'importation pour les

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					équipements et matériaux liés aux énergies renouvelables, bien que ces éléments doivent encore être spécifiés[74]. La décision conjointe n°-0029 [75] fournit une liste de divers équipements solaires et éoliens, incluant les onduleurs, régulateurs de charge, batteries, etc. Cependant, la seule mention se rapprochant des équipements solaires thermiques est « kits solaires mono bloc et accessoires ».
Nigéria [76]		7	5	7	Actuellement, il n'existe pas de codes spécifiques pour les CES au Nigéria. Cependant, il est prévu que l'Organisation des Normes du Nigéria (SON) développe une norme nationale pour les CES dans un avenir proche [77]. Le Programme de Soutien à l'Énergie du Nigéria (NESP), mis en œuvre par l'Agence Allemande de Coopération

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					Internationale (GIZ), a collaboré avec le Ministère fédéral de l'Énergie, des Travaux publics et du Logement pour élaborer le Code de l'Efficacité Énergétique des Bâtiments (BEEC). Ce code soutient la régulation de la consommation énergétique des bâtiments et encourage l'utilisation des CES [77–79].
Sénégal [80]	328 000	80	10	80	Décret interministériel n°010158 du 28 mai 2020 : exonération de la TVA pour les équipements destinés à la production d'énergie renouvelable ; la liste des équipements fournie inclut les collecteurs thermiques solaires, les kits pour les CES comprenant l'échangeur de chaleur et le réservoir de stockage [81].

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					Un cadre légal et réglementaire a été mis en place pour le développement des normes d'efficacité énergétique (ASN), couvrant les différents secteurs de l'efficacité énergétique : équipements électriques, bâtiments, chauffe-eaux solaires [82]. Un investissement de 128 millions d'euros [82] est prévu pour la promotion des CES dans le cadre du déploiement du programme de mesures et d'initiatives visant à réaliser des économies d'énergie [80,82].
Sierra Leone [83]	1 880	100	60	80	La réglementation relative à la mise en œuvre de projets pour la production de dispositifs et systèmes de conversion de l'énergie solaire existe [83]. Un soutien financier est disponible pour fournir des incitations aux entrepreneurs

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					locaux afin de produire des systèmes de conversion d'énergie solaire de 2015 à 2030 [83]. Le Ministère de l'Énergie et des Ressources en Eau a prévu de diversifier les approvisionnements en énergie pour le secteur du commerce et des services en augmentant la pénétration des CES dans les hôtels, restaurants et cuisines institutionnelles entre 2015 et 2025 [83,84]. Des campagnes de sensibilisation sont en cours entre 2015 et 2025 pour promouvoir l'énergie solaire thermique et ses avantages [83].
Togo [85]	2 985	80	70	80	Jusqu'en 2019, il n'existe pas de mesure adoptée au Togo pour soutenir l'utilisation de l'énergie solaire thermique.

Pays	Principaux objectifs du solaire thermique				Lois et réglementations, politiques d'incitation et stratégies de soutien
	Nombre de ménages avec CES installés	Part des centres de santé communautaires, maternités et établissements d'enseignement (%) dotés de CES	Part de l'industrie agroalimentaire (utilisant de l'eau chaude dans son processus) utilisant des CES	Part des hôtels utilisant les CES	
					Une exonération fiscale existe uniquement pour les projets de l'État. En 2019, un accord de 12 millions d'euros a été signé entre le gouvernement togolais et la Banque Africaine de Développement (BAD) dans le cadre du projet de soutien au programme d'électrification rurale CIZO au Togo. Ce projet a équipé 122 hôpitaux de CES [86].

II.2. Technologies de chauffe-eau solaires non-concentrateurs en Afrique de l'Ouest

II.2.1. Aperçu de l'adoption des chauffe-eau solaires en Afrique de l'Ouest

Les CES à technologie non-concentratrice représentent une solution énergétique durable en Afrique de l'Ouest, bien que leur adoption reste limitée et inégale selon les pays. Les systèmes sont principalement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire, avec des applications spécifiques dans les ménages, les établissements de santé et le secteur hôtelier. Chaque pays présente des particularités en termes d'usages, de potentiel industriel et de projets de promotion. Le Tableau 2 résume les informations clés concernant l'utilisation et les initiatives liées aux CES dans les différents pays de la région.

Des pays comme le Cap-Vert et le Ghana se distinguent par une intégration plus poussée des CES, soutenue par la demande croissante des secteurs touristique et industriel. Toutefois, dans de nombreux autres pays de la région comme le Nigeria ou le Sénégal, l'adoption à grande échelle de cette technologie est freinée par un manque de sensibilisation, des coûts d'installation élevés et une production locale limitée [11]. Le développement de projets stratégiques et la mise en place de politiques adaptées sont indispensables pour exploiter pleinement le potentiel des chauffe-eau solaires en Afrique de l'Ouest.

II.2.1. Développement de l'industrie des CES dans la région

L'Afrique de l'Ouest possède une longue histoire dans le développement de l'énergie solaire, remontant aux années 1960 (Figure 6), marquée par des avancées pionnières telles que les premières pompes solaires thermodynamiques et les centrales solaires thermiques [113,115]. En 1978, la Communauté Économique de l'Afrique de l'Ouest (CEAO) a créé le Centre Régional de l'Énergie Solaire (CRES) pour former des spécialistes de l'énergie, mener des recherches et développer des systèmes solaires [113,116,117]. Cependant, le manque de financement a entraîné l'arrêt du programme régional à la fin des années 1980.

À ce jour, seuls des pays comme le Mali, le Burkina Faso [9] et, dans une moindre mesure, le Niger, disposent encore de petites entreprises ou de centres spécialisés dans la fabrication locale de CES. Toutefois, des ajustements structurels, l'insuffisance de financements et la concurrence avec les systèmes importés ont freiné leur expansion. Actuellement, les nouvelles installations sont avec une très forte prédominance des systèmes importés en raison de leurs coûts plus bas,

Tableau 2 : Aperçu de l'utilisation et du développement des CES en Afrique de l'Ouest [11].

Pays	Utilisation, état et fonctionnalités du CES	Projets et initiatives clés
Cap-Vert	Nombre relativement élevé de m² de surface de capteur installée grâce à l'utilisation dans le secteur touristique [87,88]. La majorité des hôtels et des logements résidentiels ont installé des systèmes thermosiphons et/ou des systèmes à pompe [89]. Cependant, dans les îles de Sal et de Boavista, qui représentent 74 % des lits disponibles (en 2014), les chauffe-eaux électriques à accumulation sont les principaux dispositifs de préparation d'eau chaude [89]. Une étude de 2008 a révélé que le pays est mieux adapté à la commercialisation CES (importation et vente) plutôt qu'à la production locale, en raison du manque de matières premières pour la fabrication [90]. Le secteur industriel (blanchisseries, laiteries, alimentaires) : identifié comme un secteur clé pour l'intégration de la chaleur solaire pour les processus industriels 99,7 % de l'énergie utilisée pour le chauffage industriel est inférieure à 250 °C, avec 40 % utilisée dans la plage de 60 °C à 120 °C et 38,7 % dans la plage de 120 °C à 250 °C (étude de 2020) [91].	Des programmes de formation et de démonstration ont été mis en place au CERMI [92]. Deux des six hôpitaux publics du pays ont été équipés de systèmes centralisés à circulation forcée.
Ghana	Large proportion de systèmes à circulation forcée ainsi que des systèmes industriels [38]. Exemple : 316 m² de collecteurs près d'Accra pour générer de la chaleur pour le séchage des fruits [38,93].	Le Ghana est un leader dans la technologie PVT, avec 22 000 m² de capteurs installés et une utilisation industrielle des CES

Pays	Utilisation, état et fonctionnalités du CES	Projets et initiatives clés
	Systèmes à circulation forcée (90% des systèmes en 2015) : adoptés dans les hôtels comme mesure d'économie pour compléter les chauffe-eaux électriques, en raison de l'augmentation des tarifs de l'électricité au Ghana [94]. Ghana : parmi les dix premiers pays mondiaux pour ses systèmes photovoltaïques-thermiques (PVT) [14,95]	
Burkina Faso	Les CES sont principalement concentrés à Ouagadougou et Bobo-Dioulasso [9]. Pratiquement aucun système à circulation forcée n'est en fonctionnement dans le pays. Seulement 6 % de la population en milieu rural au courant de la technologie des CES selon une étude de 2019/2020 couvrant 8 000 personnes dans les zones rurales et périurbaines [96].	La politique incitative pour la promotion des CES accorde une priorité aux centres de santé [97]: avec 5 000 CES à installer en 4 ans, produits par l'industrie locale. L'installation de 450 CES dans les centres de santé (maternités) à travers le pays est prévue, en utilisant des systèmes de capteurs avec stockage intégré fabriqués localement [9,98]. Le projet n'a finalement pas abouti, malgré l'installation avec succès des premiers prototypes.
Gambie	Utilisation significative des CES, par rapport aux pays voisins à cause des tarifs électriques élevés, les pannes de courant fréquentes et l'écotourisme [99];	-

Pays	Utilisation, état et fonctionnalités du CES	Projets et initiatives clés
	CES adoptés par de nombreux hôtels car délai de récupération : 3 à 4 ans [99]. En 2016, 15 % des PME, hôtels et industries, ainsi que 8 % des institutions publiques, avaient des systèmes CES installés [100]. Les systèmes thermosiphon et systèmes à circulation forcée.	
Bénin	-	Plan d'action du PNUE pour 50 000 installations de CES d'ici 2030 dans les centres de santé, les écoles avec hébergement et le logement social [101]. Le gouvernement a équipé environ dix (10) établissements de santé de systèmes CES entre 2016 et 2020 [102].
Togo	Les CES sont principalement rencontrés dans les établissements de santé [117,118]. En 2010, moins de 1 % des ménages utilisaient cette technologie [85].	En 2020, 122 centres de santé ont été équipés de CES dans le cadre du projet PRAVOST avec l'appui de la BAD [103].
Senégal	En 2015, plus de 70 % des 1611 m² de collecteurs recensés dans le pays étaient situés à Dakar [104]	

Pays	Utilisation, état et fonctionnalités du CES	Projets et initiatives clés
	Il n'y a pas d'utilisation de CES dans les zones rurales. La majorité des systèmes ont été installés dans des foyers, avec seulement 15 % dans les hôtels [104]. Ces derniers préfèrent les chauffe-eaux électriques en raison de l'absence de services de maintenance pour les CES. En effet, le secteur des CES a connu une certaine expansion entre 1987 et 1989, mais la plupart de ces installations ont été abandonnées ou mises hors service en raison du manque de services de maintenance [104].	
Nigéria	Le développement et l'application des CES sont encore à un stade embryonnaire [105] Selon une enquête menée par la GIZ en 2013, les CES sont à peine connus [32]. La consommation quotidienne d'eau chaude domestique a été collectée dans des bâtiments résidentiels, des établissements d'enseignement, des hôpitaux et des hôtels [32]. Le tarif relativement bas de l'électricité au Nigeria influence l'économie des CES : le délai de retour sur investissement par rapport aux chauffe-eaux électriques peut atteindre 26 ans pour les ménages [32,105] et 10 ans pour les hôtels [32,106,107]. En effet, le tarrif de l'électricité est plus élevé pour les hotels que pour les ménages et leur demande en eau chaude est beaucoup plus importante.	L'initiative du Programme de Soutien à l'Énergie du Nigéria (NESP) en 2017 a permis l'installation de 68 CES (avec une surface de 212 m ² de capteurs plans thermosiphon [77,108,109] à l'école secondaire gouvernementale de sciences de Kuru, un internat pour 1 000 étudiants situé à Jos, dans l'État de Plateau
Mali	Plus de 1 500 systèmes du type CONFOSOL (capteur fabriqué localement) ont été installés dans le pays [110] en 2011. En 2015, le nombre total de CES installés au Mali était estimé à 10 000 [69,111].	Projet de diffusion de 10 000 CES dans le cadre de la stratégie de développement de la maitrise de

Pays	Utilisation, état et fonctionnalités du CES	Projets et initiatives clés
		l'énergie au Mali, avec l'appui de la BAD [69,111]
Niger	La première production proto-industrielle de CES en Afrique a eu lieu au début des années 1970 [112–115]. Plus de 8 000 CES ont été fabriqués dans le pays entre 1970 et 1980 [115]. Cependant, en 2015, seulement environ 400 CES domestiques ont été installés, et la plupart d'entre eux ne fonctionnent plus [73].	-
Sierra Leone	Très peu d'installations de CES [83].	-
Libéria	Très peu d'installations de CES [64].	-
Guinée Bissau	Très peu d'installations de CES [63].	-

tandis que la fabrication locale est confrontée à des coûts élevés des matériaux et à un soutien étatique minimal.



Figure 6. CES de fabrication locale installés dans un lotissement ENAREM à Niamey (Niger) dans les années 1970.

III. CONTEXTE GLOBAL ET CADRE THÉORIQUE

III.1. Usages de l'eau chaude dans différents secteurs

III.1.1. Installations domestiques individuelles

Les CES, en particulier, offrent une solution durable et économique pour les foyers souhaitant réduire leur consommation d'énergie électrique ou leur empreinte carbone. Ces installations permettent d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire, en particulier dans les régions où l'ensoleillement est abondant. Cependant, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne le coût initial et la sensibilisation à ces technologies.

Sborz et al. [118] ont montré dans leurs travaux sur les profils horaires de consommation d'eau chaude dans les appartements sociaux au Brésil que des mesures précises adaptées aux spécificités locales permettent de concevoir des CES plus efficaces. Des profils de consommation réalistes et des données de haute résolution améliorent la prévision de la demande, la gestion des ressources et l'optimisation des simulations de consommation dans les installations domestiques.

III.1.2. Installations dans le secteur tertiaire

Infrastructures à caractère hospitalier

Les infrastructures hospitalières, telles que les hôpitaux, cliniques et autres établissements de santé, présentent des besoins spécifiques en matière de chauffage de l'eau, principalement pour les services de soins et la buanderie. La littérature sur les performances des systèmes de chauffage solaire de l'eau dans les hôpitaux reste très limitée, se concentrant principalement sur des conceptions théoriques et des descriptions, comme en témoignent certains travaux [119,120] qui se sont penchés sur les applications dans les buanderies hospitalières.

La buanderie hospitalière joue un rôle essentiel dans le soutien aux soins aux patients [121]. Sa principale fonction consiste à éliminer les taches visibles et les salissures, tout en réduisant la charge microbienne sur les tissus à un niveau jugé sûr pour l'utilisation, et en abordant d'autres effets microbiens indésirables, tels que la formation d'odeurs [122]. Ce résultat est généralement obtenu par une combinaison de plusieurs facteurs, notamment le temps (durée), la température, l'action mécanique (agitation) et les produits chimiques (détergents et désinfectants), qui interagissent pour éliminer ou tuer les cellules microbiennes [122,123] et ce, tant pendant le lavage que lors du séchage [123]. Dans ce contexte, des composés oxydants tels que le chlore ou le peroxyde d'oxygène, ainsi que des températures supérieures à 60 °C, jouent un rôle crucial en garantissant l'efficacité antimicrobienne du processus de lavage [122]. La température durant le lavage remplit plusieurs fonctions : elle influence la réduction microbienne sur les textiles par inactivation thermique, accélère l'action des produits chimiques tels que l'eau de Javel et facilite le retrait mécanique des salissures. Les températures de 60 °C ou plus sont reconnues pour leur capacité à inactiver les micro-organismes, assurant ainsi un niveau élevé d'hygiène, raison pour laquelle elles sont couramment utilisées dans le secteur institutionnel. Toutefois, dans une optique d'économie d'énergie, une tendance à abaisser ces températures se développe, bien que cela puisse compromettre l'efficacité antimicrobienne du processus. Selon le principe de Sinner, une réduction de la température peut être compensée par l'augmentation d'autres variables (par exemple, en prolongeant la durée du cycle de lavage) [122]. Cependant, Bockmühl et al. [122] soulignent que cette tendance à diminuer les températures dans le but de réduire les coûts énergétiques peut altérer la réduction microbienne pendant le lavage et doit donc être prise en compte avec prudence. Il est recommandé que, dans les cas où un niveau d'hygiène optimal est exigé, l'utilisation exclusive de l'eau de Javel ne soit pas suffisante et que le lavage soit effectué à une température de 60 °C ou plus pour garantir l'inactivation complète de certains micro-organismes [122]. Cette valeur de 60 °C a également

été adoptée dans l'étude de Lima et al. [119] concernant un système de chauffage solaire de l'eau pour une buanderie hospitalière, contrairement au système décrit par Merkle [120], qui visait 80 °C il y a une trentaine d'années.

L'eau chaude est essentielle dans ces environnements pour garantir l'hygiène et le confort des patients, tout en répondant aux exigences de sécurité et de bien-être du personnel. Dans ce contexte, l'optimisation des systèmes de chauffe-eau, notamment à travers l'utilisation des énergies renouvelables, est cruciale pour réduire les coûts énergétiques, améliorer l'efficacité des installations voire assurer la qualité et la continuité de service.

Infrastructures à caractère hôtelier

Les infrastructures hôtelières, telles que les hôtels, auberges, et complexes touristiques, nécessitent une gestion efficace de l'eau chaude pour assurer le confort des clients. Cette demande s'élargit à divers services, y compris les chambres, les cuisines, et les espaces de loisirs. L'adoption de systèmes énergétiques performants et durables pour le chauffage de l'eau est essentielle pour réduire les coûts opérationnels, tout en garantissant un service de qualité dans un secteur où l'efficacité énergétique et le confort sont primordiaux. Les CES présentent un intérêt économique significatif dans l'industrie touristique, notamment dans des pays comme la Gambie [11], une nation côtière sahélienne confrontée à d'importants défis énergétiques, illustrés par une panne nationale en 2023. Ainsi, l'adoption des CES dans ce secteur dépasse largement les considérations d'efficacité énergétique et de réduction des coûts. En effet, ces systèmes garantissent un approvisionnement continu en eau chaude pour les clients, améliorant ainsi la qualité et la fiabilité des services proposés. Par ailleurs, leur mise en œuvre permet de diminuer l'empreinte carbone des établissements hôteliers, ce qui témoigne d'un engagement fort en faveur du développement durable. Cette démarche stratégique attire une clientèle de plus en plus sensibilisée aux enjeux environnementaux et recherchant des hébergements écoresponsables. Dans cette optique, les gouvernements ouest-africains promeuvent activement l'énergie solaire thermique pour améliorer l'efficacité énergétique, notamment dans le secteur de l'hôtellerie (Tableau 1). Par exemple, le Burkina Faso a fixé des objectifs ambitieux, visant un taux de pénétration de 25 % des CES dans les hôtels d'ici 2030 [51].

De même, au Ghana, une étude menée par Odoi-Yorke et al [124] a évalué la viabilité des CES dans des hôtels trois étoiles en utilisant le logiciel RETScreen. Les résultats de cette étude ont révélé des valeurs actuelles nettes positives et une contribution solaire significative, avec des périodes de retour sur investissement simples allant de 5 à 7 ans. Cette étude a adopté les profils

de consommation d'eau chaude par défaut de RETScreen, basés sur les normes ASHRAE de 1995 [29].

Cependant, il convient de souligner que les profils de consommation d'eau chaude varient considérablement en fonction des contextes culturels et sociaux. Par exemple, Rankin and Rousseau [125] ont mis en évidence que les données recueillies dans un pays ne sont pas nécessairement applicables à une autre région. Leur étude sur les bâtiments commerciaux, y compris les hôtels en Afrique du Sud, illustre bien cette réalité. De même, dans le contexte sahélien ouest-africain, Ndoye and Sarr [126] ont suivi la consommation énergétique dans un hôtel trois étoiles au Sénégal et ont observé que la consommation d'énergie liée à l'ECS au cours de l'année suit un profil en forme de cuvette peu profonde, avec une utilisation minimale entre juin et août, qui augmente progressivement vers décembre d'un côté et janvier de l'autre. Leurs résultats ont montré que la production d'ECS constitue une part significative de la charge énergétique totale de l'hôtel, soulignant l'importance d'optimiser ces systèmes pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de CO₂ en Afrique de l'Ouest. Ces mesures empiriques sont essentielles pour valider les résultats des simulations et offrir une compréhension plus précise des performances des CES. Comprendre ces performances dans les hôtels d'Afrique de l'Ouest est crucial pour atteindre les objectifs d'efficacité énergétique et réduire la dépendance au réseau électrique national.

Applications industrielles

Les applications industrielles du chauffage de l'eau sont diversifiées et essentielles dans de nombreux secteurs tels que l'agroalimentaire, la chimie, le textile, et le traitement des métaux [127]. Dans ces industries, l'eau chaude est utilisée pour des processus tels que le nettoyage, la stérilisation, la production de vapeur, et le contrôle thermique. L'optimisation de la consommation d'énergie et l'adoption de technologies plus durables pour la production d'eau chaude jouent un rôle crucial dans la réduction des coûts de production et l'amélioration de l'efficacité énergétique des entreprises.

III.2. Méthodologies et approches dans les études solaires thermiques

L'adoption généralisée des CES est fortement conditionnée par leur viabilité financière, qui dépend directement des économies d'énergie réalisées et de leurs performances techniques [11,128,129]. Ainsi, l'évaluation des performances techniques, économiques et environnementales à long terme de ces systèmes est essentielle pour promouvoir leur déploiement à grande échelle. En général, cette évaluation repose principalement sur des

simulations numériques annuelles, utilisant des paramètres de performance des capteurs solaires issus de procédures de test normalisées [130,131,124]. Cependant, l'efficacité annuelle des CES dépend principalement du climat, du mode de circulation (systèmes à pompe ou thermosiphon) et de l'application spécifique (niveau de température requis, demande en eau en termes de volume et de temporalité). De plus, la précision des prédictions de simulation repose sur une estimation réaliste de la demande en eau chaude, ce qui contraste avec l'utilisation courante de profils de consommation journaliers répétitifs pour les simulations annuelles [132,133].

En outre, les paramètres des capteurs solaires utilisés dans les simulations sont généralement déterminés à partir de conditions de test qui ne reflètent pas fidèlement les conditions climatiques et opérationnelles réelles auxquelles les CES sont exposés. C'est pourquoi des ajustements sont souvent nécessaires, en particulier pour les systèmes thermosiphon [133]. Face à cette limitation, certaines études privilégient le suivi en conditions réelles plutôt que de se fier uniquement aux simulations. Néanmoins, les recherches sur les performances réelles à long terme des CES restent limitées, la plupart des études se concentrant sur les applications domestiques. Par exemple, Maraj [134] a mené une étude de suivi sur un an en Albanie sur trois CES fonctionnant sous des demandes constantes d'eau chaude. Les rendements annuels rapportés variaient de 41 à 52 %. D'après cette étude, avec une période de retour actualisée de 6,8 ans, le système à thermosiphon à tubes sous vide se montre plus avantageux par rapport aux systèmes à circulation forcée [135–138]. En outre, des études similaires menées à Dublin et Cambridge ont révélé des périodes de retour allant de 13 à 48,5 ans, rendant ces systèmes économiquement peu viables malgré les économies de carbone réalisées [135].

Les informations sur leurs performances en usage réel restent limitées. Des programmes de suivi, comme ceux mis en place en France et au Canada, offrent des exemples concrets des bénéfices qu'apportent ces études de terrain. En France, le programme TéléSuiWeb [139], lancé en 2017, a été mis en place pour suivre des systèmes solaires thermiques, permettant une détection rapide des anomalies et une évaluation précise de la contribution énergétique solaire, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que les besoins spécifiques en eau chaude selon les types d'installation. Ce programme présente des avantages significatifs à plusieurs niveaux, en particulier à l'échelle collective, grâce à la constitution d'une base de données fiable sur les performances réelles des CES. Par ailleurs, cette initiative a permis d'identifier des indicateurs clés tels que les besoins énergétiques pour l'eau chaude, les énergies solaires réellement fournies (mesurées) et attendues, le taux de couverture solaire, le ratio de

performance et la productivité solaire utile. Par ailleurs, les résultats obtenus au cours de cette campagne de mesure révèlent que les installations individuelles des CES en France sont souvent surdimensionnées en raison des kits standard proposés par les fabricants, qui ne tiennent pas toujours compte du nombre d'occupants. Bien que ce surdimensionnement puisse limiter l'efficacité des systèmes en hiver, il garantit une autonomie totale en été et améliore le taux de couverture solaire global. Ces observations fournissent des pistes d'amélioration précieuses pour les fabricants, notamment en ce qui concerne la conception et la configuration des kits solaires proposés sur le marché français.

Au Canada, un projet pilote a été mis en place par le Bureau de l'Efficacité et de l'Innovation Énergétique (BEIE) [140] pour des motifs similaires dans le contexte québécois. Les résultats montrent une variation saisonnière marquée : l'ensoleillement atteint $5,2 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$ en été (juillet) mais chute à $1,6 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$ en hiver (décembre). De plus, la consommation moyenne d'eau chaude des ménages étudiés (143 L/jour) reste inférieure à la moyenne québécoise (186 L/jour). Le fonctionnement des CES varie considérablement selon la saison, passant de 6,7 h/jour en été à seulement 1,2 h/jour en hiver, ce qui impacte directement la température de stockage (supérieure à 50 °C en été, mais inférieure à 20 °C en hiver). Le taux de couverture solaire des installations fluctue entre 21 % et 68 %, générant une économie annuelle moyenne de 1215 kWh soit une économie moyenne annuelle de 88,83 € (1 \$=0,94 €) pour les vingt-trois (23) installations suivies, principalement entre avril et novembre. Cependant, la rentabilité demeure un défi majeur, le coût élevé des installations des CES (entre 7559,84 et 9449,80 €) et les économies limitées prolongent la période de retour sur investissement à plus de 75 ans. En effet, le coût de l'électricité au Canada est relativement bas (~35 FCFA/kWh). Des solutions adaptées, comme des systèmes « trois saisons », pourraient améliorer leur viabilité économique, particulièrement dans le secteur commercial, où les besoins en eau chaude coïncident mieux avec la production solaire.

Dans le cadre des applications industrielles, Chang et al. [141] ont évalué les performances d'un CES à tubes sous vide dans un abattoir de volaille à Taïwan. Ils ont démontré une viabilité économique avec une période de retour d'environ 8,6 ans grâce à des subventions gouvernementales.

Tous ces résultats mettent en évidence l'importance d'une approche contextualisée dans le dimensionnement des systèmes CES pour optimiser leurs performances. Le suivi des CES en conditions réelles de fonctionnement permet de recueillir des données essentielles sur les besoins en eau chaude des ménages, leurs profils de consommation et leurs comportements face

aux variations saisonnières. Cette démarche offre une perspective globale et intégrée des performances des CES, tout en constituant une base de données précieuse pour améliorer le rendement global des CES. En outre, elle représente un outil stratégique d'aide à la décision, crucial pour promouvoir une adoption à grande échelle des CES dans la sous-région, renforçant ainsi la confiance des utilisateurs envers ces technologies.

En complément des évaluations techniques, les aspects économiques des CES ont été analysés dans divers contextes à l'aide de modèles de simulation tels que TRNSYS, Watsun, Polysun, Modellica, MATLAB, RETScreen et T*SOL [133,142,143]. Par exemple, Taher et al. [130] ont simulé les performances des CES dans 43 pays africains en utilisant TRNSYS. Leurs résultats ont montré que les projets solaires thermiques sont économiquement avantageux dans les pays sahéliens d'Afrique de l'Ouest, à savoir le Burkina Faso, le Mali, le Niger et le Sénégal, avec des périodes de retour simples variant entre 7 et 16 ans. Cependant, cette étude supposait des profils de consommation constants en eau chaude et des systèmes à circulation forcée, ce qui ne reflète pas l'utilisation prédominante des systèmes thermosiphon dans ces pays[11], notamment au Burkina Faso, où les systèmes à circulation forcée sont quasiment inexistantes [9,11]. Toujours en Afrique de l'Ouest, l'étude de Odoi-Yorke et al. [124], déjà citée a utilisé RETScreen avec un profil de consommation d'eau chaude par défaut dans RETScreen, profil qui pourrait ne pas refléter fidèlement les schémas de consommation réel (locaux).

De manière plus générale, une méta-analyse réalisée par Zhang et al. [142] synthétisant les résultats de 23 publications, a identifié des facteurs clés influençant la période de retour des CES, tels que la température de l'eau du réservoir de stockage et les profils de consommation d'eau chaude. L'utilisation de profils de consommation constants dans les simulations peut entraîner des prédictions imprécises [133]. Par conséquent, il est essentiel d'intégrer des profils de consommation réelles pour optimiser la taille des systèmes, éviter les surdimensionnements et améliorer les prévisions de performance [133,142]. Cela est particulièrement pertinent pour les systèmes thermosiphon, qui présentent des fluctuations importantes du débit volumétrique dans les capteurs [133].

IV. CONCLUSIONS ET ENJEUX DE RECHERCHE

La littérature existante sur les CES révèle des lacunes importantes, en particulier en ce qui concerne leur performance réelle et leur viabilité à long terme dans des régions comme l'Afrique de l'Ouest. Tout d'abord, malgré un intérêt croissant pour les technologies solaires thermiques, les études empiriques mesurant la production énergétique réelle des CES restent

limitées par rapport aux analyses basées sur des simulations. En effet, de nombreux rapports disponibles proviennent de conditions contrôlées en laboratoire ou de tests en extérieur avec des profils de demande.

Par ailleurs, une lacune considérable concerne la performance des CES dans les climats sahéliens et côtiers d'Afrique de l'Ouest. Ces environnements, caractérisés par des conditions poussiéreuses ou une forte humidité, posent des défis spécifiques pouvant affecter de manière significative l'efficacité des systèmes. Pourtant, les études empiriques ciblant ces régions sont rares. De plus, il manque des recherches sur les systèmes utilisant des capteurs à stockage intégré, malgré leur utilisation répandue dans certaines zones. En outre, un autre point critique concerne les recherches sectorielles spécifiques. Alors que certaines études se concentrent sur les applications domestiques, peu d'attention a été accordée aux secteurs commercial ou tertiaire, tels que les hôtels et les blanchisseries. Par exemple, bien que des études basées sur des simulations existent, aucune analyse empirique à long terme n'a été publiée sur la performance des CES destinés à l'approvisionnement en eau chaude des blanchisseries. Cela est particulièrement pertinent pour le secteur hôtelier en Afrique de l'Ouest, où la demande constante en eau chaude fait des systèmes solaires une solution potentiellement précieuse. Ainsi, comprendre la performance opérationnelle et la viabilité financière des CES dans ce contexte est essentiel pour encourager l'adoption à grande échelle.

En outre, la viabilité financière des CES constitue également une autre zone de connaissance insuffisante. Bien qu'une demande établie pour l'eau chaude existe dans des régions comme le Burkina Faso, des doutes subsistent parmi les utilisateurs concernant les performances et les coûts des CES [8]. Ces préoccupations sont accentuées par les coûts initiaux élevés, le manque de soutien financier, ainsi que l'absence de données fiables sur le rendement et de certifications des systèmes solaires disponibles sur le marché. En conséquence, de nombreux consommateurs en Afrique de l'Ouest prennent des décisions d'achat sans avoir une connaissance suffisante de la performance énergétique, de la sécurité ou de la fiabilité à long terme de cette technologie, ce qui freine l'adoption à grande échelle.

Un autre point crucial dans la mise en œuvre effective des CES en Afrique de l'Ouest réside dans le manque de données précises sur la consommation d'eau chaude domestique. En effet, la plupart des projets de dimensionnement pour les systèmes solaires en Afrique reposent sur des normes européennes, qui ne prennent pas en compte le contexte local et les besoins spécifiques des consommateurs de l'Afrique de l'Ouest. En particulier, les informations précises sur la consommation d'eau des ménages sont rares, ce qui conduit à des installations

mal dimensionnées et à des performances en-dessous des attentes. Ainsi, des données précises sur les profils de consommation d'eau sont essentielles pour optimiser la conception des systèmes et garantir que les économies d'énergie correspondent aux coûts d'investissement. L'absence de ces données contribue à l'incertitude entourant la viabilité technique et financière des CES.

Par conséquent, il est nécessaire de réaliser des études empiriques à long terme sur la performance des CES dans des conditions réelles. Cela est particulièrement important dans la région sahélienne, où des facteurs tels que les fluctuations de température, l'accumulation de poussière et les variations saisonnières peuvent avoir un impact significatif sur le rendement des systèmes. Bien que les outils de simulation offrent des informations précieuses sur la viabilité technico-économique de ces systèmes, les mesures en conditions réelles sont essentielles pour valider ces modèles et garantir que les prédictions correspondent aux performances réelles. Ainsi, un suivi complet des CES dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest est crucial pour fournir les données nécessaires à l'amélioration de la conception des systèmes, à l'information des consommateurs et au soutien de l'élaboration des politiques.

La présente étude entend contribuer à l'évaluation de la performance, la viabilité économique, les implications environnementales et les défis opérationnels des CES en Afrique de l'Ouest, avec un accent particulier sur les applications domestiques et tertiaires.

CHAPITRE 2. ENQUETE TERRAIN SUR LES CHAUFFE- EAU SOLAIRES THERMIQUES DOMESTIQUES EN MILIEU URBAIN OUEST-AFRICAIN

I. INTRODUCTION

Le développement et l'adoption de solutions énergétiques durables telles que les CES offrent une voie prometteuse pour atténuer les pressions énergétiques et renforcer la sécurité énergétique des ménages. Les systèmes de CES ont démontré leur capacité à réduire de manière significative la consommation d'énergie pour l'ECS dans les ménages urbains [144,145]. Ils peuvent notamment réduire de moitié l'utilisation du kérosène, tout en réalisant des réductions similaires de la consommation d'électricité et de bois de chauffage pour l'ECS, tant dans les ménages que dans les infrastructures tertiaires [144]. En réduisant la dépendance à l'égard des sources d'énergie traditionnelles, les systèmes de CES offrent la possibilité d'atténuer la dégradation de l'environnement par la déforestation et la pollution par les énergies fossiles, d'améliorer la qualité de l'air et de remédier aux pénuries d'énergie persistantes.

Cependant, malgré ces nombreux avantages, l'adoption des CES demeure faible en Afrique de l'Ouest [11]. En effet, de nombreux ménages continuent de se tourner vers des sources d'énergie traditionnelles, telles que le bois de chauffage, le charbon de bois ou le gaz de pétrole liquéfié (plus couramment appelé gaz), pour chauffer l'eau destinée aux usages domestiques, surtout l'hygiène corporelle [11,146,147].

Ces méthodes restent coûteuses et inefficaces, tout en contribuant à la dégradation de l'environnement et à des problèmes de santé liés à la pollution de l'air [42].

Par ailleurs, la recherche sur les technologies de production d'ECS et les comportements de consommation se trouve souvent confrontée à des limites importantes, en particulier dans les pays en développement [145]. Les études existantes reposent souvent sur des hypothèses générales, plutôt que sur des données locales précises. Par exemple, bien que des travaux comme celui de Taher et al. [130] aient simulé les performances des CES dans 43 pays africains, à l'aide de TRNSYS montrant que les technologies de CES sont économiquement viables dans des pays comme le Burkina Faso et le Togo, elles partent de suppositions qui ne correspondent pas aux pratiques locales. Ces études, prenant en compte des profils de consommation uniformes ou l'utilisation de systèmes à circulation forcée, ne reflètent pas les réalités de terrain où les systèmes à thermosiphon sont la norme [9,11].

Le manque de données fiables rend difficile l'évaluation de la demande et de la consommation d'énergie et entrave la conception d'interventions sur mesure visant à promouvoir des solutions énergétiques durables. Pour relever ces défis, il est essentiel de comprendre les obstacles à l'adoption des CES, ainsi que les modèles actuels d'utilisation de l'eau et les sources d'énergie.

Une adoption et une promotion efficaces nécessitent de comprendre les habitudes de consommation énergétique des ménages, les technologies à remplacer, ainsi que des facteurs tels que le comportement des consommateurs et les politiques gouvernementales. En comblant ces lacunes à l'aide de données réelles provenant de Ouagadougou (Burkina Faso) et Lomé (Togo), cette recherche vise à informer le développement d'interventions et de politiques efficaces qui soutiennent la transition vers des technologies de chauffage de l'eau durables.

L'enquête envisagée vise principalement à analyser les habitudes de consommation d'eau des ménages et d'évaluer le potentiel d'adoption de technologies de chauffage de l'eau durables à Ouagadougou, Burkina Faso. Plus précisément, il s'agit de :

- Examiner les habitudes d'utilisation de l'eau chaude pour différentes activités domestiques afin d'identifier les besoins et priorités clés.
- Identifier les principales sources d'énergie actuellement utilisées pour le chauffage de l'eau, évaluer leur prévalence et leurs caractéristiques, et analyser leurs implications économiques et leur impact environnemental pour soutenir la transition vers des technologies durables.
- Explorer les variations temporelles et saisonnières de l'utilisation de l'eau chaude afin de comprendre les fluctuations de la demande et fournir des perspectives techniques pour soutenir la conception et l'optimisation des systèmes de chauffage de l'eau qui répondent aux besoins des ménages.
- Évaluer les taux d'adoption et les niveaux de satisfaction des systèmes des CES et analyser les facteurs influençant leurs performances.
- Identifier les défis et les obstacles liés à l'adoption des CES, y compris les contraintes financières, techniques et informationnelles.
- Proposer des recommandations pratiques à l'endroit des décideurs et les praticiens pour promouvoir les technologies de chauffage de l'eau durables, contribuant ainsi aux objectifs de développement durable et à l'amélioration du bien-être des ménages en Afrique de l'Ouest.

Ce chapitre expose les méthodologies utilisées pour concevoir et administrer les enquêtes, ainsi que les résultats obtenus sur les habitudes liées à l'usage d'eau chaude dans les ménages de Ouagadougou et de Lomé. Les données collectées constituent une base solide pour comprendre les différentes sources d'énergie utilisées pour chauffer l'eau, ainsi que les facteurs motivant l'intégration des CES dans les pratiques des ménages. Ces informations permettent d'analyser la faisabilité technique et économique des CES, tout en répondant aux attentes des utilisateurs

dans un contexte climatique et socioculturel propre aux régions sahélienne et côtière de l'Afrique de l'Ouest.

II. PRÉSENTATION DES ZONES D'ÉTUDE

L'étude a été menée à Ouagadougou, la capitale du Burkina Faso, et à Lomé, la capitale du Togo (Figure 2). Ces deux villes ont été sélectionnées en raison de leurs profils socio-économiques, climatiques et énergétiques distincts, offrant des perspectives précieuses sur l'utilisation domestique de l'eau et le potentiel d'adoption des CES en Afrique de l'Ouest. Elles représentent ici les deux principaux climats en Afrique de l'Ouest : le climat aride et le climat humide.

Ouagadougou s'étendant sur une superficie de 220 km², avec une population qui a atteint 2 780 000 habitants en 2020 [148,149]. La ville est située dans la région sahélienne, caractérisée par un climat aride avec une saison sèche prononcée allant d'octobre à mai, suivie d'une courte saison des pluies (juin à septembre). La ville connaît d'importantes variations de température (Figure 7) et une période saisonnière de l'harmattan (fin novembre à mi-février), avec des températures nocturnes et matinales fraîches (surtout en janvier), ce qui augmente généralement la demande en eau chaude. Les modes de consommation énergétique dans la ville reposent principalement sur la biomasse, comme dans d'autres pays d'Afrique de l'Ouest (Figure 5) [147].

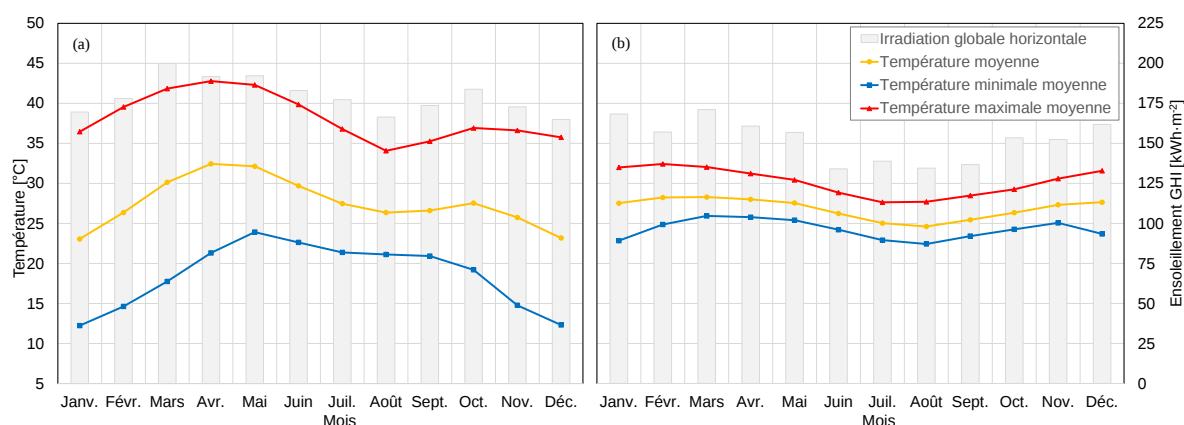


Figure 7. Températures ambiantes et irradiation solaire mensuelle à (a) Ouagadougou et (b) Lomé. Sources des données : irradiation horizontale globale et température ambiante moyenne : logiciel RETScreen [150] ; températures moyenne maximale et minimale : base de données MERRA-2 de la NASA (moyenne des données de 2000 à 2022).

Cependant, comme dans les deux autres pays sahéliens enclavés de l'Afrique de l'Ouest, le Mali et le Niger, des efforts ont été faits pour réduire la dépendance à la biomasse grâce à

diverses politiques, telles que des subventions gouvernementales importantes sur le gaz ou la promotion des technologies CES (Tableau 1). Ces politiques visent à lutter contre la déforestation dans le Sahel, où la désertification progresse. Ces trois pays ont été les premiers en Afrique de l'Ouest à mettre en œuvre des mécanismes de soutien, y compris des exonérations de droits d'importation et de taxes sur la valeur ajoutée pour les CES. De plus, ils ont très tôt encouragé le développement d'une industrie locale de fabrication de CES [11], dès les années 1960-1970, bien que son importance ait diminué ces dernières années.

Lomé a une population qui a atteint 1 305 681 habitants en 2022 [151]. Située le long du Golfe de Guinée (Figure 2), Lomé bénéficie d'un climat tropical avec quatre saisons distinctes : deux saisons des pluies (de mars à juillet et de septembre à octobre) et deux saisons sèches. Les mois les plus frais sont situés dans les deux saisons sèches, le mois de juillet-août dans la petite saison sèche et le mois de décembre-janvier dans la principale saison sèche (Figure 7). L'humidité élevée et les températures relativement stables contribuent au climat tropical de la ville. Le paysage énergétique de Lomé repose fortement sur la biomasse, en particulier le charbon de bois [40], dans un contexte où le prix du gaz est relativement élevé (en décembre 2024, une bouteille de 6 kg de gaz coûte 4760 FCFA, contre 2500 FCFA à Ouagadougou) et où il n'existe aucun soutien politique spécifique pour la technologie des CES. Lomé reçoit 20 % moins d'irradiation solaire annuelle que Ouagadougou (Figure 7) et connaît des températures ambiantes plus stables tout au long de l'année (Figure 7), ce qui en fait un cas intéressant pour examiner le potentiel d'adoption des CES tout au long de l'année.

III. MÉTHODOLOGIE DE L'ENQUÊTE

III.1. Cadre général et élaboration des questionnaires

Une méthodologie d'enquête sur terrain basée sur le Census and Survey Processing System (CSPro) a été utilisée pour collecter les données. Elle s'est déroulée en trois étapes :

- L'élaboration du questionnaire d'enquête ;
- L'intégration du questionnaire dans l'outil CSPro ;
- La mise en œuvre

Une revue de la littérature a été effectuée avant de commencer à dresser une liste complète des questions de l'enquête. Le questionnaire a été conçu pour recueillir des informations permettant d'évaluer le comportement des ménages vis-à-vis de l'eau chaude au niveau des deux villes.

L'enquête a été conçue pour être facile à comprendre pour les résidents ayant une connaissance minimale des équipements de consommation d'énergie domestique. Une attention particulière a été faite pour minimiser le biais des répondants, par exemple en évitant les questions orientées, les questions ambiguës ou les questions portant sur plus d'un sujet, en fournissant des images des différents types de capteurs, etc.

Une fois que le questionnaire d'enquête a été conçu, examiné et approuvé par des spécialistes statisticiens, il est implémenté dans l'environnement CSPro. CSPro est un logiciel du domaine public utilisé par des centaines d'organisations et des dizaines de milliers de personnes pour saisir, éditer et diffuser des données de recensement et d'enquête. Il permet également aux utilisateurs d'adapter les questionnaires aux plateformes mobiles, y compris les smartphones ou les tablettes, qui ont été utilisés par 100 % des enquêteurs, dans le cas de la présente étude.

Des tests préliminaires ont été réalisés en deux phases. La première phase concernait le questionnaire physique. Deux tests ont été effectués pour cette phase. Le premier a été réalisé avec un petit nombre de doctorants de 2iE et le second avec 115 membres du personnel de 2iE, afin d'évaluer la clarté et la longueur du questionnaire physique. L'objectif de ce premier pré-test était d'identifier d'éventuelles incohérences dans les réponses et d'identifier d'éventuels problèmes dans l'analyse des données. La deuxième phase du pré-test a été déployée sur l'application sur terrain auprès d'un petit nombre de doctorants et d'étudiants. L'objectif de ce second pré-test était de déterminer les temps de réponse et d'identifier les éventuels problèmes liés à l'application. Les résultats des deux pré-tests ont été utilisés pour recommander des changements au questionnaire afin d'améliorer la clarté et l'analyse de l'enquête. Le questionnaire retenu pour l'enquête est présenté au Tableau 3.

III.2. Détermination de la période de mise en œuvre de l'enquête

La période de l'harmattan, considérée comme la plus fraîche de l'année, a été choisie comme période d'enquête pour les deux villes. En effet, l'enquête de pré-test du personnel de 2iE a révélé que les gens utilisent de l'eau chaude pendant cette période. Il était donc idéal d'administrer le questionnaire aux ménages pendant cette période. Il faut reconnaître que cette démarche n'a pas été suivie pour la ville de Lomé, où les analyses postérieures ont conduit à réaliser qu'il existe une seconde période froide dans une même année, juillet-août (Figure 7). Cette seconde période n'avait donc pas été spécifiquement prise en compte lors de l'élaboration et la mise en œuvre des questionnaires, la période de l'harmattan étant a priori, celle des plus

Tableau 3. Questionnaire retenu pour l'enquête.

Volet	Article	Options
Usages en eau chaude	Quels sont vos différents usages en eau chaude ?	(1) Douche (2) Vaisselle (3) Lessive (4) Cuisine (5) Autre (préciser)
Utilisation d'eau chaude pour la douche	Utilisez-vous le gaz pour chauffer l'eau pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous le charbon pour chauffer l'eau pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous le bois pour chauffer l'eau pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous le chauffe-eau électrique pour chauffer l'eau pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous le chauffe-eau solaire pour chauffer l'eau pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous le chauffe-eau plongeur pour chauffer l'eau pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous la cafetière pour chauffer l'eau pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
Dépenses pour le charbon de bois	Si vous utilisez du charbon de bois ou du bois pour chauffer votre eau, combien dépensez-vous par jour pour le charbon/bois de chauffage (en monnaie locale) ?	(Ouvert)
Période d'utilisation de l'eau chaude dans l'année pour la douche	Utilisez-vous l'eau chaude en harmattan pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous l'eau chaude en hivernage pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous l'eau chaude en toute saison pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
Moment d'utilisation de l'eau chaude dans la journée pour la douche	Utilisez-vous l'eau chaude le matin pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous l'eau chaude à midi pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
	Utilisez-vous l'eau chaude le soir pour cet usage ?	(1) Oui (2) Non
Informations sur les CES utilisés	Si vous utilisez un chauffe-eau solaire (CES) pour chauffer votre eau, quel est le type ?	(1) Plan local (2) Plan importé (3) Tubes sous-vide (4) Non applicable (n'utilise aucun CES)
	Le chauffe-eau couvre-t-il tous vos besoins en eau chaude ?	(1) Oui (2) Non (3) Non applicable
	Êtes-vous satisfait de votre investissement ?	(1) Oui (2) Non (3) Non applicable
	Rencontrez-vous des problèmes avec votre installation ?	(1) Oui (Préciser) (2) Non (3) Non applicable
Facteurs d'adoption des CES	Seriez-vous prêt(e) à payer ou adopter la technologie CES ?	(1) Oui (2) Non
	Pourquoi ?	(Ouvert)
Informations générales sur le ménage et caractéristiques socio-démographiques du ménage	Ville où se situe le ménage enquêté	(1) Ouagadougou ^a (2) Lomé ^a
	Latitude du lieu de résidence du ménage	(Automatique)
	Longitude du lieu de résidence du ménage	(Automatique)
	Taille du ménage	(Ouvert)
	Nom et prénoms de l'enquêté	(Ouvert)
	Contact téléphonique de l'enquêté	(Ouvert)

^a La ville est en réalité détectée automatiquement à partir des références de l'enquêteur.

grands besoins en eau chaude aussi bien à Ouagadougou qu'à Lomé, selon des enquêtes sommaires ultérieures.

Les enquêtes ont été réalisées le week-end, de préférence le samedi, pour la seule raison que la probabilité de trouver au moins un chef de ménage à la maison était suffisamment élevée pour réduire le biais de réponse.

III.3. Recrutement des enquêteurs

Les enquêteurs ont été recrutés en fonction de leur niveau d'éducation, le baccalauréat étant le niveau requis, pour faciliter la compréhension du questionnaire, et en fonction de leur résidence dans la région à enquêter, pour faciliter l'administration du questionnaire, ainsi qu'en fonction de leurs ressources financières.

A partir de décembre 2022, les étudiants de semestre 5 (S5) de 2iE, sélectionnés pour le projet d'enquête à Ouagadougou ont été contactés. Le projet d'enquête faisait partie de leur projet d'engagement civique, qui est réalisé chaque année pour cette classe. Pour ce semestre, le projet d'engagement civique s'est concentré sur des enquêtes de terrain. Au total, 32 binômes ont été constitués pour mener à bien les enquêtes, chaque équipe comprenant au moins un étudiant burkinabè. Les étudiants résidant ou originaires des différents secteurs administratifs de la ville sont prioritairement affectés à leur secteur.

En outre, les démarches pour l'enquête de Lomé ont commencé en octobre 2022, avec la prise en contact des enquêteurs. En décembre 2022, une rencontre avec le chef de commission des enquêteurs à Lomé a été faite. Cette séance avait pour but d'échanger sur le questionnaire, d'entretenir les enquêteurs sur l'application et comment rapporter les réponses. Un groupe d'étudiants togolais a été choisi pour réaliser les enquêtes auprès des ménages à Lomé. 43 étudiants ont participé aux enquêtes de Lomé. Ils ont été recrutés en suivant le découpage administratif de la ville : l'enquêteur doit être résident de la commune dans laquelle il doit effectuer les enquêtes.

III.4. Echantillonnage et mise en œuvre de l'enquête

Un échantillonnage par quotas a été utilisé, en s'appuyant sur des données détaillées concernant la répartition des ménages dans les 55 secteurs de Ouagadougou. Ces données ont permis de constituer un échantillon reflétant la représentativité de la population mère, en supposant que les habitudes d'utilisation d'eau chaude sont corrélées à la localisation géographique. Un taux d'échantillonnage de 0,25 % a été fixé, équilibrant le coût unitaire de l'enquête et le budget de

recherche disponible. En conséquence, une taille d'échantillon cible d'environ 1460 ménages a été déterminée à partir du total de 582 377 ménages de la ville. La taille de l'échantillon pour chaque secteur a ensuite été calculée proportionnellement afin d'assurer une représentativité géographique. En pratique, 1011 ménages, sélectionnés de manière aléatoire, ont été enquêtés, correspondant à un taux d'échantillonnage effectif (nombre de ménages enquêtés/nombre de ménages de la ville) de 0,17 %.

Le même taux d'échantillonnage de 0,25 % a été appliqué à Lomé (Golfe), qui comprend sept secteurs administratifs (communes), ce qui a donné une taille d'échantillon cible d'environ 780 ménages. Cependant, comme la répartition des ménages entre les communes était inconnue, un nombre égal de ménages (environ 110 par commune) a été ciblé. Finalement, 765 ménages ont été enquêtés, atteignant presque l'objectif prévu.

La collecte des données s'est déroulée entre décembre 2022 et janvier 2023, pendant la saison de l'harmattan. Les réponses ont été envoyées et enregistrées directement sur la plateforme du logiciel.

III.5. Analyse des données

Les données collectées à partir de l'enquête ont été analysées à l'aide du logiciel statistique Stata. Les données brutes de l'enquête ont fait l'objet d'un processus de nettoyage pour corriger les incohérences, les erreurs et les valeurs manquantes. Les réponses invalides ont été exclues de l'analyse afin de garantir la fiabilité des résultats. Par conséquent, le nombre total de répondants variait légèrement en fonction des thèmes abordés, bien que cette variation soit minime. Les réponses concernant les motivations et les obstacles à l'adoption des chauffe-eaux solaires (CES) ont été analysées à la fois qualitativement et quantitativement. Les réponses ouvertes ont été systématiquement codées pour identifier les thèmes récurrents, et leurs fréquences ont été calculées pour faire ressortir les tendances clés. Une approche similaire a été adoptée pour analyser les défis rapportés par les ménages utilisant des CES.

IV. RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE

Les ménages enquêtés comptent en moyenne 4 personnes, avec un écart-type de 2,61 à Ouagadougou et de 1,61 à Lomé. Ceci est en accord avec les données récentes du recensement au Burkina Faso qui indique une taille moyenne des ménages d'environ de 4 personnes pour le Région du Centre, qui est celle de Ouagadougou [148]. Cependant, la médiane est de 4 personnes par ménage à Lomé, contre 3 à Ouagadougou. Il existe également de grands ménages,

en particulier à Ouagadougou, où 5 % des ménages enquêtés comptent au moins 10 personnes. Cette proportion n'est que de 1 % à Lomé.

IV.1. Usages d'eau chaude

À Ouagadougou, 90 % des ménages enquêtés ont déclaré utiliser principalement de l'eau chaude pour se doucher (Figure 8a). En revanche, moins de 1 % des ménages utilisent de l'eau chaude pour la vaisselle ou la lessive. Concernant l'utilisation dans la cuisine, environ 15 % des ménages ont indiqué utiliser de l'eau chaude, mais il est important de préciser qu'il ne s'agit pas de la cuisson régulière. Cela inclut plutôt d'autres usages spécifiques et réguliers, tels que la plumaison des poulets. En raison d'une potentielle confusion, cette catégorie a été exclue des analyses ultérieures. D'autres utilisations de l'eau chaude mentionnées incluent diverses tâches de nettoyage domestique.

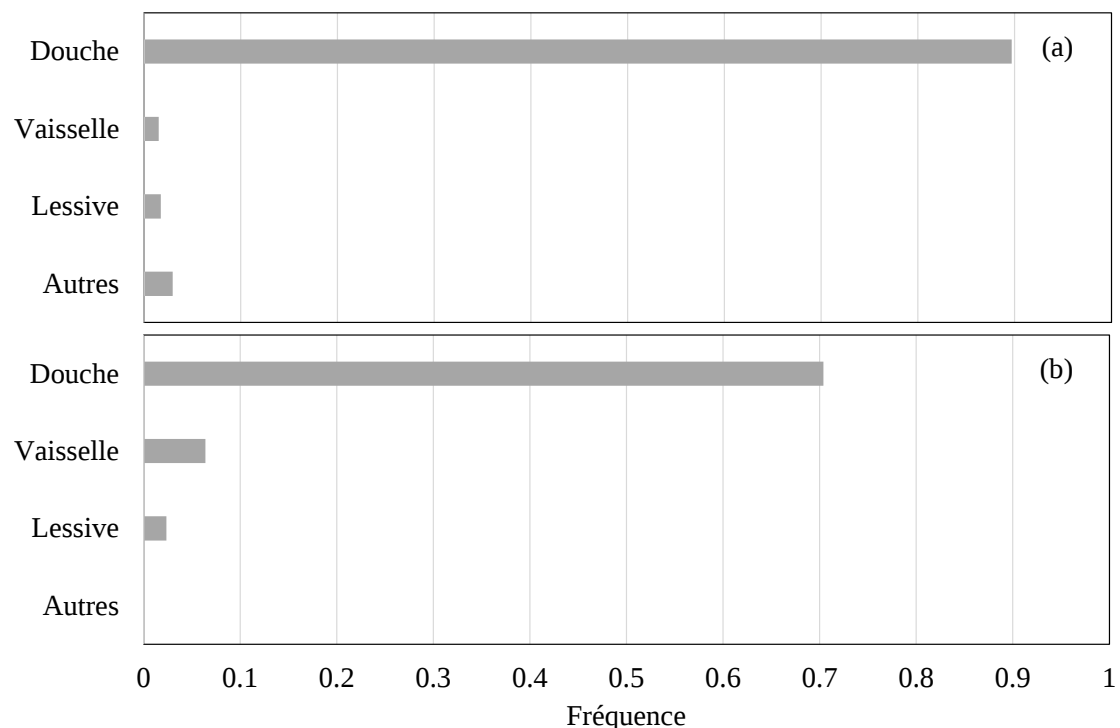


Figure 8 : Répartition de la consommation d'eau chaude par activité des ménages à (a) Ouagadougou et (b) Lomé.

À Lomé, les résultats montrent une situation légèrement différente (Figure 8b). Tandis que la douche demeure l'usage principal, la fréquence est inférieure à celle enregistrée à Ouagadougou, avec une proportion autour de 70 %. De plus, l'utilisation de l'eau chaude pour la vaisselle et la lessive est légèrement plus marquée, atteignant respectivement 6 % et 2 %.

IV.2. Diversité des sources d'énergie pour chauffer l'eau et caractéristiques de la demande en eau chaude

L'enquête a identifié diverses sources d'énergie utilisées pour chauffer l'eau. À Ouagadougou, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) s'est imposé comme le combustible le plus courant, avec 70 % des ménages l'utilisant pour chauffer l'eau destinée aux douches (Figure 9a). Le charbon de bois est utilisé par 35 % des ménages, tandis que 25 % dépendent du bois de chauffe. Les CES sont employés par 9 % des ménages. Parmi les appareils électriques, 8 % des ménages utilisent des chauffe-eau électriques, 2 % des résistances d'immersion électriques et 5 % des bouilloires ou cafetières électriques pour chauffer l'eau. En revanche à Lomé, c'est le charbon de bois qui est le plus couramment cité, avec 62% de ménages qui l'utilisent et 47% qui font usage du gaz.

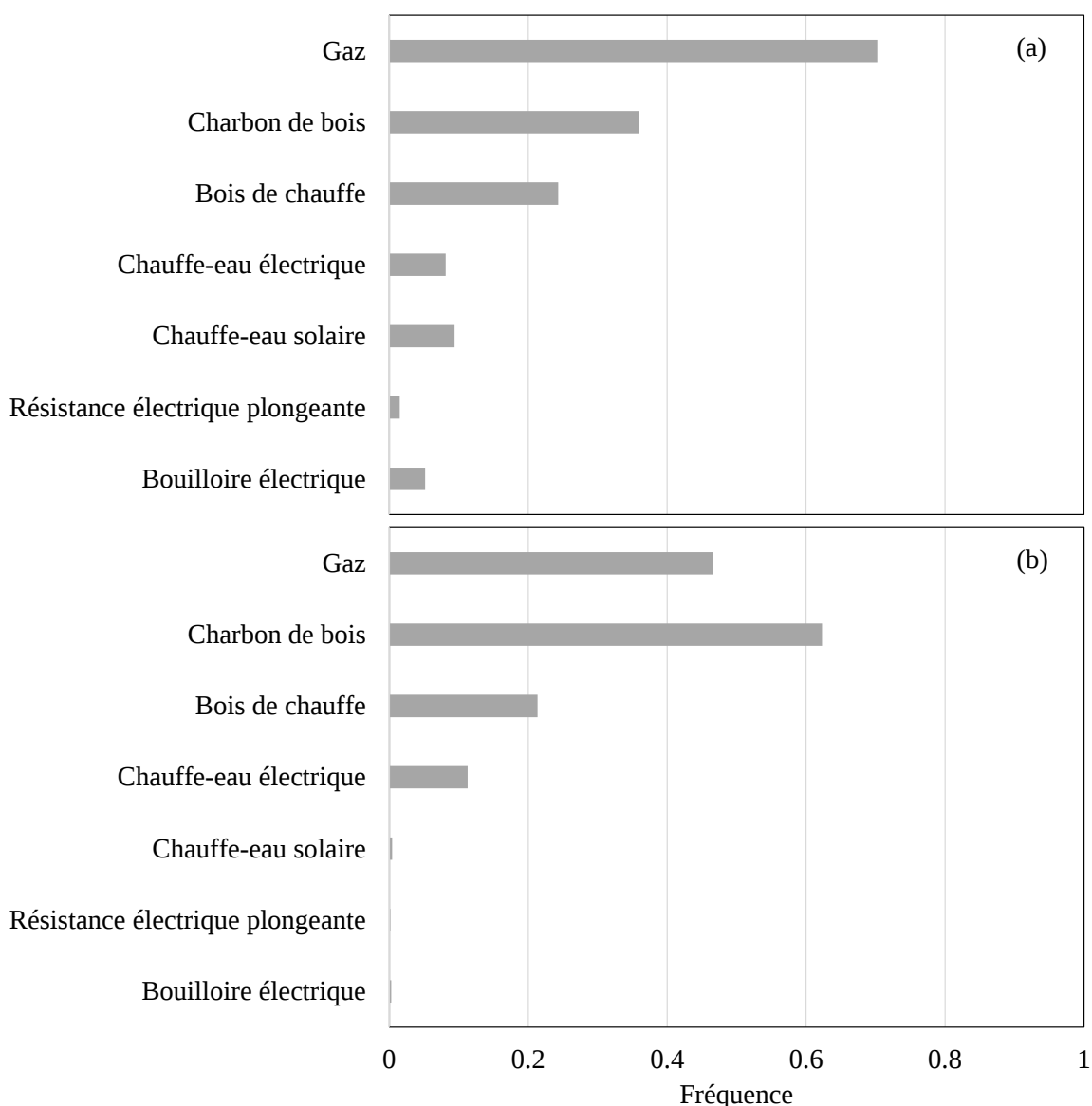


Figure 9 : Répartition des sources d'énergie utilisées pour chauffer l'eau(a) Ouagadougou et (b) Lomé.

En particulier pour le charbon de bois, la dépense quotidienne moyenne pour la préparation d'eau chaude rapportée par les répondants est de 350 F CFA à Ouagadougou et de 239 F CFA à Lomé (Tableau 4).

Tableau 4 : Dépenses journalières (F CFA) pour la préparation d'eau chaude à l'aide de charbon de bois

Statistique	Ouagadougou	Lomé
Médiane	300	200
Moyenne	350	239
Écart-type	211	186
Minimum	100	100
Maximum	1500	1500
Nombre de répondants	480	699

IV.3. Profils temporels et saisonniers de consommation d'eau chaude

En termes d'utilisation quotidienne, à Ouagadougou, 90 % des ménages ont déclaré utiliser de l'eau chaude le matin, 87 % le soir, et seulement 12 % à midi (Figure 10a). En revanche, à Lomé, 71 % des ménages utilisent de l'eau chaude le matin, 65 % le soir, et seulement 3 % à midi (Figure 10b). Ces résultats montrent une utilisation prédominante de l'eau chaude le matin et le soir dans les deux villes, bien que la proportion d'utilisateurs à midi soit significativement plus faible à Lomé.

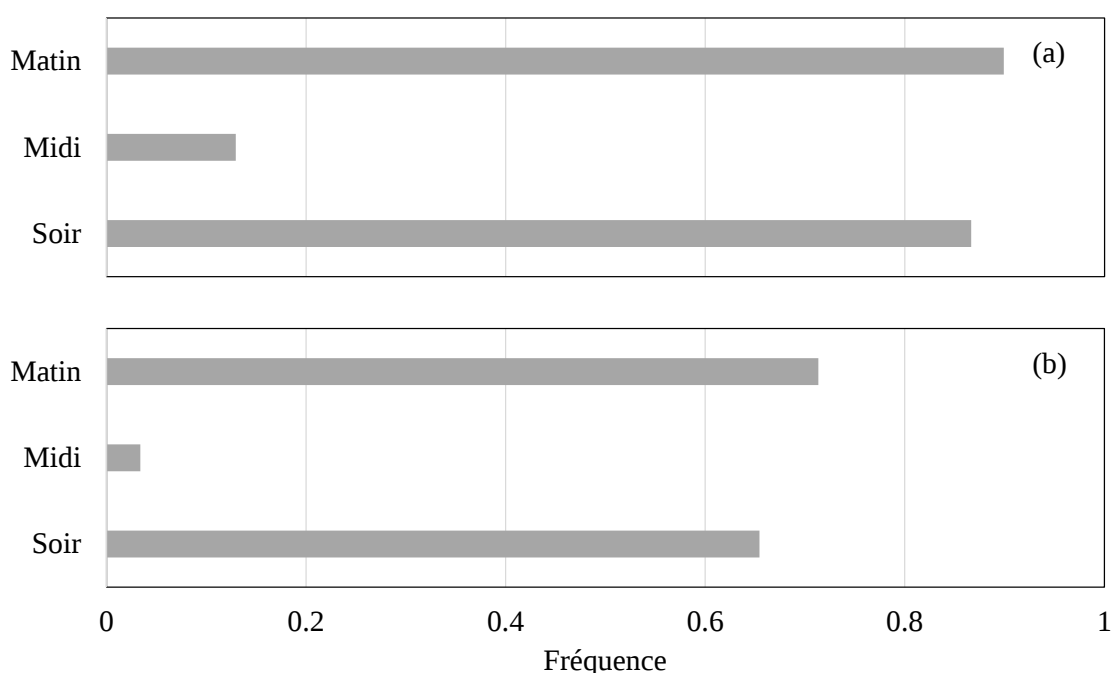


Figure 10 : Profils temporels de l'utilisation de l'eau chaude selon la période de la journée à (a) Ouagadougou et (b) à Lomé.

Concernant l'utilisation de l'eau chaude selon les saisons, à Ouagadougou, 82 % des ménages ont déclaré utiliser l'eau chaude pendant l'harmattan (l'hiver local), tandis que 63 % l'utilisent

pendant la saison des pluies. Seuls 27 % des ménages utilisent de l'eau chaude tout au long de l'année (Figure 11a).

À Lomé, 87 % des ménages utilisent de l'eau chaude pendant l'harmattan, tandis que 61 % l'utilisent pendant la saison des pluies (Figure 11b). Cependant, 40 % des ménages de Lomé ont déclaré utiliser de l'eau chaude toute l'année.

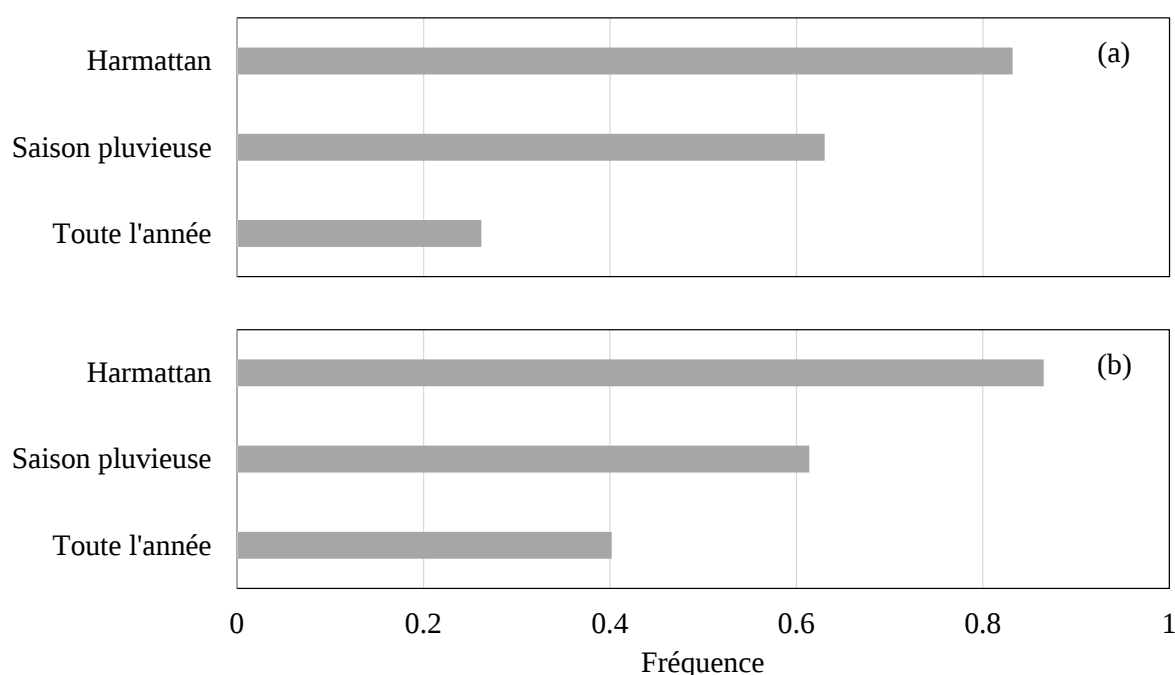


Figure 11 : Profils temporels de la consommation d'eau chaude par saison à (a) Ouagadougou et (b) à Lomé.

IV.4. Performance et satisfaction des utilisateurs des systèmes de CES

L'analyse des données recueillies révèle que le capteur à tubes sous-vide constitue la technologie prédominante des CES, représentant 72 % des installations (Figure 12). Cette technologie surpasse largement les capteurs plans à revêtement sélectif (18 %) et les capteurs plans fabriqués localement (9 %).

En termes de performance, une proportion de 70 % des ménages équipés de CES exprime une satisfaction quant à la capacité de leur système à répondre à leurs besoins en ECS tout au long de l'année (Figure 13). Toutefois, cette satisfaction varie considérablement en fonction du type de technologie utilisée : 71 % pour les utilisateurs de capteurs à tubes sous vide, 74 % pour ceux utilisant des capteurs plans avec absorbeurs à revêtement sélectif, et 58 % pour les foyers équipés de capteurs fabriqués localement, ce qui pourrait refléter des défis associés à la qualité ou à la performance de ces systèmes.

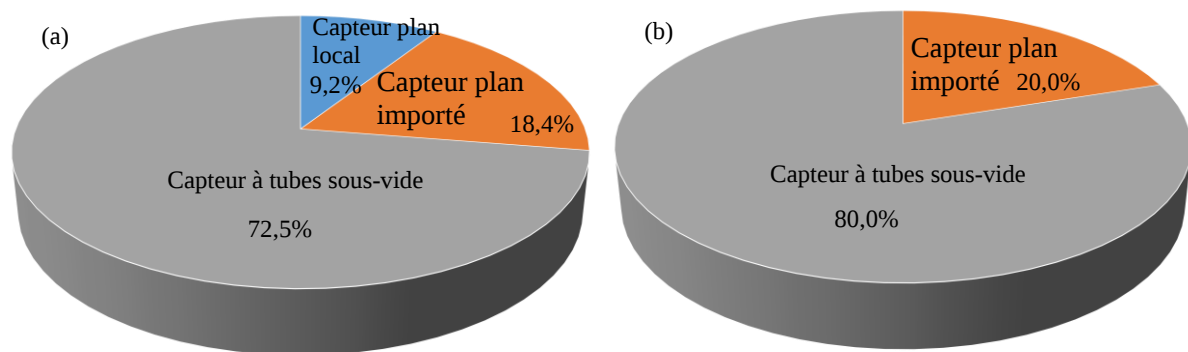


Figure 12 : Répartition des CES selon le type de capteur à (a) Ouagadougou et (b) à Lomé.

Concernant la satisfaction liée à l'investissement dans un CES, environ 91 % des ménages se déclarent satisfaits de leur choix technologique, indépendamment du type de capteur utilisé (Figure 13). Cependant, une proportion de 24 % des répondants a rapporté avoir rencontré des dysfonctionnements ou des problèmes techniques.

Il convient de noter que le nombre de ménages disposant de CES à Lomé est très faible, avec un total de 5 ménages dans l'échantillon de l'enquête (dont 4 utilisent des systèmes de capteurs à sous-vide et 1 un capteur plan à revêtement sélectif), soit un taux d'adoption de 0,4 %. Cette faible représentation rend difficile une analyse significative des résultats pour Lomé, justifiant ainsi l'exclusion des données correspondantes de cette discussion.

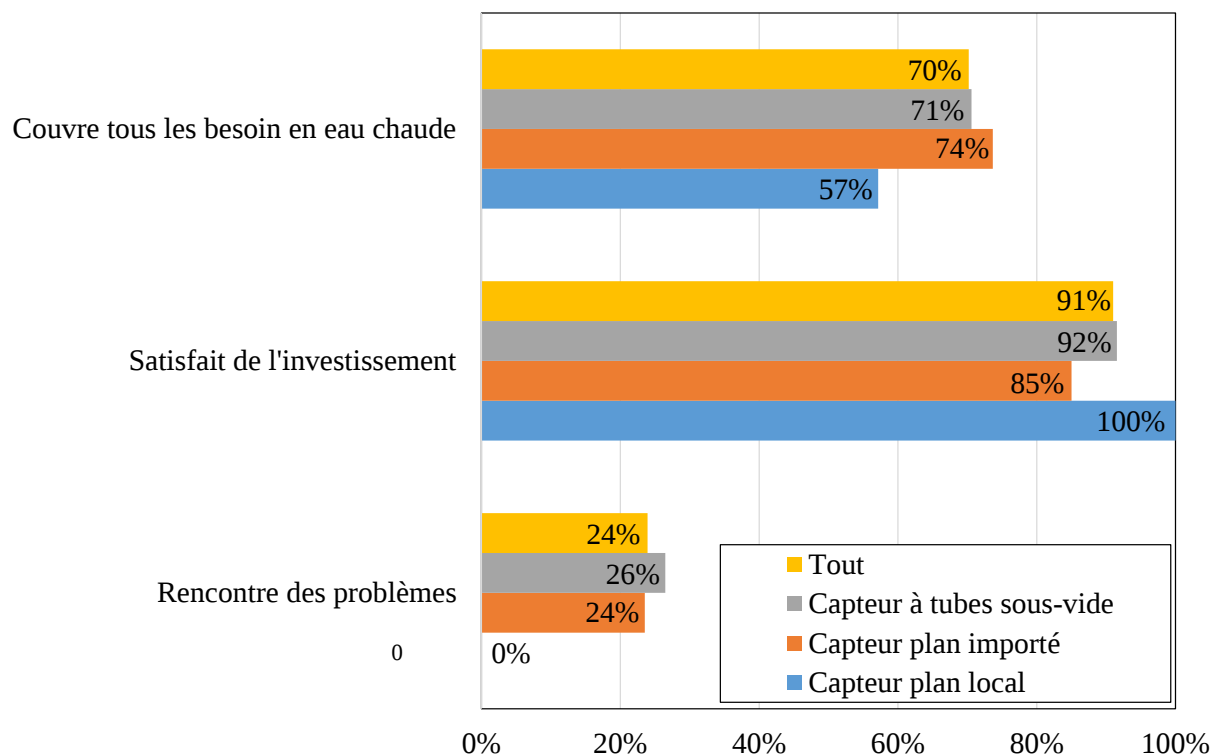


Figure 13 : Niveaux de satisfaction liés aux CES à Ouagadougou.

IV.5. Défis et problèmes liés aux CES

Malgré un taux de satisfaction globalement élevé, environ 24 % des ménages ont rapporté avoir rencontré des difficultés avec leur système de CES. Parmi les problèmes les plus fréquents, la défaillance du flotteur se distingue comme le plus courant, affectant environ 30 % des utilisateurs, particulièrement ceux équipés de capteur à tubes sous-vide (Figure 14). D'autres problèmes significatifs incluent une fourniture d'eau chaude insatisfaisante (22 % des ménages), des fuites (13 %), ainsi que des préoccupations liées à la faible pression de distribution ou du réseau (9 %).

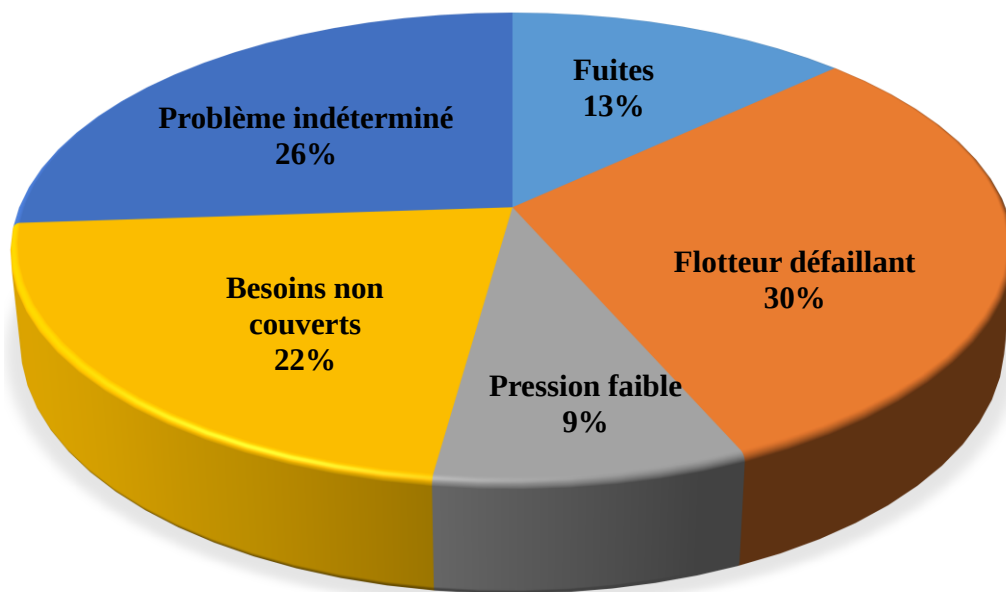


Figure 14 : Principaux problèmes rencontrés avec les CES à Ouagadougou.

IV.6. Motivation et obstacles à l'adoption des CES

Afin mieux comprendre les attitudes des ménages vis-à-vis de l'adoption des CES à Ouagadougou et Lomé, la question posée est la suivante : « *Seriez-vous prêt à payer/adopter la technologie du CES ? Si oui, pourquoi ? Si non, pourquoi ?* ». Les réponses, synthétisées à la Figure 15, mettent en lumière les motivations et les obstacles spécifiques rencontrés dans chaque ville.

Parmi les 544 répondants disposés à adopter un CES à Ouagadougou, les avantages économiques et financiers constituent la motivation principale, citée par 54 % des répondants. La commodité et l'aspect pratique sont également des facteurs significatifs, mentionnés par 37 % des personnes interrogées, traduisant l'attrait pour un système fiable et facile à utiliser.

En revanche, seuls 2 % des répondants ont mis en avant les bénéfices environnementaux de cette technologie, comme la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la déforestation. D'autres motivations (7 %) incluent des raisons diverses telles que l'intérêt pour l'innovation technologique ou des considérations liées à la sécurité, comme l'évitement des risques d'incendie.

Parmi les 362 répondants qui ne souhaitent pas adopter un CES, les contraintes financières et les coûts initiaux élevés dominent les raisons du refus, cités par 64 % des participants (Figure 15a). Le manque d'intérêt (11 %) et la possession d'un système existant (7 %) sont également mentionnés. D'autres facteurs incluent la faible utilisation d'eau chaude (4 %), le manque de connaissances sur la technologie (2 %) et, pour une minorité (1 %), des expériences passées négatives ou la perception d'une fiabilité limitée des CES. Par ailleurs, 3 % des participants ont évoqué la présence d'équipements électriques conventionnels, comme les chauffe-eaux électriques. En outre, 4 répondants ont indiqué que leur résidence dans un logement locatif les empêche d'installer un chauffe-eau solaire, car ils ne sont pas propriétaires du bien.

À Lomé, parmi les 643 répondants disposés à adopter un CES, la motivation la plus fréquemment citée était les avantages économiques et financiers, mentionnés par 52 % des répondants (Figure 15b). La commodité et la praticité suivaient, citées par 26 % des répondants, mettant en avant l'attrait d'un système fiable et facile à utiliser. Notamment, les bénéfices environnementaux, tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la déforestation, ont été un facteur significatif pour 15 % des répondants. Par ailleurs, 6 % ont mentionné d'autres raisons, telles que la curiosité pour la technologie ou une préférence pour ses caractéristiques de sécurité.

Parmi les 133 répondants réticents à adopter un CES à Lomé, les contraintes financières et les coûts initiaux élevés ont été les raisons les plus fréquemment citées, mentionnées par 56 % des répondants (Figure 15b). Contrairement à Ouagadougou, la présence d'équipements électriques conventionnels, tels que le chauffe-eau électrique, constitue un obstacle notable pour 25 % des répondants. D'autres raisons incluent le manque d'intérêt (13 %), la possession d'un CES existant (2 %) et la faiblesse d'utilisation ou l'absence de besoins en eau chaude (2 %). Par ailleurs, 2 % des répondants ont cité des expériences négatives passées ou des perceptions de fiabilité limitée, tandis que 1 % ont mentionné des contraintes liées au statut locatif. Il est à noter qu'aucun participant n'a évoqué un manque de connaissances ou des difficultés d'entretien comme obstacles à Lomé.

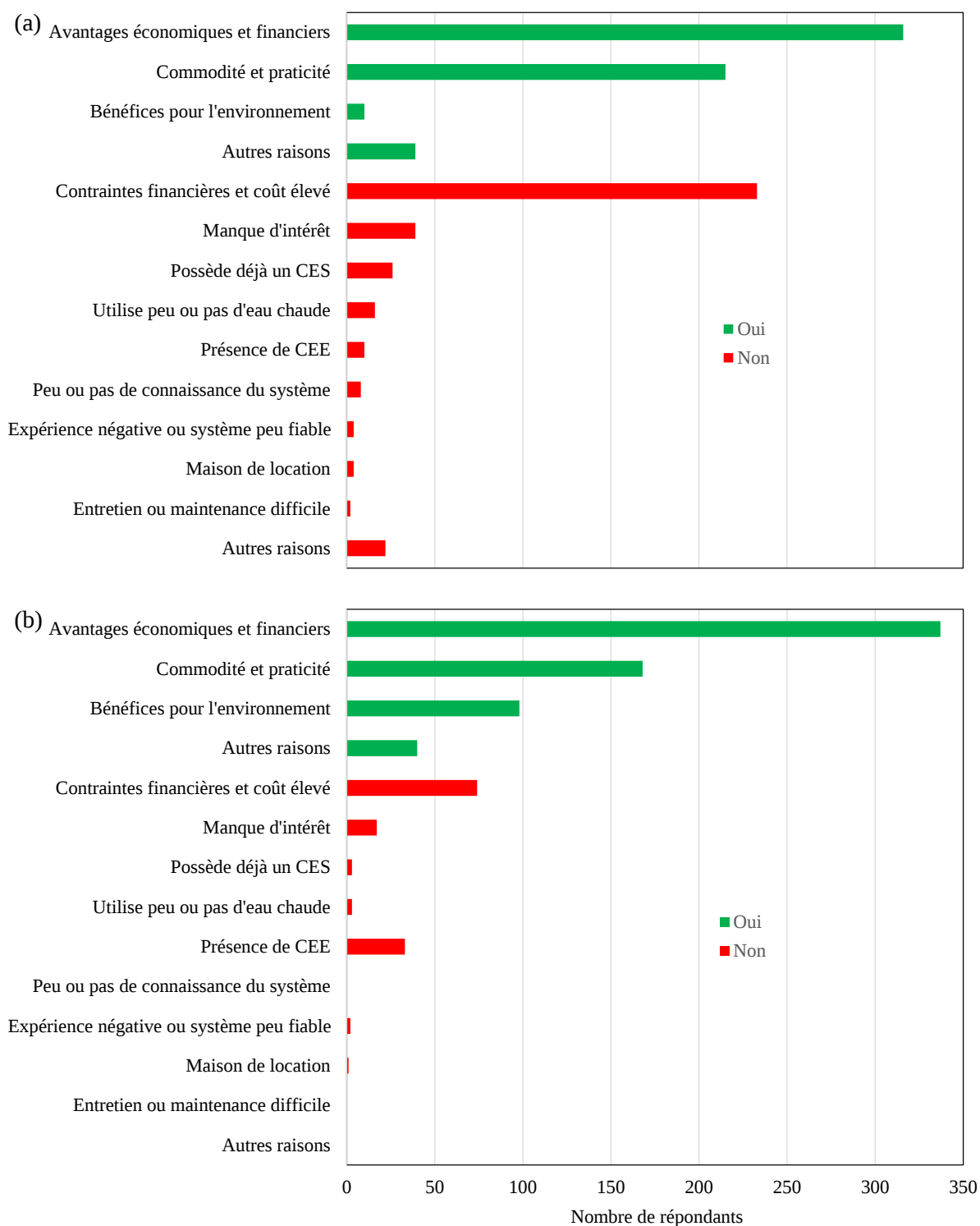


Figure 15 : Réponses à la question « Seriez-vous prêt à payer/adopter la technologie du CES ? Pourquoi ? » à (a) Ouagadougou et (b) à Lomé.

V. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

V.1. Sources d'énergie pour chauffer l'eau

Les résultats de l'enquête mettent en évidence des différences notables dans les sources d'énergie utilisées pour le chauffage de l'eau à Ouagadougou, Lomé et dans d'autres régions, influencées par des facteurs économiques, climatiques et politiques.

À Ouagadougou, le GPL représente la source d'énergie prédominante, utilisé par 70 % des ménages. Cette forte adoption s'explique par des subventions gouvernementales substantielles accordées au GPL. En revanche, à Lomé, où les ressources forestières sont plus abondantes, le charbon de bois demeure la principale source d'énergie, avec 62 % des ménages l'utilisant, suivi du GPL (47 %), qui reste moins abordable en raison de son coût plus élevé et d'une dépendance persistante à la biomasse.

Dans les deux villes, le bois de chauffage continue d'occuper une place significative, en accord avec des études menées à Kaduna, au Nigéria, où 40 % des ménages utilisent également du bois pour chauffer l'eau sanitaire [152]. Toutefois, les politiques visant à limiter la dépendance à la biomasse en favorisant les systèmes de CES et en subventionnant le GPL semble avoir un impact notable. Ces politiques, combinées à un ensoleillement annuel plus élevé à Ouagadougou, ont rendu les CES plus abordables et accessibles à Ouagadougou, où un CES à tube sous-vide de 150 L coûte 210 000 FCFA contre 450 000 FCFA à Lomé (en mai 2024). Cette accessibilité contribue à une adoption plus élevée des CES à Ouagadougou (9 %) par rapport à d'autres villes africaines, telles que Lomé (0,4 %) ou Maputo (1 %) [145]. Le climat local joue également un rôle important. Les températures matinales plus basses enregistrées pendant l'harmattan à Ouagadougou (16 °C contre 24 °C à Lomé en janvier) pourraient également amplifier la demande en eau chaude. Bien que des politiques incitatives aient montré un succès significatif dans la promotion de l'adoption dans certains pays, comme Rizhao en Chine centrale [153] ou le programme PROSOL en Tunisie [19] les taux d'adoption restent faibles dans d'autres contextes, même là où les gouvernements ont mis en place des programmes d'incitation généreux, comme en Ouganda [154] et la Californie [155], malgré les conditions climatiques favorables de cette dernière.

L'utilisation des technologies de chauffage électrique reste limitée, avec les chauffe-eaux électriques utilisés par 8 % des ménages à Ouagadougou et 11 % à Lomé. En parallèle, de petits appareils électriques comme les thermoplongeurs (2 %) et les bouilloires électriques/machines à café (5 %) sont plus courants à Ouagadougou, reflétant potentiellement des différences dans la disponibilité des appareils et les habitudes culturelles. En comparaison, à Maputo, au Mozambique, les bouilloires électriques (27,4 %) jouent un rôle plus important, probablement en raison des infrastructures et des considérations de coût [145]. Ces appareils constituent des

alternatives moins coûteuses aux chauffe-eau électriques, bien qu'ils puissent être moins efficaces sur le plan énergétique ou nécessiter des remplacements plus fréquents. Cela contraste avec Lomé, où les petits appareils électriques sont presque absents. L'électricité joue un rôle relativement mineur dans le chauffage de l'eau à Ouagadougou et à Lomé, en nette opposition avec Maputo, où 45 % des ménages utilisent l'électricité, en particulier dans les quartiers urbains (jusqu'à 81 %) [145]. Cette utilisation plus élevée à Maputo est probablement due au fait que l'électricité est environ trois fois plus chère au Burkina Faso qu'au Mozambique [156].

Les choix des ménages en matière de source d'énergie pour le chauffage de l'eau sont donc fortement influencés par le prix des combustibles, les coûts des technologies et les politiques publiques. À Ouagadougou, l'accessibilité financière du GPL découle directement des subventions mises en place pour lutter contre la déforestation. À Lomé, le coût élevé des CES constitue un frein, malgré les défis communs posés par la dépendance à la biomasse et la durabilité environnementale.

En sommes, les sources d'énergie pour le chauffage de l'eau en Afrique de l'Ouest reflètent une interaction complexe entre des facteurs économiques, climatiques et politiques. L'adoption croissante de politiques incitatives pour les CES à Ouagadougou illustre le potentiel de transitions énergétiques durables dans le contexte sahélien. L'adoption progressive de mécanismes de soutien pour les CES dans une ville sahélienne comme Ouagadougou démontre le potentiel des politiques publiques à favoriser des transitions vers une utilisation durable de l'énergie. Cependant, les disparités dans l'abordabilité et l'adoption des technologies entre Ouagadougou et Lomé soulignent la nécessité d'interventions adaptées pour répondre aux contraintes et opportunités locales.

V.2. Profil d'utilisation saisonniers et quotidiens

Dans les deux villes, l'utilisation de l'eau chaude a été principalement signalée le matin et le soir, avec une utilisation minimale en milieu de journée. Cela s'explique par les habitudes des ménages, où le matin et le soir sont généralement associés à l'hygiène personnelle et à la préparation des activités quotidiennes ou nocturnes. En particulier, le pourcentage plus élevé d'utilisateurs le matin et le soir à Ouagadougou peut s'expliquer par son climat aride, notamment pendant l'harmattan, où les températures plus fraîches au début de la matinée et à la fin de la soirée entraînent un plus grand besoin de confort thermique.

Dans les deux villes, pendant l'harmattan, une part importante des ménages (entre 80 et 90 %) utilise l'eau chaude domestique, contre environ 60 % pendant la saison des pluies. Il est à noter

que l'utilisation tout au long de l'année a été signalée par 27 % des ménages à Ouagadougou et 40 % à Lomé. Cette proportion plus élevée à Lomé peut être attribuée au climat côtier de la ville, où des températures relativement modérées tout au long de l'année soutiennent une utilisation constante de l'eau chaude.

Ces changements dans les profils de consommation sont importants pour la conception des systèmes et remettent en question la pratique consistant à utiliser un profil d'eau chaude constant pour simuler les besoins des ménages en Afrique (par exemple, Taher et al. [130] ont utilisé 240 L/jour toute l'année).

V.3. Performance et satisfaction des utilisateurs des systèmes de CES

La prédominance des CES à tubes sous-vide, qui représentent 72 % des systèmes installés à Ouagadougou, reflète leur faible coût et leur efficacité. En effet, les capteurs à tubes sous-vides ont gagné beaucoup de terrain et sont de loin la principale technologie de CES adoptée au Burkina Faso aujourd'hui. Cette croissance a été soutenue par l'exonération des taxes à l'importation pour les équipements d'énergie renouvelable, en vigueur au Burkina Faso depuis 2013.

D'autre part, les capteurs plans à revêtement sélectif représentaient 18 % des systèmes, et leur taux de satisfaction légèrement plus élevé (68 %) par rapport aux CES à capteur sous-vide (58 %) peut suggérer que les utilisateurs apprécient leur robustesse, et peut-être aussi leur rendement, étant donné qu'ils sont généralement livrés avec une norme de qualité internationale (par exemple, Solar Keymark). En revanche, les capteurs plans fabriqués localement, qui ne représentent que 9 % des installations, affichent le taux de satisfaction le plus bas (40 %), probablement en raison de problèmes de qualité ou de performances limitées.

La satisfaction à l'égard des systèmes de CES est généralement élevée, puisque 80 % des ménages se déclarent satisfaits de leur investissement, quelle que soit la technologie utilisée. Cependant, les 20 % de ménages ayant rencontré des problèmes avec leurs systèmes mettent en lumière les domaines dans lesquels des améliorations techniques et un soutien pourraient améliorer l'expérience des utilisateurs. Les problèmes liés à l'entretien, à l'installation et aux normes de fabrication locales pourraient contribuer à ces problèmes signalés, comme l'ont révélé deux études [157,158] menées dans notre Institut, auxquelles nous avons participé.

Bien que les taux d'adoption restent modestes, les niveaux de satisfaction généralement élevés et les performances démontrées des CES à Ouagadougou et à Lomé soulignent leur potentiel en tant que solution durable pour l'ECS.

V.4. Défis et problèmes liés aux CES

Les problèmes observés dans les CES, notamment les pannes de flotteur enregistrées dans 30 % des ménages étudiés, mettent en exergue une défaillance notable en termes de fiabilité. Des résultats similaires ont été rapportés en Californie, où 41 % des ménages ont rencontré des problèmes [155], y compris des pannes de composants telles que des fuites et des problèmes de pompe (il est utile de rappeler que les systèmes en Californie sont plus susceptibles d'être des systèmes à pompe, contrairement aux systèmes à thermosiphon utilisés à Ouagadougou). Le problème des pannes de flotteurs parmi les utilisateurs de CES à tubes sous-vide a été particulièrement mis en évidence par une enquête spécifiquement conçue à Ouagadougou, à laquelle nous avons contribué [158]. L'étude a révélé que parmi les 31 systèmes de CES à capteur sous-vide examinés, 20 ont nécessité au moins un remplacement de flotteur [158].

En outre, la fourniture insuffisante d'eau chaude, rapportée par 22 % des utilisateurs, présente une similarité avec les observations réalisées à Rizhao, en Chine, où des installations de qualité médiocre, notamment des systèmes de pompage défectueux, entraînent des performances souvent inadéquates [153]. Ce problème a parfois conduit au démantèlement des systèmes de CES, les utilisateurs perdant confiance en raison des résultats sous-optimaux. Des problèmes similaires ont été signalés ailleurs (Californie), bien qu'ils ne semblent pas aussi importants [155]. Cela justifie une enquête plus approfondie pour identifier les causes sous-jacentes. Les observations préliminaires suggèrent que le problème pourrait provenir de systèmes sous-dimensionnés. À Ouagadougou, par exemple, un système standard d'une capacité de 150 L est souvent utilisé par des ménages comptant jusqu'à 10 personnes ou plus, ce qui dépasse la capacité prévue. Ces résultats soulignent également l'importance globale de l'assurance qualité, en particulier dans les marchés émergents où les contraintes de coût peuvent conduire à la prolifération de systèmes de qualité inférieure.

Cependant, la persistance de ces défis techniques soulève des enjeux significatifs pour le développement de l'industrie des CES, particulièrement dans des contextes régionaux comme l'Afrique de l'Ouest. En effet, une étude menée par Bikoï [157] à Ouagadougou a révélé que 22 % des systèmes étudiés étaient hors service, les pannes étant attribuées à 75 % à un manque de maintenance et à 24 % à des défaillances récurrentes, ayant entraîné une démotivation des

utilisateurs. Cela est cohérent avec nos résultats, où le manque de professionnels qualifiés et les coûts élevés de maintenance restent des obstacles importants à l'adoption.

V.5. Motivation et obstacles à l'adoption

Les données de l'enquête révèlent des similitudes et des différences notables dans les motivations qui poussent les ménages à adopter les CES. Dans les deux villes, les avantages économiques et financiers sont apparus comme la principale motivation, citée par 54 % des personnes interrogées à Ouagadougou et 52 % à Lomé. Cela correspond aux résultats de la Californie, où 62 % des personnes interrogées ont adopté les CES pour économiser de l'argent sur les factures d'énergie [155]. Cependant, le contexte plus large de l'Afrique de l'Ouest est marqué par des coûts énergétiques relatifs plus élevés et un revenu disponible limité, ce qui fait des avantages économiques un moteur plus convaincant.

La commodité et l'aspect pratique sont également des facteurs importants, cités par 37 % des personnes interrogées à Ouagadougou et 26 % à Lomé. Cela indique que l'attrait d'un système de CES fiable et facile à utiliser constitue un facteur d'adoption universel, même dans des contextes socio-économiques variés. Cette différence peut également être attribuée à des questions de familiarité avec la technologie des CES, car Lomé présente une plus grande prévalence d'équipements électriques conventionnels, ce qui pourrait réduire la perception du besoin en CES. La commodité et l'aspect pratique semblent être des leviers clés qui peuvent être utilisés pour promouvoir la technologie des CES. Les avantages environnementaux pourraient jouer un rôle plus important à Lomé, où 15 % des personnes interrogées citent ce facteur, contre seulement 2 % à Ouagadougou. Cet écart peut refléter les différences de sensibilisation et d'attitude à l'égard de la durabilité environnementale entre les deux villes. Cependant, ces motivations environnementales ne semblent pas suffisantes pour entraîner des taux d'adoption plus élevés à Lomé, où les considérations économiques restent le facteur dominant. Comme il a été noté en Ouganda, les normes personnelles telles que la conscience environnementale peuvent influencer de manière significative l'adoption des technologies solaires [154]. Néanmoins, la conscience environnementale dans les deux villes semble relativement faible, surtout si on la compare à la Californie, où près de la moitié des utilisateurs de CES citent les avantages environnementaux comme un facteur clé de leur décision et de leur satisfaction [155]. Cela signifie que ce type d'argument parle moins à la population des deux villes et qu'il existe un besoin de sensibilisation sur les enjeux de protection de l'environnement.

Les contraintes financières et les coûts initiaux élevés étaient les obstacles les plus importants dans les deux villes, cités par 64 % des personnes interrogées à Ouagadougou et 56 % à Lomé. Ce résultat est cohérent avec les études précédentes, qui identifient le coût initial élevé des CES comme l'obstacle majeur à l'adoption en Afrique de l'Ouest [152,159]. Dans la plupart des pays de la région, le coût d'un système de CES de base dépasse cinq voire six fois le salaire mensuel minimum, ce qui le rend inaccessible pour de nombreux ménages [11].

La présence d'équipements électriques conventionnels en tant que technologie concurrente était une barrière plus importante à Lomé (25%) qu'à Ouagadougou (3%). Cela peut être attribué à la plus grande disponibilité et au prix plus abordable des chauffe-eau électriques à Lomé. Des tendances similaires ont été observées au Nigeria, où les faibles tarifs de l'électricité ont réduit la rentabilité des CES par rapport aux solutions électriques [32,107]. En outre, l'accès limité à des mécanismes de financement abordables exacerbe ce défi, car les prêts bancaires, lorsqu'ils sont disponibles, sont souvent assortis de taux d'intérêt élevés. Cependant, la dépendance à l'égard des systèmes conventionnels peut également refléter un manque de sensibilisation à la rentabilité à long terme des CES. En effet, certaines personnes instruites n'ont pas conscience des avantages de la CES [12].

Le manque d'intérêt est un autre obstacle notable, cité par 13 % des personnes interrogées à Lomé et 11 % à Ouagadougou. Cela reflète des défis sociaux plus larges, y compris une sensibilisation et une compréhension limitées de la technologie des CES et de ses avantages.

V.6. Limitations et recherches futures

Plusieurs limitations doivent être reconnues :

- L'analyse se limite à deux centres urbains : Ouagadougou et Lomé. Bien que ces villes offrent des contextes contrastés, les résultats peuvent ne pas représenter pleinement la diversité des pratiques de chauffage de l'eau dans les zones rurales ou dans d'autres régions urbaines de l'Afrique de l'Ouest. Des recherches futures pourraient élargir la portée géographique pour inclure des zones rurales ou des villes supplémentaires afin de capturer un éventail plus large de conditions socio-économiques et climatiques.
- L'étude repose sur des données d'enquête auto-déclarées, qui peuvent être sujettes à des biais de mémoire ou à des inexactitudes dans les rapports des ménages. Par exemple, l'enquête a été réalisée entre la mi-décembre 2022 et fin janvier 2023, coïncidant avec la saison de l'harmattan, une période de forte demande en eau chaude, notamment à Ouagadougou. Ce timing pourrait conduire à une surestimation des besoins en eau

chaude tout au long de l'année, des dépenses associées et des comportements liés. Compléter les données de l'enquête par une surveillance directe des systèmes de chauffage de l'eau pourrait améliorer la fiabilité et la précision des résultats.

- Bien que les variations quotidiennes et saisonnières de la demande en eau chaude soient abordées, l'étude n'a pas capturé la dynamique réelle du profil de consommation d'eau chaude. Des études supplémentaires suivant les ménages au fil des saisons fourniraient des aperçus plus profonds des modèles temporels et des performances des systèmes.
- L'étude identifie les obstacles économiques et les avantages, mais elle manque d'une analyse détaillée coûts-avantages de l'adoption des CES, y compris les coûts sur le cycle de vie et les économies potentielles. Une évaluation économique complète pour mieux quantifier la faisabilité financière des CES dans la région pourrait aider à soutenir les stratégies de promotion.
- Bien que la taille de l'échantillon ait été soigneusement conçue pour être proportionnelle au nombre de ménages dans chaque secteur administratif de la ville, elle ne capture peut-être pas pleinement la diversité des modèles d'utilisation de l'eau et des préférences. Le processus de sélection sur le terrain, bien que randomisé au sein des secteurs, pourrait avoir été influencé par des facteurs subjectifs. Par exemple, les enquêteurs pourraient avoir été plus enclins à approcher les ménages avec des installations CES visibles, ce qui pourrait biaiser les résultats, surtout à Ouagadougou où le taux d'adoption semble relativement élevé. Les études futures devraient envisager de sélectionner les ménages de manière aléatoire à l'aide d'outils de cartographie avant les visites sur le terrain afin de minimiser de tels biais.
- La conception de l'enquête a proposé des options binaires (par exemple, Oui/Non) pour certaines questions, ce qui n'a peut-être pas pleinement reflété l'incertitude ou les perspectives nuancées des répondants. Comme l'ont noté des études précédentes, telles que le travail de Sanguinetti et al. [155], offrir des options supplémentaires comme « Pas sûr » ou « Neutre » peut fournir une compréhension plus précise des points de vue des participants. Les recherches futures devraient intégrer des formats de réponse plus flexibles pour améliorer la fiabilité et la profondeur des données.

VI. CONCLUSIONS

Ce chapitre a permis d'évaluer l'utilisation de l'eau chaude et met en lumière les différences dans le choix des sources d'énergie pour chauffer de l'eau entre Ouagadougou et Lomé. Il

explore également les facteurs économiques, environnementaux et politiques influençant ces décisions. Les principales conclusions de cette étude peuvent être résumées comme suit :

- Le choix des sources d'énergie pour le chauffage de l'eau domestique varie considérablement entre Ouagadougou et Lomé en raison de facteurs économiques, climatiques et politiques :
 - Ouagadougou : Le gaz est prédominant (70 % des ménages) en raison des subventions gouvernementales visant à réduire la déforestation, ce qui le rend plus abordable. Les CES sont adoptés par 9 % des ménages, soutenus par des politiques favorables, un ensoleillement plus élevé et une meilleure accessibilité par rapport à Lomé.
 - Lomé : Le charbon de bois (62 %) reste dominant en raison de sa disponibilité et de l'absence de subventions équivalentes pour le gaz. L'adoption des CES est minimale (0,4 %), freinée par les coûts élevés et les incitations limitées.
- L'utilisation de l'eau chaude est concentrée le matin et le soir dans les deux villes, influencée par le climat et les routines domestiques. Les variations saisonnières montrent :
 - Une utilisation plus élevée pendant la saison plus fraîche de l'harmattan (80-90 % des ménages).
 - Une utilisation tout au long de l'année est plus courante à Lomé (40 %) qu'à Ouagadougou (27 %), probablement en raison de son climat côtier modéré.
- Bien que l'adoption des CES reste faible dans les deux villes, Ouagadougou présente des perspectives encourageantes grâce au soutien des politiques et à son accessibilité.
- Des niveaux de satisfaction élevés (80 %) indiquent des expériences positives chez les adoptants, bien que des problèmes techniques tels que des défaillances de flotteurs et des systèmes sous-dimensionnés affectent la fiabilité.
- Les problèmes techniques, notamment les défaillances de flotteurs (30 % des ménages) et les systèmes sous-dimensionnés, compromettent la fiabilité et la confiance des utilisateurs.
- La maintenance et l'assurance qualité sont des obstacles majeurs à une adoption plus large, reflétant les défis plus larges des marchés émergents.
- Les avantages économiques sont le principal moteur, suivis par la commodité. La prise de conscience environnementale est faible, mais a un potentiel de croissance avec une éducation accrue.

- Les coûts initiaux élevés et les contraintes financières sont les principaux obstacles. Le coût des systèmes CES est excessivement élevé, dépassant cinq à six fois le salaire minimum mensuel dans de nombreux cas.
- Les parties prenantes institutionnelles pourraient envisager les actions suivantes :
 - Réduire les coûts d'acquisition, surtout à Lomé, pour en faciliter l'accès ;
 - Améliorer la fiabilité technique des systèmes, notamment à Ouagadougou, en renforçant les normes de qualité et la maintenance ;
 - Mettre en place des campagnes de sensibilisation adaptées aux réalités socioculturelles, en insistant sur les normes sociales, l'influence des pairs, et le confort offert par les CES ;
 - Comme les capteurs à tubes sous-vide sont à présent la technologie dominante sur le marché local, le développement des solutions efficaces pour prévenir ou réparer les pannes à un coût raisonnable est crucial afin d'éviter leur désadoption.
 - Réfléchir à des stratégies permettant de réusciter l'industrie locale en pertes de vitesse, industrie qui a pourtant favorisé la connaissance et la diffusion de la technologie notamment dans le Sahel enclavé.

En conclusion, ce chapitre contribue à une meilleure compréhension des défis et opportunités liées à l'introduction des CES dans les contextes urbains, tout en s'inscrivant dans une réflexion plus large sur les politiques énergétiques et les solutions durables adaptées aux besoins des populations locales. Ces enseignements serviront de base pour les analyses des chapitres suivants, qui examineront le suivi des CES en conditions réelles d'utilisation, tout en évaluant leur performance et l'utilisation de l'eau chaude par les ménages.

**CHAPITRE 3. METHODOLOGIE
D'ETUDE ET DESCRIPTION
DES SYSTEMES DE CHAUFFE-
EAU SOLAIRES THERMIQUES
ANALYSES EN SITUATION
REELLE DANS DES RÉGIONS
HUMIDES ET ARIDES
D'AFRIQUE DE L'OUEST**

I. INTRODUCTION

Ce chapitre détaille la méthodologie adoptée pour étudier les CES en fonctionnement réel en Afrique de l'Ouest, avec un accent particulier sur la diversité des installations suivies, en détaillant leurs caractéristiques techniques et les conditions réelles de leur utilisation. La démarche d'évaluation des performances techniques, économiques et environnementale est présentée, en tenant compte des aspects spécifiques ou pertinentes, selon l'installation. Quatre installations ont été étudiées (Tableau 5) : trois en zone sahélienne (Ouagadougou) et une en zone humide et côtière (Lomé). Ces cas d'étude illustrent les différentes applications des CES dans des contextes géographiques et fonctionnels variés.

Tableau 5 : Typologie des chauffe-eau solaires thermiques suivis à Ouagadougou et à Lomé.

Localisation	Secteur	Application	Type de capteur	Système
Ouagadougou	Tertiaire	Hôtel	Plan	Thermosiphon
Ouagadougou	Tertiaire	Buanderie d'hôpital	Plan	Auto-stockeur
Ouagadougou	Domestique	Ménage individuel	Plan	Thermosiphon
Lomé	Domestique	Ménage individuel	Tube sous vide	Thermosiphon

Il convient de noter que la répartition géographique des systèmes analysés reflète les réalités du marché des chauffe-eaux solaires thermiques dans les deux zones étudiées. À Lomé, où le taux d'adoption des CES est particulièrement faible (0,4 % contre 9 % à Ouagadougou) comme observé au chapitre précédent, le choix des installations à suivre a été limité par la rareté des systèmes disponibles. Cette disparité justifie la prédominance des systèmes étudiés à Ouagadougou.

II. TYPOLOGIE ET CARACTÉRISTIQUES DES INSTALLATIONS DE CHAUFFE-EAU SOLAIRES THERMIQUES SUIVIS

II.1. Installations dans le secteur tertiaire

II.1.1. Chauffe-eau solaire auto-stockeur : application en buanderie hospitalière à Ouagadougou

L'hôpital considéré à Ouagadougou utilise un système solaire pour chauffer l'eau dans sa buanderie, qui assure le nettoyage du linge provenant de divers services hospitaliers, tels que les unités de soins intensifs, la néonatalogie et les blocs opératoires. La charge varie tout au

long de l'année. Par exemple, de septembre à novembre, on observe une augmentation des lits en néonatalogie en raison de la recrudescence du paludisme et d'autres maladies d'origine hydrique à la fin de la saison des pluies. Un autre facteur majeur correspond aux campagnes de chirurgie ponctuelles, généralement mises en œuvre par plusieurs médecins venus d'autres unités de santé locales ou de l'étranger.

Le processus de lavage comprend plusieurs étapes successives : des rinçages initiaux, le prélavage, le lavage principal à 60 °C, et des rinçages. Bien que toutes les étapes soient censées idéalement utiliser de l'eau chaude, seule celle du lavage est effectivement réalisée avec de l'eau chauffée, pour économiser de l'énergie. La buanderie est équipée de trois machines à laver du même fabricant, acquises et installées en mai 2016. Toutefois, seules deux machines fonctionnent avec le système solaire, la troisième utilisant un chauffage électrique en raison de problèmes techniques. La buanderie opère du lundi au samedi, de 7 h à 18 h, et de 7 h à 13 h le dimanche, bien que depuis le 14 février 2023, les services dominicaux soient suspendus sauf en cas de nécessité.

Le CES installé est un autostokeur, combinant le capteur solaire et le réservoir de stockage en une seule unité avec une capacité totale de 260 L (Figure 16). Deux unités capteurs autostokeurs sont connectées en parallèle pour alimenter les machines. La résistance électrique intégrée à chaque machine à laver a une puissance nominale de 5 kW et n'est utilisée que lorsque la température de l'eau provenant du CES tombe en-dessous de 60 °C pendant le lavage (Figure 17).

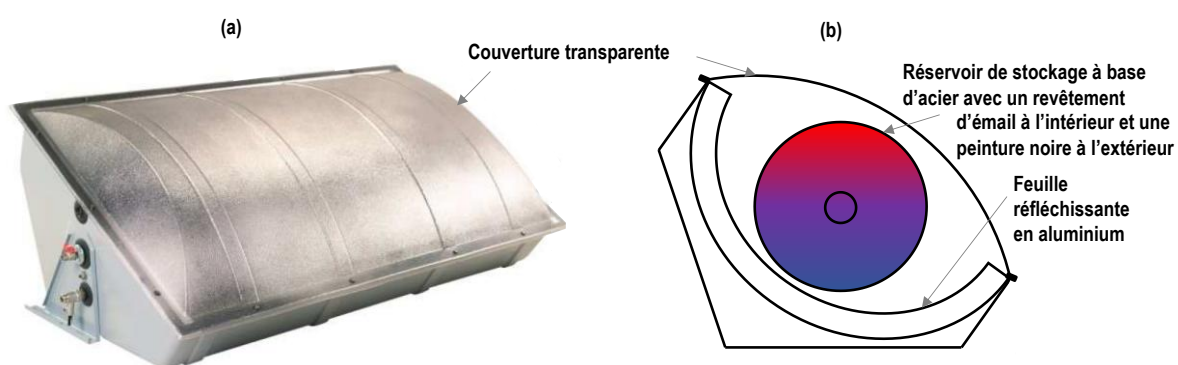


Figure 16. CES autostokeur SUNECS et (b) sa section transversale (adapté des Réf. [160,161]).

Les caractéristiques du système et les détails techniques sont présentés dans le Tableau 6. Les paramètres caractéristiques du capteur (rendement optique et les coefficients de pertes thermiques sont inconnus et le fabricant ne les a pas fournis).

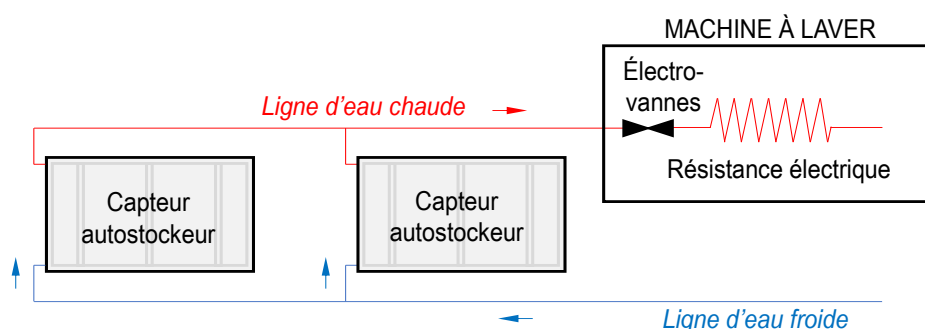


Figure 17. CES et principaux composants de surveillance sur le mur du bâtiment de la buanderie

Tableau 6. Caractéristiques techniques et coût du CES installé à la buanderie de l'hôpital à Ouagadougou [160,161]

Année d'installation	2017
Technologie	Autostokeur
Fabriqueur	Sunerg Solar
Marque	Suneco
Inclinaison du capteur	35°
Nombre de capteurs	2
Surface de l'absorbeur	2,8 m ² (2 × 1,4 m ²)
Surface d'ouverture	3,2 m ² (2 × 1,6 m ²)
Capacité	260 L (2 × 130 L ^a)
Système d'appoint	Electrique (non branché)
Coût du système	1 705 488 F CFA (2 × 1300 €)

^a Capacité totale en volume indiquée sur la plaque signalétique du CES (un peu différente de celle de 135 L indiquée dans les catalogues [160,161])

Le CES est fixé sur le mur sud du bâtiment de la buanderie, orientée plein sud (Figure 18), assurant une exposition solaire directe sans ombrage, même entre le 23 avril et le 21 août (jours du passage au zénith), lorsque le soleil se trouve au « nord » de la latitude de Ouagadougou. La sortie CES est directement connectée aux machines à laver, ce qui permet l'entrée de l'eau via une électrovanne (Figure 18). Ensuite, la résistance électrique dans la machine à laver élève la température de l'eau à la température de lavage souhaitée, lorsque cela est nécessaire. Le système est alimenté par la pression du réseau d'eau de l'hôpital, qui fonctionne avec un forage. Il faut noter la connexion en parallèle des deux unités (capteurs) du CES est faite d'une manière qui ne favorise pas un équilibre hydraulique optimal : une connexion de Tichelmann pourrait améliorer la répartition de l'eau entre les unités pour une efficacité accrue.

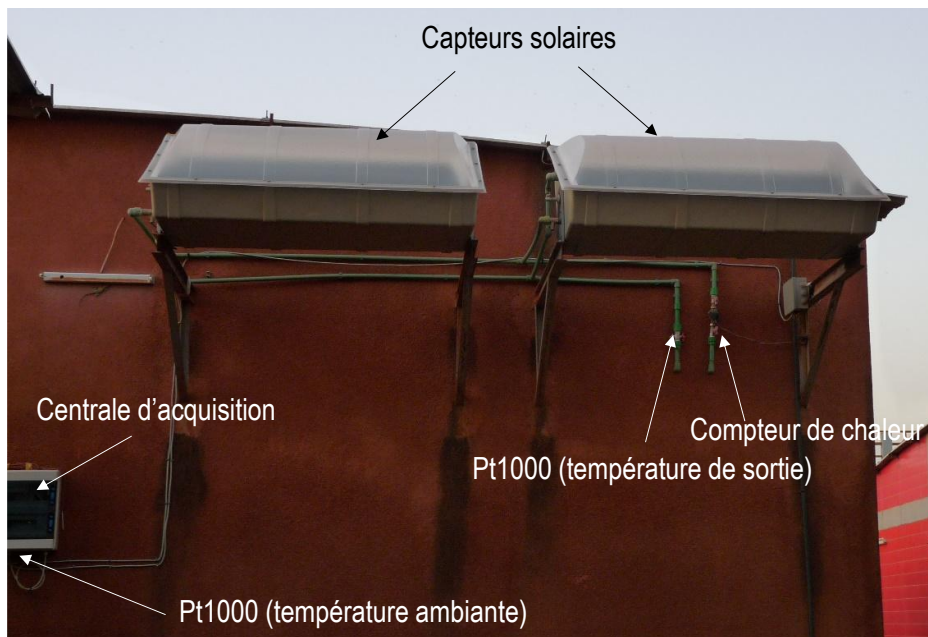


Figure 18. CES et principaux composants du suivi sur le mur du bâtiment de la buanderie à l'hôpital.

II.1.2. Chauffe-eau solaire à capteurs plans : utilisation dans un hôtel à Ouagadougou

Le CES suivi ici est installé à la Résidence Alice, un hôtel 3 étoiles à Ouagadougou. Les hôtels trois étoiles sont, de loin, la catégorie d'hôtels la plus répandue au Burkina Faso [162]. La fréquentation de l'hôtel s'aligne sur les tendances générales du secteur touristique du Burkina Faso, qui présentent des fluctuations minimales tout au long de l'année, avec toutefois une légère augmentation à la fin de la saison des pluies (octobre) et pendant les mois les plus froids (novembre-février) et une diminution pendant la saison des pluies (juin-septembre) [163,164]. Principalement destinée à la baignade des clients, l'eau de ce système n'est pas utilisée à des fins de blanchisserie ou de cuisine au sein de l'hôtel.

Bien que l'hôtel soit équipé de plusieurs CES du type thermosiphon, tous équipés de capteurs plans, y compris des modèles fabriqués localement, notre suivi s'est concentré sur l'évaluation des performances d'un système à thermosiphon importé équipé d'un absorbeur hautement sélectif (Tableau 7). Ce système est certifié Solar Keymark, ce qui atteste de sa conformité aux normes les plus strictes du domaine. Le CES est indirect, avec l'eau chaude sanitaire (utilisateur) chauffée instantanément à partir de l'échangeur de chaleur intégré dans le réservoir de stockage (Figure 19 c). L'eau du circuit primaire (côté capteur) est donc celle qu'il y a dans le réservoir de stockage. Ainsi, l'eau domestique étant chauffée instantanément, les légionelles et autres bactéries ne se développent pas dans l'eau de l'utilisateur. Le CES système fournit de l'eau chaude à huit chambres de l'hôtel.

Tableau 7. Caractéristiques techniques et coût du CES installé dans l'hôtel à Ouagadougou [165,166]

Année d'installation	2018
Capacité de stockage	164 L
Technologie	Capteur plan
Surface brute	2,42 m ²
Surface d'ouverture	2,27 m ²
Rendement optique	0,726
Coefficient de perte thermique linéaire (a_1)	3,74 W·m ⁻² ·K ⁻¹
Coefficient de perte thermique quadratique (a_2)	0,006 W·m ⁻² ·K ⁻²
Référence du capteur	Wunder ALS2512
Référence du réservoir de stockage	TSM 200
Fabriquant	Solimpeks
Inclinaison du capteur	18°
Orientation du capteur	Sud-ouest (35°)
Système d'appoint	Electrique (non branché)
Coût du système (y compris installation)	650 000 F CFA

Le CES est installé sur le toit-terrasse de l'hôtel (12°20'6,54"N, 1°29'56,53"W), avec la même orientation générale que le bâtiment, c'est-à-dire orienté vers le sud-ouest (orientation = 35°). Située à environ 5 m sur le côté est du système, une antenne de télécommunication d'une hauteur de 10 m présente un risque d'ombrage, en particulier pendant les périodes matinales et selon la période de l'année. Du côté ouest, une enseigne d'hôtel (Figure 19 a), placée à côté du système à une distance de 50 cm, peut induire des ombres dans l'après-midi, selon la période de l'année.

Il convient de noter qu'il y a eu une baisse d'activité au cours en 2020/2021 à cause de divers défis rencontrés par le secteur du tourisme, notamment les crises sanitaires (COVID-19) et sécuritaires.



Figure 19. (a) CES suivi dans l'hôtel à Ouagadougou (nettoyé), (b) recouvert de poussière, et (c) vue éclatée du réservoir.

II.2. Installations domestiques individuelles

II.2.1. Chauffe-eau solaire à tubes sous vide : cas d'un ménage à Lomé

Le CES se situe dans une maison unifamiliale dans la commune du Golfe 2, près de l'aéroport international Gnassingbé Eyadéma (à 200 m de la clôture de l'aéroport et à 2,5 km du terminal). Le ménage se compose de quatre adultes et d'un enfant de 10 ans (en 2022). Le CES alimente trois douches dont une seule est équipée d'un mitigeur, robinet doté d'une seule poignée ou levier qui permet de contrôler à la fois le débit et la température de l'eau au point de puisage.

Au niveau des variations de présence, la famille a signalé que deux adultes ont voyagé à la fin janvier 2023 et au début de décembre 2023, laissant la maison avec trois adultes et un enfant pendant ces périodes, car un autre adulte est venu séjourner sur place. De mai à juin 2023, trois adultes supplémentaires ont été séjourné dans la maison.

Le CES est à tubes sous vide direct (TSVD) c'est-à-dire que l'eau circule directement dans les tubes pour être chauffée, et non via un échangeur thermique. Le CES est installé sur le toit du deuxième étage, à environ 10 m au-dessus du sol, orienté plein sud, un emplacement choisi pour éviter les effets d'ombrage (Figure 20). La pente initiale du système CES à tube sous vide est de 45° , mais en raison de la configuration du toit, le cadre a été ajusté pour limiter l'inclinaison après installation. Ainsi, la pente finale du système est de 35° . Le CES est alimenté directement par l'eau du réseau public, assurant ainsi une pression stable. Les caractéristiques du CES sont présentées au Tableau 8.

Le coût d'installation comprend la main-d'œuvre de l'installateur mais également les achats divers (tuyauteries, raccords, etc.) nécessaires à la mise en place du CES.



Figure 20. CES installé sur le toit du ménage à Lomé.

Tableau 8. Caractéristiques techniques et coût du CES installé dans le ménage à Lomé [167]

Année d'installation	Novembre 2020
Technologie	Capteur à tube sous vide
Fabriquante	EJAI ECOSUN SOLAR GROUP
Référence du capteur	Zjecosun YYJ-R012-15
Nombre de tubes	15
Diamètre extérieur d'un tube	58 mm
Longueur d'un tube	1800 mm
Surface d'ouverture	1,57 m ² ^a
Rendement optique des tubes	> 0,75~0,78 ^b
Coefficient de perte de chaleur des tubes	< 5 W·m ² ·K ⁻¹ ^b
Capacité de stockage	150 L
Diamètre du réservoir	360/460 mm
Isolation du réservoir	Polyuréthane, 50 mm d'épaisseur
Matériau du réservoir intérieur	Acier inoxydable
Matériau du réservoir extérieur	Acier galvanisé
Inclinaison du capteur	35°, plein sud
Système d'appoint	Aucun
Coût d'achat du CES système	400 000 F CFA
Coût d'installation	102 000 F CFA

^a Calculé comme le produit du diamètre extérieur par la longueur et le nombre de tubes.

^b Information fournie sur notre demande par le fabricant.

II.2.2. Chauffe-eau solaire à capteurs plans : cas d'un ménage à Ouagadougou

Cette installation est située dans le quartier de la Patte d'Oie, dans la partie sud de la ville de Ouagadougou, le long de la route de Léo, à proximité de l'aéroport international et de la rocade sud-est du Boulevard des Tansoba. Il s'agit d'une maison familiale individuelle abritant six personnes, tous âgés de plus de 12 ans.

Le CES à capteur plan (Figure 21) est indirect, le réservoir étant double-enveloppe, avec l'eau chaude sanitaire à l'intérieur du ballon et le caloporteur (primaire) circulant dans l'enveloppe. Le système est également équipé d'un appoint électrique raccordé au réseau électrique uniquement durant la saison froide (et programmé à l'aide d'une minuterie) pour garantir ainsi un approvisionnement continu en eau chaude. L'eau chaude produite alimente directement trois douches et un robinet extérieur, utilisés pour les besoins du ménage, notamment pour les douches et la lessive. Le descriptif du CES est résumé dans le Tableau 9.



Figure 21. CES installé sur le toit du ménage à Ouagadougou.

Tableau 9. Caractéristiques techniques et coût du CES installé dans le ménage à Ouagadougou [168].

Année d'installation	2018
Technologie	Capteur plan
Fabriquant	ARISTON
Référence	Kairos Thermo GR 200/1 TR
Nombre de capteur	1
Surface brute	2 m ²
Surface nette d'absorption	1,82 m ²

Matériau de l'absorbeur du capteur	Aluminium
Matériau du tube absorbant	Cuivre
Isolation capteur	Laine de verre
Capacité de stockage	190 L
Isolation du réservoir	Polyuréthane, 50 mm d'épaisseur
Matériau du réservoir	Acier émaillé au verre (DIN 4753-3)
Système d'appoint	Électrique (utilisée en saison froide)
Puissance électrique de l'appoint	2 kW
Angle d'inclinaison du capteur	20 °
Coût d'achat du CES	400 000 F CFA
Coût d'installation	125 000 F CFA

III. MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE

III.1. Instrumentation et collecte de données

L'évaluation des performances des CES solaire a impliqué l'utilisation d'une gamme d'instruments et d'équipements de surveillance pour recueillir des données et informations essentielles. Sur chaque site, un compteur de chaleur avec capteur de débit à ultrasons a été utilisé pour mesurer la production thermique du CES ainsi que la consommation d'eau chaude (Tableau 10). Ce compteur (Tableau 11) comprend principalement un débitmètre et deux capteurs de température appairés (Pt1000) : l'un intégré au débitmètre et l'autre placé sur la ligne de retour du fluide de manière à pouvoir mesurer les températures à l'entrée et à la sortie du réservoir de stockage (Figure 22). Ainsi, le calculateur du compteur fournit des valeurs comme les températures d'entrée et de sortie, le débit, le volume total d'eau, la puissance thermique et l'énergie totale fournie. Les spécifications des compteurs de chaleur utilisés sont données au Tableau 11. En plus du circuit de l'ECS (utilisateur), les mêmes mesures ont été également faites sur le circuit primaire (entrée et sortie du capteur solaire) pour le site de l'hôtel.

Pour évaluer le rendement thermique des systèmes à Ouagadougou, les données d'irradiation globale horizontale mesurées sur notre campus (12,3795; -1,5026) ont été utilisées. Ce dernier est situé respectivement à environ 1,6 km, 5,3 km et 5,8 km des CES de l'hôpital, de l'hôtel et du ménage. Les données d'irradiation n'étaient pas disponibles pour les trois derniers mois de 2023 sur cette station. En conséquence, pour l'étude du CES de l'hôtel, les données mesurées en octobre, novembre et décembre 2022 ont été reconduits pour les mois correspondants en

2023. Pour la ville de Lomé, les données fournies par la station météorologique de l'aéroport international de Lomé, située à environ 2 km du CES, ont été utilisées. L'irradiation sur le plan du capteur a été calculée avec RETScreen 4, utilisant l'algorithme de Klein et Theilacker [29], tel que décrit dans *Solar Engineering of Thermal Processes* [172].

Tableau 10 : Grandeurs mesurées et matériels utilisés.

Grandeur mesurée	Buanderie de l'hôpital	Hôtel à Ouagadougou	Ménage de Lomé	Ménage de Ouagadougou
Energie thermique, Température d'entrée et de sortie de l'ECS, Débit et volume de l'ECS utilisé	Compteur d'énergie thermique avec capteur de débit à ultrasons Zelsius® C5-IUF : Zenner 2,5 L [169]	Compteur d'énergie thermique avec capteur de débit à ultrasons Zelsius® C5-IUF : Zenner 1,5 L [169]		Compteur d'énergie thermique avec capteur de débit à ultrasons MULTICAL® 403 de Kamstrup [170]
Energie thermique, Température d'entrée et de sortie du capteur, Débit et volume de l'ECS utilisé	-	Compteur d'énergie thermique avec capteur de débit à ultrasons Zelsius® C5-IUF : Zenner 1,5 L [169]	-	-
Température ambiante	Pt1000, classe DIN B, tolérance de mesure : 0,55 °C			
Irradiation globale horizontale	Pyranomètre - LP02 [171] avec bras de montage de l'amplificateur. Station météorologique ADCON Telemetry Plage d'irradiance : 0...2000 W/m ² Plage spectrale : 285...3000 nm			(Centrale météorologique de l'aéroport international de Lomé)
Energie électrique	-	-	-	Sinotimer DDS578R 3 phases 4 fils IEC62053-21 DDS024MR 3x230/400V 3x5(80) A 50 Hz

Tableau 11 : Spécification des compteurs de chaleur utilisés.

Modèle	Grandeur mesurée	Spécifications
Compteur d'énergie thermique avec capteur de débit à ultrasons Zelsius® C5-IUF Zenner 2,5 L [169]	Température d'entrée de l'ECS	Pt 1000
	Température de sortie de l'ECS	Plage : 0...150 °C Résolution : 0,01 °C
	Débit	Nominal : 2,5 m³/h Min : 0,025 m³/h Max : 5 m³/h Plage : 0...130 °C
	Energie thermique	Classe métrologique 2 conformément à la directive européenne sur les instruments de mesure MID 2014/32/EU.
Compteur d'énergie thermique avec capteur de débit à ultrasons Zelsius® C5-IUF Zenner 1,5 L [169]	Température d'entrée de l'ECS	Pt 1000
	Température de sortie de l'ECS	Plage : 0...150 °C Résolution : 0,01 °C
	Débit	Nominal : 1,5 m³/h Min : 0,015 m³/h Max : 3 m³/h Plage : 0...130 °C
	Energie thermique	Classe métrologique 2 conformément à la directive européenne sur les instruments de mesure MID 2014/32/EU.
Compteur d'énergie thermique avec capteur de débit à ultrasons MULTICAL® 403 de Kamstrup [170]	Température d'entrée de l'ECS	Pt500
	Température de sortie de l'ECS	Plage : 0...180 °C Résolution : 0,01 °C
	Débit	Nominal : 1,5 m³/h Min : 0,015 m³/h Max : 3 m³/h Plage : 0...130 °C
	Energie thermique	MID EN 1434:2007 et EN 1434:2015

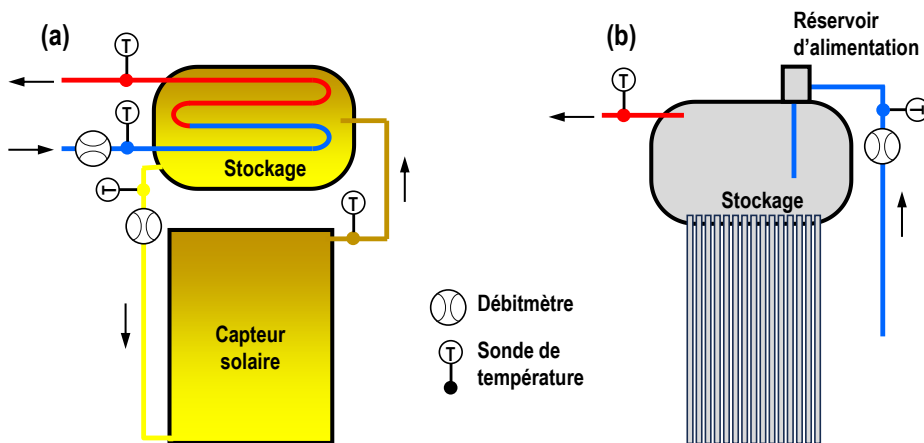


Figure 22. Mise en place des éléments du compteur de chaleur : exemple (a) du CES à l'hôtel à Ouagadougou et (b) dans le ménage à Lomé.

Sur chaque site, un système d'acquisition de données a été employé pour collecter, traiter et enregistrer les données générées par les différents capteurs et instruments. Pour tous les sites, les données ont été collectées pendant au moins une année (Tableau 12).

Les variations de température ambiante ont été suivies en continu à l'aide d'un capteur Pt1000.

Tableau 12. Période de suivi des installations

Site	Période de suivi des données analysées	Pas de temps des données	Observations
Buanderie de l'hôpital	13 avril 2022 au 12 avril 2023	▪ 13 avril 2022 au 15 février 2023 : 5 min ▪ 15 février 2023 au 12 avril 2023 : 1 min	Les valeurs d'irradiation n'étaient pas disponibles pour les trois derniers mois de 2023 ; par conséquent, les données d'irradiation mesurées en octobre, novembre et décembre 2022 ont été reconduites pour les mois correspondants de 2023.

Site	Période de suivi des données analysées	Pas de temps des données	Observations
Hôtel	1 ^{er} janvier 2020 au 31 décembre 2023	Mensuel : Les compteurs mémorisent les valeurs cumulées de l'eau consommée et de la chaleur fournie, mois par mois, sur plusieurs années.	Une mesure initiale a été faite sur la période du 1 ^{er} août 2018 au 27 janvier 2019, avec un pas de temps de 5 min.
Ménage à Ouagadougou	à 1 ^{er} octobre 2023 au 30 septembre 2024	Mensuel : Les compteurs mémorisent les valeurs cumulées de l'eau consommée et de la chaleur fournie, mois par mois	La consommation électrique a été relevée de janvier à mars 2024, la résistance électrique ayant été branchée durant cette période.
Ménage à Lomé	1 ^{er} janvier au 31 décembre 2023	▪ 1^{er} janvier au 15 février 2023: 5 min 15 février 2023 au 31 décembre 2023: 1 min	-

Le pas de temps de mesure a été ramenée à une minute sur tous les sites, à l'exception de l'hôtel, à partir du 15 février 2023 afin d'avoir des données de résolution plus grande. Ce besoin d'une meilleure résolution résulte d'un problème observé sur le site de l'hôpital à Ouagadougou. Après les six premiers mois de suivi, l'analyse préliminaire du débit enregistré suggère qu'une

certaines quantités d'eau est toujours admise dans les collecteurs lorsque la buanderie est fermée, notamment la nuit. La quantité quotidienne d'eau correspondante est toutefois limitée (environ $0,001 \text{ m}^3$, à comparer à une consommation quotidienne d'eau d'environ 1 m^3). Cela peut être principalement expliqué par le fait qu'à la nuit tombée, la température de l'eau dans le CES diminue, ce qui implique une réduction du volume et donc une admission d'eau. La possibilité de fuites a été écartée après une inspection minutieuse de l'installation. Nous avons alors échangé les positions du compteur de chaleur et de la sonde de température à la sortie : le compteur de chaleur a été déplacé sur la ligne chaude et la sonde de température à la sortie a été déplacée sur la ligne froide. Ce changement a quelques implications : (i) l'ancien capteur de température à la sortie mesure désormais la température d'entrée de l'eau ; (ii) le débit mesuré correspond désormais au débit (instantané) d'eau utilisée par la buanderie. Il n'y a plus de flux la nuit ; (iii) la valeur de la puissance affichée par le compteur de chaleur est négative, et l'énergie correspondante durant l'intervalle de temps n'est pas ajoutée à la consommation totale de chaleur, car le compteur de chaleur utilisé ne cumule que les valeurs d'énergie positive. Ainsi, pour la période correspondante, l'énergie fournie par le système à la buanderie est obtenue comme présenté dans la Section III.2. L'intervalle de temps a été changé à 60 s pour une meilleure résolution sur la mesure du débit.

III.2. Évaluation des performances énergétiques

L'énergie totale fournie par le CES pour toute période, ainsi que la consommation d'eau, sont facilement intégrées et fournies par le compteur de chaleur dont les sorties sont enregistrées sur les centrales d'acquisition. Entre deux instants donnés donc, on peut retrouver la quantité d'eau ayant circulé de même que la quantité de chaleur fournie. L'analyse énergétique s'est donc principalement fondée sur les valeurs d'énergie relevées directement par le compteur de chaleur.

Cependant, dans le cas particulier de l'installation de l'hôpital, une partie de l'énergie a dû être calculée spécifiquement en raison du changement d'emplacement du débitmètre à la fin des six premiers mois de mesure, comme expliqué à la section précédente. Pour cette installation et la période en question (six derniers mois), l'énergie fournie a été obtenue en sommant les quantités de chaleur échangées, mesurées entre la sortie et l'entrée du CES au cours des intervalles de temps de mesure (1):

$$Q_u = \sum_{t_i}^{t_f} m \cdot C \cdot (T_{cs} - T_{ce}) \quad (1)$$

où m est la quantité d'eau fournie à la buanderie entre deux instants t_f et t_i , C la capacité thermique massique de l'eau, T_{cs} et T_{ce} les températures de sortie et d'entrée de l'eau dans le CES, respectivement. L'équation (1) est appliquée lorsque $T_{cs} > T_{ce}$.

Cette approche s'est révélée cohérente avec les données collectées au cours du premier semestre et intégrées par le compteur de chaleur.

La production solaire spécifique (SSY) est définie comme le rapport entre l'énergie totale fournie par le CES et la surface d'ouverture du capteur solaire A (2) :

$$SSY = \frac{Q_u}{A} \quad (2)$$

Dans l'Équation (2), nous n'avons pas pris en compte les variations d'énergie interne dans le réservoir de stockage car aucune sonde de température n'y était installée. Cependant, pour de courtes périodes avec des variations de température significatives, ces variations d'énergie interne ne peuvent être considérées comme négligeables. Néanmoins, en raison de la capacité totale relativement faible des réservoirs de stockage comparée aux consommations mensuelles d'eau et de la faible variation de température à la sortie des CES d'un jour à l'autre, il est raisonnable d'estimer le rendement du CES et la fraction solaire pour des périodes mensuelles complètes en négligeant la variation d'énergie interne du réservoir. Ainsi, le rendement du capteur solaire sur une période donnée (entre t_f et t_i) est déterminé en rapportant l'énergie totale fournie Q_s par le capteur solaire sur cette période à l'irradiation solaire reçue dans le plan du capteur solaire sur la même période (3) :

$$\eta_{sol} = \frac{Q_s}{A \cdot \sum_{t_i}^{t_f} I} \quad (3)$$

De même, le rendement global du CES pour une période donnée peut être obtenue par l'Equation (4) :

$$\eta_{sys} = \frac{Q_u}{A \cdot \sum_{t_i}^{t_f} I} = \frac{SSY}{\sum_{t_i}^{t_f} I} \quad (4)$$

Ce dernier rendement ne prend pas en compte les pertes thermiques entre la sortie du réservoir de stockage et le point final de consommation.

Contrairement aux autres installations, il est possible d'estimer facilement le taux de couverture solaire pour la buanderie de l'hôpital. En effet, en connaissant le volume d'eau utilisé, la température de l'eau froide (T_{ce}) et la température cible pour l'application ($T_{ref} = 60\text{ °C}$), la demande nette en chaleur peut être calculée à l'aide de l'équation (5) :

$$Q_{DHW} = \sum_{t_i}^{t_f} m \cdot C \cdot (T_{ref} - T_{ce}) \quad (5)$$

L'énergie électrique nette à apporter par les résistances électriques dans les machines à laver est (6):

$$Q_{aux} = \begin{cases} \sum_{t_i}^{t_f} m \cdot C \cdot (T_{ref} - T_{cs}) , & T_{cs} < T_{ref} \\ 0, & T_{cs} \geq T_{ref} \end{cases} \quad (6)$$

Q_{aux} représente l'électricité minimale requise pour satisfaire les besoins en chaleur, représente l'électricité minimale nécessaire pour combler les besoins en chaleur, sans tenir compte des pertes thermiques. Le taux de couverture solaire f , défini comme la part des besoins en chaleur couverts par le CES, peut alors être exprimée par (7):

$$f = \frac{Q_u}{Q_{DHW}} = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_{DHW}} \quad (7)$$

III.3. Évaluation des performances économiques

III.3.1. Principes généraux

Les études utilisent couramment diverses méthodes économiques pour évaluer la viabilité économique des CES. La méthode la plus couramment utilisée est celle du temps de retour sur investissement [124,135,142,173]. D'autres approches prennent en compte la valeur temporelle de l'argent, comme l'illustre la méthode de la valeur actuelle nette (VAN) [124,135,174–176] temps de retour sur investissement actualisé [142]. Dans le cadre de cette étude, le temps de retour sur investissement et le temps de retour sur investissement actualisé sont utilisés.

Le temps de retour sur investissement est défini comme la dépense en capital supplémentaire ΔC_0 nécessaire pour passer au design amélioré par rapport au système de référence, divisée par les économies moyennes annuelles réalisées grâce au système amélioré S (8):

$$SPP = \frac{\Delta C_0}{S} \quad (8)$$

Ces économies résultent d'une réduction de la consommation d'énergie conventionnelle par rapport au chauffe-eau auxiliaire associé au système amélioré, en comparaison avec celui du système de référence.

Dans le cas où les flux de trésorerie annuels (qui, dans ce cas, représentent les économies) varient d'une année à l'autre, le temps de retour sur investissement peut être calculée en cumulant les flux de trésorerie susmentionnés jusqu'à ce que le total dépasse le montant de l'investissement initial. Pour la dernière année, seule la proportion du flux de trésorerie nécessaire pour rembourser entièrement l'investissement initial est prise en compte.

La VAN est calculée comme la valeur actuelle des flux de trésorerie nets anticipés (CF_t) générés par un investissement, moins le coût initial en capital ΔC_0 sur toute la durée de vie (n) de l'investissement. (9):

$$VAN = -\Delta C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (9)$$

Le temps de retour sur investissement actualisé est le temps nécessaire pour récupérer l'investissement initial en capital sur la base de la valeur actuelle. Le temps de retour sur investissement actualisé peut être trouvé en résolvant $VAN = 0$:

$$DPP = n \text{ quand } VAN = 0 \quad (10)$$

Pour un flux de trésorerie annuel constant $CF = S$ et sans valeur de récupération, le temps de retour actualisé peut être déduite comme suit (11):

$$DPP = -\frac{\ln\left(1 - \frac{\Delta C_0 \cdot i}{S}\right)}{\ln(1+i)} \quad (11)$$

De l'équation (11), on peut constater que, pour obtenir une période de récupération actualisée finie, le flux de trésorerie annuel doit être supérieur au produit du coût en capital supplémentaire ΔC_0 et du taux d'actualisation i .

Pour les flux de trésorerie irréguliers, l'équation (10) peut être résolue par une procédure itérative de tâtonnements. Dans le cas particulier où les économies annuelles prennent deux valeurs constantes différentes avant d'atteindre temps de retour sur investissement actualisé soit S_1 jusqu'à l'année m et S_2 par la suite, on peut démontrer que le temps de retour sur investissement actualisé peut être obtenu par l'équation (12) [177]:

$$DPP = m - \frac{\ln \left[1 - \frac{\Delta C_0}{S_2} \cdot i \cdot (1+i)^m + \frac{S_1}{S_2} \cdot ((1+i)^m - 1) \right]}{\ln(1+i)} \quad (12)$$

III.3.2. Analyse des cas d'étude et scénarios économiques

Le Tableau 13 récapitule les informations économiques liées à l'évaluation des CES dans quatre installations, notamment les coûts d'investissement initiaux ainsi que les tarifs de l'électricité appliqués dans chaque cas. Pour le système de référence pour l'analyse économique, l'électricité est privilégiée dans les installations tertiaires, tandis que pour les installations domestiques, trois options énergétiques, électricité, charbon de bois et gaz sont considérées. Les scénarios d'évaluation économiques sont ainsi définis pour chaque installation, permettant de comparer les économies potentielles en fonction des conditions spécifiques de chaque site. Les coûts d'exploitation et de maintenance sont négligeables, car le système thermosiphon nécessite pratiquement aucune maintenance.

Tableau 13. Récapitulatif des coûts et scénarios d'évaluation économique des CES.

Critère	Buanderie de l'hôpital	Hôtel	Ménage à Ouagadougou	Ménage à Lomé
Coût initial	1 967 871 FCFA (achat : 1 705 488 FCF A, transport : 262 383 FCFA)	650 000 FCF A	525 000 FCFA (achat : 400 000 FCFA ; installation, mise en service : 125 000 FCF A)	502 000 FCFA (achat : 400 000 FCFA ; installation, mise en service : 102 000 FCF A)
Coûts d'opération et maintenance	Négligés	Négligés	Négligés	Négligés
Tarif de l'électricité	Avant oct. 2023 : 94 FCFA/kWh Après oct. 2023 : 64 FCFA/kWh	159 FCFA/kWh	100 FCFA/kWh	139,52 FCFA/kWh
Scénarios d'évaluation	1 Tarif d'électricité : 94 FCFA/kWh	Moyenne des économies d'énergie sur 2020–2023 : 769 kWh/an	Référence : chauffe-eau électrique Coût : 170 000 FCFA Tarif d'électricité : 100 FCFA/kWh	Référence : chauffe-eau électrique Coût : 150 000 FCFA Tarif d'électricité : 139,52 FCFA/kWh

Critère		Buanderie de l'hôpital	Hôtel	Ménage à Ouagadougou	Ménage à Lomé
	2	Tarif d'électricité : 64 FCFA/kWh	Moyenne des économies d'énergie sur 2022–2023 : 785 kWh/an	Référence : chauffage au gaz Coût du gaz : 53 FCFA/kWh	Référence : chauffage au gaz Coût du gaz : 95 FCFA/kWh
	3	Tarif d'électricité : Avant oct. 2023 : 94 FCFA/kWh Après oct. 2023 : 64 FCFA/kWh	Économies mesurées (2020 : 830 kWh ; 2021 : 674 kWh ; 2022 : 719 kWh ; 2023 : 851 kWh) + moyenne sur 2020–2023 pour les années suivante (769 kWh/an)	Référence : chauffage au gaz Coût du charbon de bois : 85 FCFA/kWh	Référence : chauffage au gaz Coût du charbon de bois : 75 FCFA/kWh

Buanderie d'hôpital

Pour la buanderie de l'hôpital, le coût supplémentaire en capital correspond au coût de la mise en œuvre du CES, puisque la source de chaleur conventionnelle est une résistance électrique déjà livrée avec les machines à laver. Nous n'avons pas pu obtenir le coût total du CES et nous l'avons estimé de la manière suivante. La plaque signalétique des CES indique une date de fabrication en septembre 2016. Le système a été directement importé par l'hôpital et installé en 2017. Le catalogue de cette période mentionne un prix de 1 300 € par système [160,161], soit 2 600 € (1 705 488 FCFA) pour les deux CES. Compte tenu de l'exemption des droits d'importation pour les systèmes solaires au Burkina Faso (Tableau 1), seuls les frais de transport doivent être pris en compte. Une bonne estimation est de 300 000 FCFA), basée sur le volume du système. Ainsi, le coût total du système, y compris l'installation, s'élève à environ

2 000 000 FCFA (Tableau 13). Les économies économiques annuelles S correspondent aux économies d'énergie annuelles multipliées par le coût unitaire de l'énergie. Les économies d'énergie annuelles sont obtenues à partir du suivi effectué.

Pour le coût unitaire d'énergie, il faut noter que le tarif de l'électricité au Burkina Faso est resté inchangé depuis 2006. Cependant, de légers ajustements ont été introduits en octobre 2023 [178], ciblant principalement les grands consommateurs, ce qui impacte directement l'hôpital. En particulier, le tarif des heures de pointe (139 FCFA/kWh) a désormais été déplacé la nuit (de 17 h à 00 h), et le tarif des heures creuses (64 FCFA/kWh) s'applique de 00 h à 17 h. Comme la buanderie fonctionne pendant la journée, il est raisonnable, au moins depuis octobre 2023, de considérer 64 FCFA/kWh comme un coût pertinent pour analyser les économies réalisées grâce au CES. Cependant, comme ce changement tarifaire est intervenu cinq ans après la mise en service du CES, il peut être utile de considérer le tarif moyen pondéré de l'électricité en journée avant octobre 2023, qui est de 94 FCFA/kWh. Trois scénarios distincts peuvent alors être envisagés (Tableau 13) :

- Scénario 1 : évaluation économique de la viabilité du système basée sur le coût à la date de l'installation du système. Cela fournit des informations sur les attentes économiques initiales.
- Scénario 2 : évaluation économique de la viabilité du système basée sur le coût actuel de l'électricité. Compte tenu des changements tarifaires, ce scénario reflète le contexte opérationnel actuel du CES.
- Scénario 3 : évaluation économique de la viabilité du système en prenant en compte les informations disponibles, considérant les cinq premières années de fonctionnement et en supposant que le tarif actuel de l'électricité perdurera au moins jusqu'à la fin de la période de récupération. Ce scénario offre une projection basée sur la compréhension actuelle des conditions opérationnelles et économiques.

Hôtel

En se basant sur les douze factures d'électricité de l'hôtel en 2023, le coût unitaire moyen de l'électricité est estimé à 159 FCFA/kWh. Le CES ayant été suivi sur une période de 4 ans (2020–2023), avec diverses perturbations ayant affecté les économies d'énergie au fil des années, la référence pour l'économie d'énergie annuelle à intégrer dans l'analyse économique a été déterminée selon trois scénarios, chacun reflétant un schéma distinct d'économies annuelles d'énergie :

- Scénario 1 : Les économies annuelles d'énergie sont uniformes et correspondent à la moyenne des quatre valeurs mesurées sur les quatre années de suivi (2020–2023).
- Scénario 2 : Les économies annuelles d'énergie sont uniformes et basées sur la moyenne des deux dernières années (2022 et 2023), considérant 2020 et 2021 comme atypiques en raison des restrictions liées au COVID-19 et à la réduction des activités hôtelières au premier semestre 2021.
- Scénario 3 : Les économies mesurées sur les quatre premières années sont utilisées, puis leur moyenne est considérée pour les années suivantes.

Ménage à Lomé

L'analyse économique a inclus trois scénarios, chacun reflétant une option couramment utilisée au Togo pour la production d'eau chaude sanitaire (Tableau 13) : l'utilisation d'un chauffe-eau électrique, le chauffage au gaz et le chauffage au charbon.

Scénario 1 : Pour le chauffe-eau électrique, un système de 100 L coûte environ 125 000 FCFA, avec 25 000 FCFA pour l'installation, soit au total 150 000 FCFA. Dans ce cas particulier donc, $\Delta C_0 = 502\,000 - 150\,000 = 352\,000$ FCFA. Avec un rendement supposé de 100 %, le coût de l'électricité est fixé à 139,52 FCFA/kWh tout tarif compris. Il s'agit du tarif prépayé unique utilisé par la Compagnie Energie Electrique du Togo (CEET).

Scénario 2 : Pour le chauffage au gaz, une bouteille de 12,5 kg coûte 9875 FCFA, fournissant 160 kWh d'énergie thermique en se basant sur le PCI du butane (12,8 kWh/kg). Un rendement de 65% pour les réchauds à gaz conduit à un coût d'environ 95 FCFA/kWh.

Scénario 3 : Pour le charbon, un sac de 50 kg à 7500 FCFA fournit 400 kWh d'énergie thermique, en se basant sur le PCI du charbon de bois (8 kWh/kg). Avec un rendement optimiste de 25% pour les foyers locaux, le coût est d'environ 75 FCFA/kWh. Il faut noter que le coût du charbon de bois varie au cours de l'année et la valeur admise ici est considérée comme une moyenne.

Ménage à Ouagadougou

L'approche utilisée pour le ménage à Lomé est la même adoptée pour le ménage à Ouaga. Les données sont contextualisées ainsi qu'il suit :

Le prix moyen du kWh est de 100 FCFA/kWh, calculé à partir des factures de septembre 2023 et janvier 2024

Pour le chauffe-eau électrique, un système de 100 L coûte environ 140 000 FCFA, avec 30 000 FCFA pour l'installation, soit au total 170 000 FCFA

Pour le chauffage au gaz, une bouteille de 12,5 kg coûte 5500 FCFA, un coût d'environ 53 FCFA/kWh.

Pour le charbon, un sac de 50 kg à 8500 FCFA soit un coût d'environ 85 FCFA/kWh.

Au Burkina Faso, un taux d'actualisation réel de 8 à 10 % est couramment utilisé dans les analyses économiques des projets d'énergie renouvelable, comme le mentionnent plusieurs études [43,67,179,180]. Cependant, des institutions internationales adoptent des approches divergentes. Par exemple, la Banque Africaine de Développement applique actuellement un taux de 12 % pour les projets d'énergies renouvelables dans la région du Sahel [181], tandis que la Banque Mondiale privilégie un taux plus modéré de 6 % [182]. Dans ce contexte, l'analyse menée pour le Burkina Faso s'appuie sur trois scénarios de taux d'actualisation : Faible (6 %), Moyen (8 %) et Élevé (12 %), afin de tenir compte de ces différentes approches et de mieux refléter les conditions locales et internationales.

Pour le Togo, les recommandations et pratiques financières varient légèrement. La Banque mondiale préconise un taux d'actualisation de 7 % pour les investissements à long terme [183]. Les indices financiers locaux, tels que les taux de rémunération des emprunts obligataires, affichent des taux compris entre 6 % et 6,25 %, tandis que les institutions bancaires appliquent généralement des taux de 8 % pour les prêts aux entreprises et de 7,5 % pour les prêts aux particuliers. Tenant compte de ces références, cette analyse adopte également trois scénarios de taux d'actualisation pour le Togo : Faible (6 %), Moyen (8 %) et Élevé (10 %). Ces scénarios visent à englober une gamme réaliste des conditions financières pouvant influencer les décisions d'investissement dans des projets d'énergies renouvelables dans le pays.

III.4. Évaluation des performances environnementales

L'émission de CO₂ évitée annuellement a été calculée en multipliant le facteur d'émission EF par la quantité d'énergie conventionnelle économisée grâce au système solaire sur l'année (13) :

$$GHG = EF \cdot Q_u / \eta_f \quad (13)$$

η_f est le rendement de conversion. Il est pris égal à 0,65 et 0,25, respectivement pour les foyers à gaz et au charbon. Pour l'électricité, le facteur de conversion thermique est supposé égal à 1,

et le facteur d'émission de l'électricité du réseau est supposée intégrer les pertes de transmission.

Le facteur d'émission adopté pour chaque contexte est présenté au Tableau 14.

Tableau 14. Facteurs d'émission de CO₂ adoptés par source d'énergie conventionnelle.

Energie conventionnelle	EF [kgCO ₂ /kWh]	Référence
Électricité au Burkina Faso	0,606	[184]
Électricité au Togo	0,21	[185]
Gaz	0,23	[186]
Charbon de bois	0,36	[186]

IV. CONCLUSIONS

Ce chapitre a présenté la typologie des systèmes de CES dans plusieurs contextes en Afrique de l'Ouest en se basant sur l'examen de quatre installations. La typologie des installations suivies illustre la diversité des contextes géographiques, fonctionnels et technologiques, offrant un panorama représentatif des usages possibles. Les caractéristiques techniques de chaque installation ont été documentées, et une méthodologie de collecte de données ainsi que de définition d'indicateurs a été développée pour évaluer les performances des systèmes en intégrant les aspects techniques, économiques et environnementaux dans ce contexte régional. Les principales lacunes et défis liés à l'instrumentation ont également été identifiés, apportant une compréhension approfondie des contraintes associées au suivi des CES. Ces bases méthodologiques établissent un cadre solide pour l'analyse approfondie des performances des systèmes, développée dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE 4. ANALYSE DES
PERFORMANCES
TECHNIQUES ET
ECONOMIQUES DES CHAUFFE-
EAU SOLAIRES THERMIQUES
DANS DES RÉGIONS HUMIDES
ET ARIDES D'AFRIQUE DE
L'OUEST**

I. INTRODUCTION

Ce chapitre présente une analyse détaillée des performances techniques et de la rentabilité économique de différentes installations solaires thermiques adaptées aux besoins résidentiels, hôteliers et hospitaliers en Afrique de l'Ouest, sur la base d'études in situ. Les performances de quatre installations ont été évaluées dans les conditions climatiques réelles du Burkina Faso et du Togo, en mettant l'accent sur le rendement, l'énergie produite et les températures de sortie de chaque installation. L'évaluation économique a intégré les spécificités des contextes locaux. Des scénarios variés ont été étudiés afin de déterminer la viabilité économique des systèmes, en utilisant des indicateurs tels que le temps de retour sur investissement et temps de retour sur investissement actualisé. Les impacts environnementaux ont également été analysés, notamment en termes d'émissions de CO₂ évitées grâce à l'adoption de cette technologie respectueuse de l'environnement. Ces résultats soulignent le rôle des politiques stratégique dans la transition énergétique régionale, offrant à la fois des avantages économiques et environnementaux significatifs pour les pays où les études ont été effectuées.

II. ANALYSE DES PERFORMANCES TECHNIQUES

II.1. Chauffe-eau solaire à capteurs autostockeurs dans la buanderie d'un hôpital à Ouagadougou

Durant l'année d'observation, l'analyse de la distribution du rayonnement solaire quotidien en plan horizontal, illustrée par la Figure 23, met en évidence une disponibilité solaire importante à Ouagadougou. Les résultats révèlent deux périodes de pic, toutes deux survenant pendant la saison sèche : en octobre et entre mars et mai (Figure 23a). Le potentiel le plus bas a été observé pendant le mois le plus pluvieux, en août. Cette tendance concorde avec les observations de Niang et al. [187], qui ont relevé des schémas mensuels similaires du potentiel solaire dans six stations sahéliennes réparties de l'ouest à l'est du Sahel. Environ 75 % des jours affichent des niveaux d'irradiation supérieurs à 5 kWh/m² par jour, ce qui témoigne d'une exposition solaire généreuse. Les valeurs moyennes et médianes du rayonnement solaire quotidien sont respectivement de 5,5 et 5,6 kWh/m², ce qui suggère une constance notable de l'énergie solaire tout au long de l'année. Par ailleurs, seuls 15 jours ont enregistré une irradiation inférieure à 3 kWh/m², reflétant la rareté des périodes de faible ensoleillement.

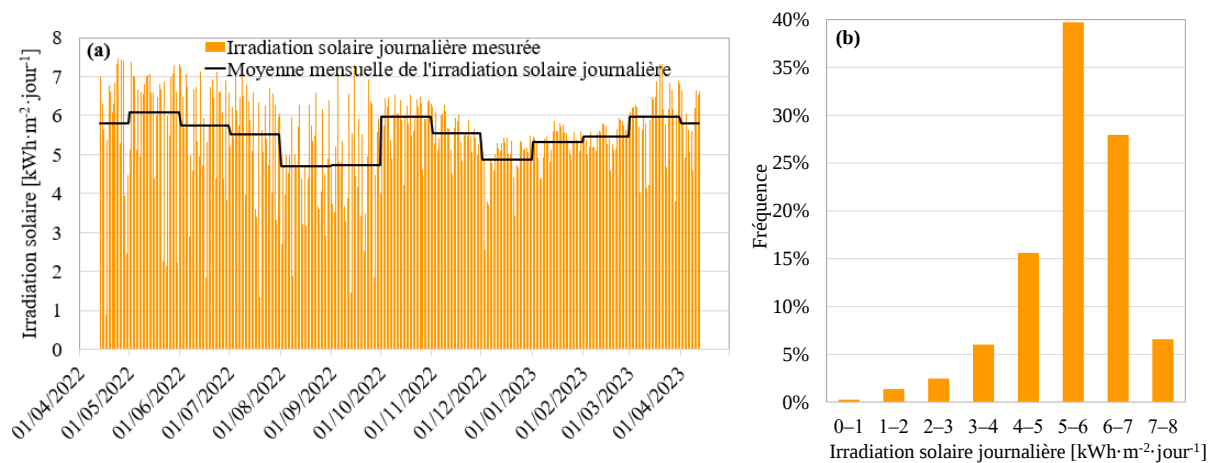


Figure 23. (a) Valeurs mesurées et (b) répartition de l'irradiation solaire journalière sur un plan horizontal à Ouagadougou (du 13 avril 2022 au 12 avril 2023).

L'irradiation solaire globale mensuelle sur un plan horizontal et les valeurs calculées pour un capteur incliné à 35° sont présentées à la Figure 24. De mars à septembre, l'énergie reçue dans le plan incliné du capteur est inférieure à celle du plan horizontal, l'inverse étant vrai pour le reste de l'année. Cela s'explique par le passage du soleil au nord de Ouagadougou entre fin avril et fin août, réduisant l'énergie sur un capteur orienté au sud. L'irradiation annuelle totale sur la surface inclinée est de 1937 kWh·m⁻², soit seulement 3 % de moins que les 2000 kWh·m⁻² sur le plan horizontal.

Il est présenté sur la Figure 25 une vue d'ensemble des variations de la température ambiante ainsi que des températures d'entrée et de sortie du CES sur une année complète d'observation. En raison de problèmes techniques rencontrés au niveau du système d'acquisition de données, les températures de la mi-novembre 2022 au début janvier 2023 n'ont pas pu être enregistrées. Toutefois, les quantités d'eau chaude et d'énergie produites par le CES ont pu être estimées grâce aux données directement cumulées par le compteur de chaleur, ce qui permet de pallier ces lacunes d'enregistrement. La Figure 25 présente l'intégralité des données de température ambiante disponibles, tandis que les températures d'entrée et de sortie ne sont affichées que lorsque des flux (débits) sont observés vers ou depuis le CES, évitant ainsi l'affichage de la température de l'eau froide ou chaude stockée dans les tuyaux lorsque le système est inactif. Une moyenne mobile (arithmétique) hebdomadaire de la température a également été ajoutée pour mieux mettre en évidence les tendances et variations quotidiennes.

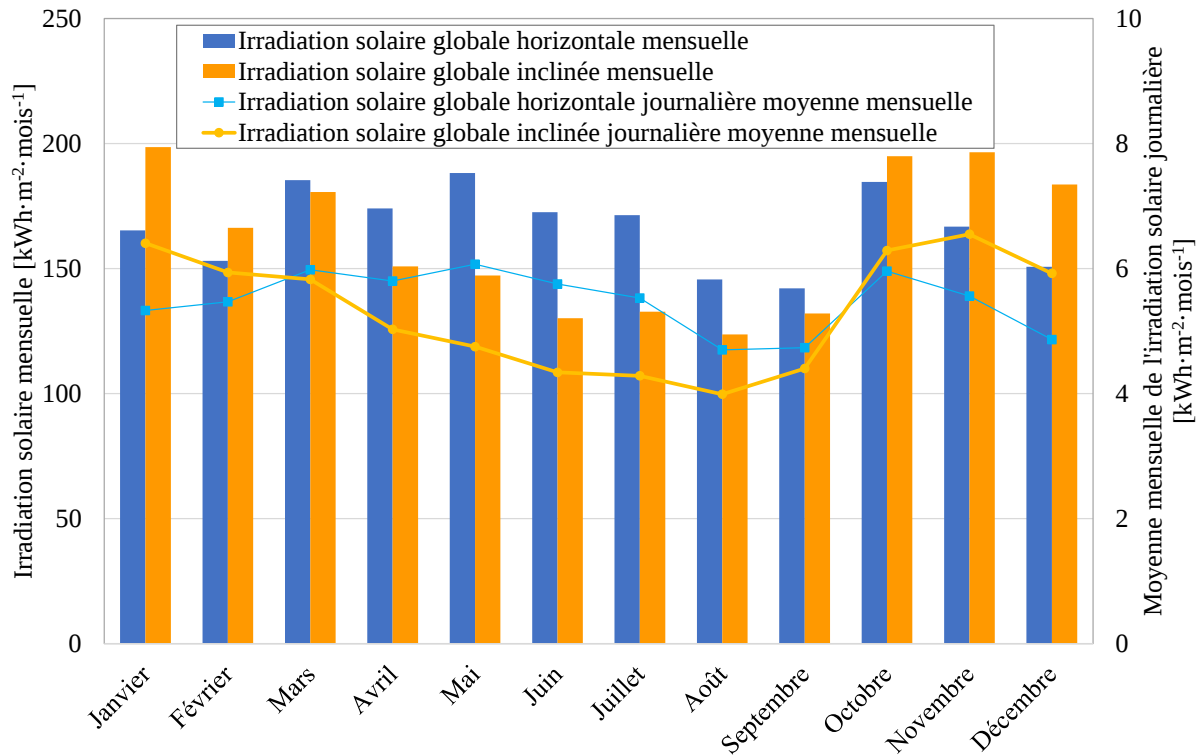


Figure 24. Irradiation solaire mesurée sur un plan horizontal à Ouagadougou (du 13 avril 2022 au 12 avril 2023) et valeurs calculées sur une surface inclinée à 35° à l'aide de RETScreen. Pour assurer l'uniformité des représentations annuelles avec les autres sites, les données sont représentées de janvier à décembre, en attribuant chaque valeur au mois correspondant à la période de mesure. Par exemple, "Janvier" correspond à janvier 2023 tandis que "Juillet" correspond juillet 2022.

Sur la période observée, la température ambiante varie de 21 °C à 47 °C (Figure 25a). La moyenne mobile hebdomadaire montre deux périodes où la température est relativement plus basse : en août, correspondant au pic de la saison des pluies (juin à septembre), et en janvier, en plein cœur de la saison sèche marquée par l'harmattan (novembre à mi-février). La température d'entrée de l'eau dans le CES reste stable tout au long de l'année, oscillant généralement entre 30 °C et 34 °C (Figure 25b), avec des températures légèrement plus basses pendant la saison des pluies par rapport à la saison sèche (Figure 26). Cette stabilité peut être attribuée au fait que le CES puise l'eau d'un forage, limitant ainsi les variations saisonnières et l'influence directe des températures ambiantes, avec une moyenne annuelle autour de 32 °C (Figure 26). Ce constat indique que l'énergie nécessaire pour atteindre la température de consigne de 60 °C reste relativement constante pour une même quantité d'eau à chauffer, en contraste avec les fluctuations observées dans des contextes différents [135].

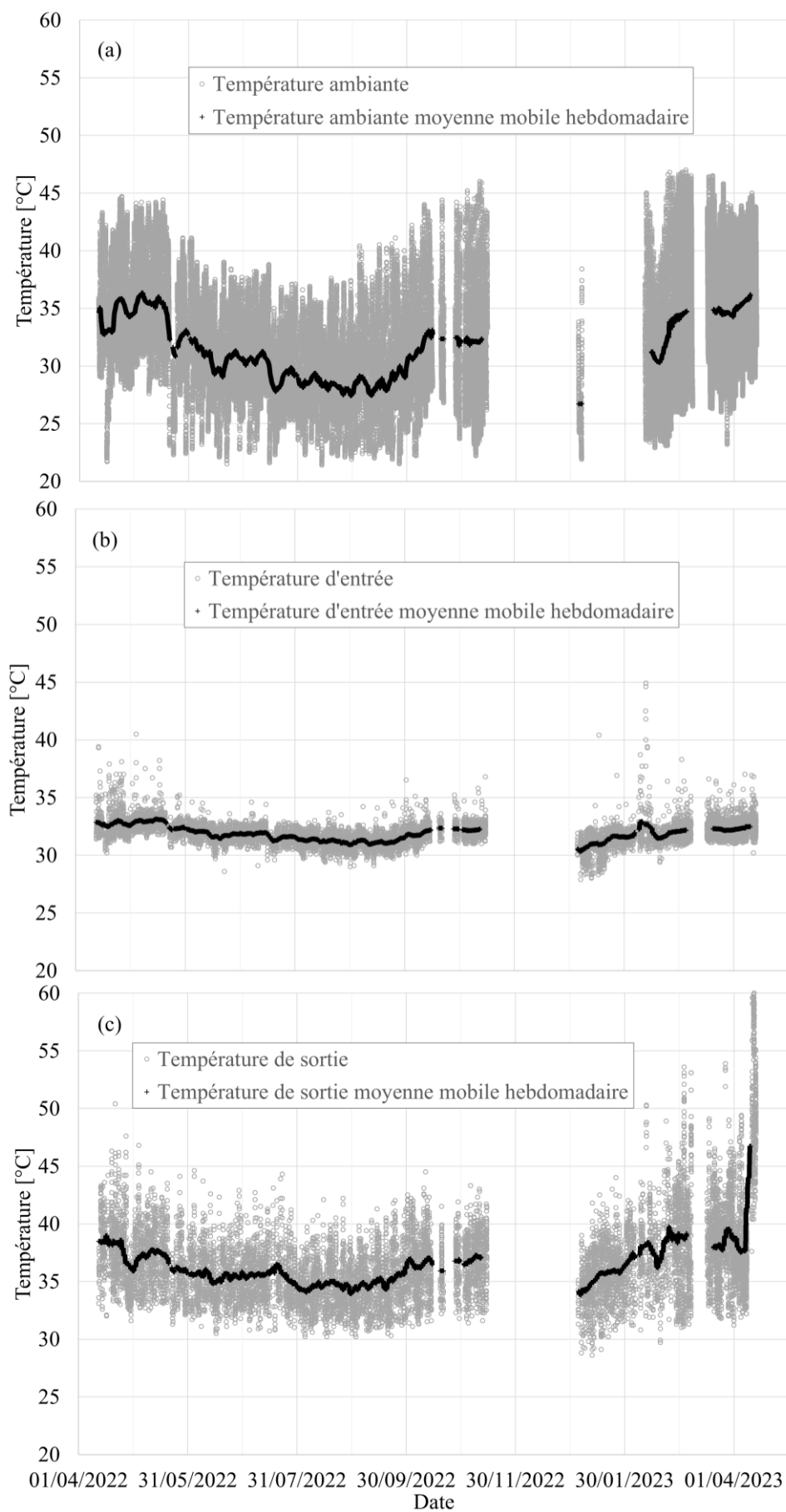


Figure 25. Buanderie d'hôpital : (a) température ambiante, (b) température d'entrée et (c) de sortie du CES.

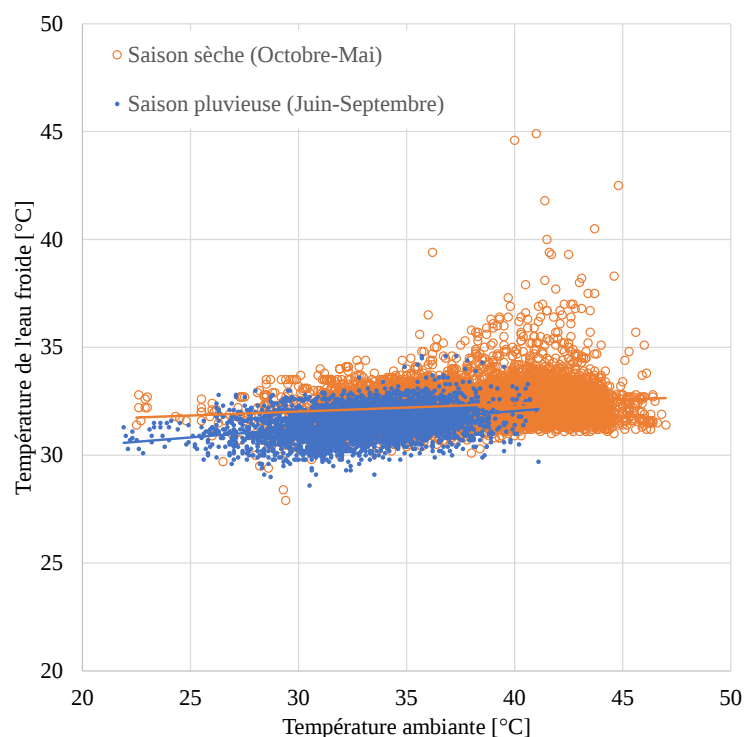


Figure 26. Buanderie d'hôpital : répartition de la température d'entrée de l'eau du CES en fonctionnement en fonction de la température ambiante. Les températures « élevées » de l'eau froide, en particulier celles dépassant 35 °C, coïncident généralement avec les premières prises d'eau, correspondant à l'eau stockée dans les canalisations pendant un certain temps et influencée par la température ambiante et une potentielle conduction thermique depuis le CES.

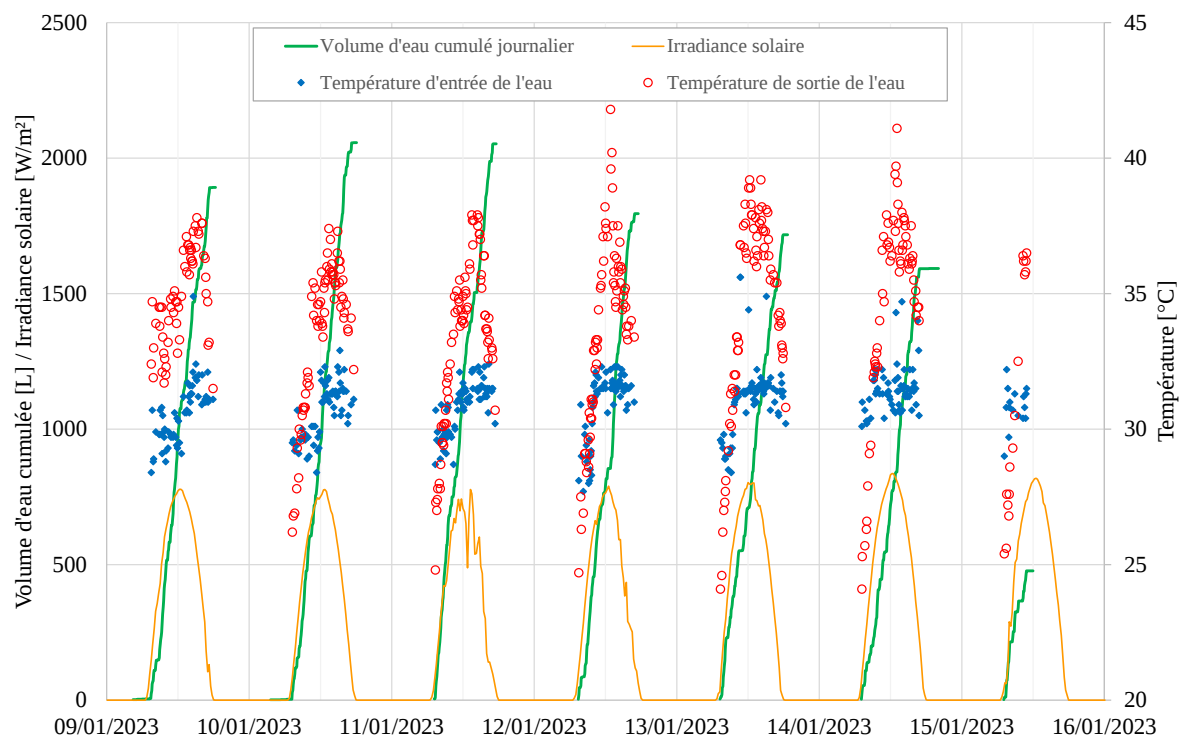


Figure 27. Buanderie d'hôpital : évolution du volume quotidien cumulé d'eau chaude fournie par le CES, de l'irradiation solaire, ainsi que des températures d'entrée et de sortie de l'eau du CES en fonctionnement, durant la semaine du 9 au 16 janvier 2023.

La Figure 27 présente l'évolution des différents paramètres surveillés au cours d'une semaine typique de la saison sèche et froide. Cette période est caractérisée par un rayonnement solaire quotidien stable, atteignant un maximum compris entre 750 W/m² et 830 W/m² (Figure 27). La consommation d'eau en semaine est relativement élevée, variant de 1,6 m³/jour (le 14/01/2023) à environ 2,1 m³/jour. Une exception est notée le 16/01/2023, où seulement 0,5 m³ d'eau est consommé, en raison de la fermeture partielle de la buanderie le samedi.

La température de sortie du CES reste généralement inférieure à 40 °C durant cette période. Notamment, il est observé que la température de sortie est parfois inférieure à celle d'entrée en début de matinée, particulièrement durant la première heure de fonctionnement. Ce phénomène peut être attribué à des pertes de chaleur importantes survenant pendant la nuit. Une comparaison entre la température de sortie du CES le matin et celle enregistrée à l'arrêt du système la veille révèle ces pertes thermiques significatives, qui constituent un des principaux désavantages des capteurs autostockeurs [188–191]. Il est intéressant de noter que les températures de sortie les plus élevées enregistrées au début de la semaine, notamment le lundi 09/01/2023, s'expliquent par l'absence d'utilisation du CES le dimanche, jour où l'unité n'est généralement pas en fonctionnement. Cette pause dominicale permet à l'eau dans le CES de conserver une température légèrement plus élevée jusqu'au redémarrage le lendemain matin.

L'analyse de la production d'eau chaude fournie par le CES révèle une grande variabilité tout au long de l'année, étroitement liée aux fluctuations de la demande. Comme illustré à la Figure 28, les volumes mensuels dépassent généralement les 40 m³, à l'exception de la période de faible demande de février à avril 2023. La charge quotidienne moyenne avoisine 1,4 m³/jour, avec des variations allant d'un minimum de 0,35 m³ le 5 juin 2022 (dimanche de Pentecôte, lorsque le système a fonctionné brièvement pendant 2 h) à un maximum de 2,4 m³ le 10 octobre 2022. Les pics de consommation, particulièrement prononcés en octobre et novembre (Figure 28), correspondent au pic annuel des hospitalisations et des visites de patients à l'hôpital.

L'énergie utile quotidienne fournie pour l'eau chaude montre une variation significative, oscillant entre 1 kWh/jour et 11 kWh/jour (Figure 29). Bien que les points de données soient dispersés et que la résolution du compteur de chaleur (1 kWh) impose certaines limites, une tendance linéaire est tout de même observable, suggérant une corrélation positive entre l'énergie utile quotidienne fournie et la consommation d'eau quotidienne (Figure 29).

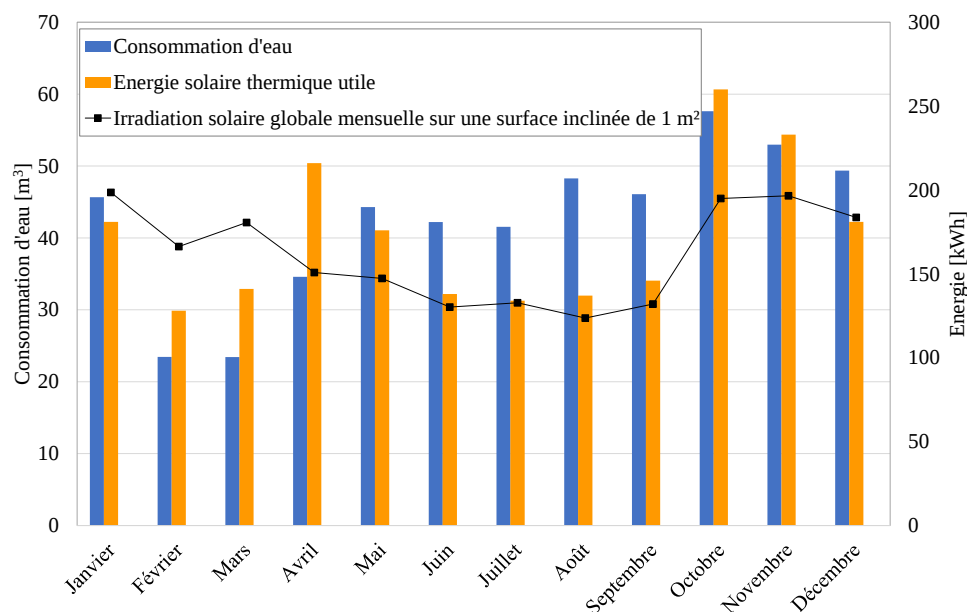


Figure 28. Buanderie d'hôpital : consommation mensuelle d'eau et énergie utile fournie par le CES (du 13 avril 2022 au 12 avril 2023).

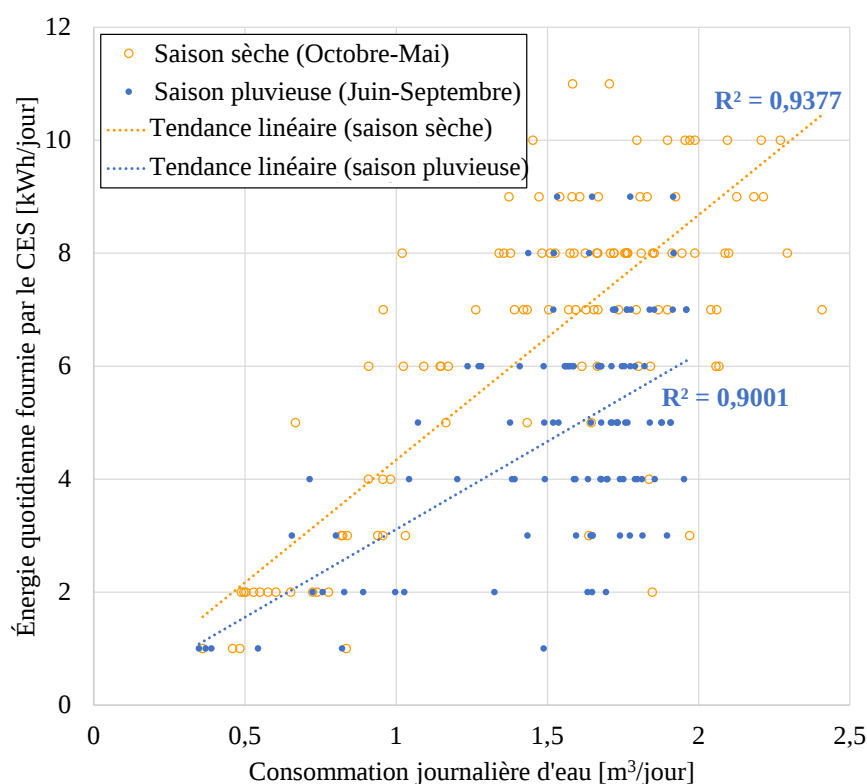


Figure 29. Buanderie d'hôpital : énergie utile quotidienne fournie par le CES en fonction de la consommation quotidienne d'eau (du 13 avril 2022 au 14 février 2023).

Cette corrélation est prévisible, car des débits plus élevés optimisent généralement le rendement des capteurs des CES [192]. L'énergie totale annuelle fournie par le CES est d'environ 2070 kWh, soit environ 740 kWh/m² de surface d'absorbeur ou 647 kWh/m² de

surface d'ouverture, ce qui se traduit par un rendement annuel du système de 37 %. Ce rendement atteint son maximum en octobre et novembre (Figure 30), période coïncidant avec une demande accrue en eau chaude, notamment en raison du pic d'activité lié aux hospitalisations (Figure 28). Ce constat met en évidence l'impact des fluctuations de la demande sur la performance du système, soulignant l'importance de la saisonnalité dans l'optimisation des installations solaires thermiques pour répondre aux besoins en eau chaude.

L'irradiation solaire constitue un facteur déterminant dans la performance du CES, exerçant une influence majeure sur la production de chaleur. Par exemple, le 16 juin 2022, une journée marquée par la pluviométrie la plus élevée du mois et une irradiation solaire réduite à seulement 1,84 kWh/m² (la quatrième plus faible valeur annuelle), une consommation de 1,5 m³ d'eau n'a généré qu'un apport de 1 kWh de chaleur utile (Figure 29). En outre, l'analyse révèle des rendements énergétiques supérieurs par m³ d'eau consommée pendant la saison sèche comparativement à la saison des pluies (Figure 29). Cette tendance peut être attribuée aux variations de l'irradiation solaire et de la température ambiante, qui affectent directement le rendement thermique du système.

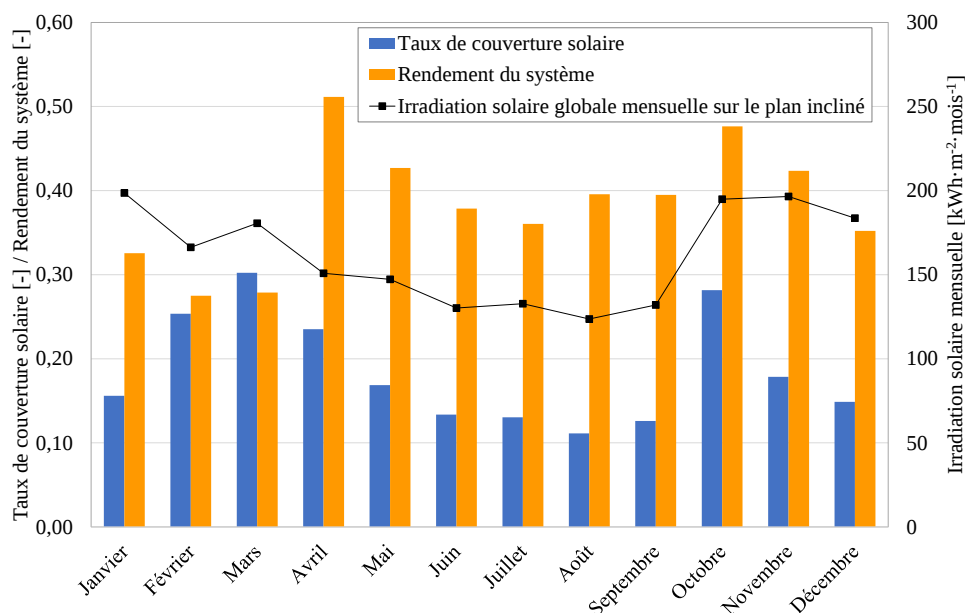


Figure 30. Buanderie d'hôpital : fraction solaire mensuelle estimée et rendement du CES (du 13 avril 2022 au 12 avril 2023).

L'analyse des besoins en eau chaude révèle une demande de chaleur annuelle de 12 000 kWh, ce qui conduit à une fraction solaire de 17 %, suivant de près le profil annuel du rayonnement solaire (Figure 30). Cette performance souligne la capacité du système solaire thermique à

s'adapter aux fluctuations d'irradiation solaire, assurant ainsi une production d'eau chaude continue pour la buanderie. Cependant, les données comparatives pour évaluer ce système par rapport à des installations similaires dans d'autres régions sont rares dans la littérature. La seule étude pertinente concerne une installation solaire thermique dans un hôpital de district à Bawku, au Ghana, situé à environ 200 km au sud de notre site d'étude. Ce système de 17,6 m² de capteurs à tubes sous-vide, conçu pour maintenir l'eau chaude à une température de 80 °C, couvre jusqu'à 90 % des besoins thermiques annuels de 4 500 kWh, avec une production maximale de 240 kWh/m² par an. La performance inférieure de ce système par rapport aux 740 kWh/m² de notre installation est attribuable aux exigences de température plus élevées, qui impactent négativement son rendement.

Le dimensionnement du système étudié apparaît insuffisant pour répondre aux besoins énergétiques de 12 000 kWh par an. Pour couvrir l'intégralité de cette demande dans un contexte d'irradiation solaire annuelle d'environ 2 000 kWh/m², une surface de capteurs de 6 m² serait requise pour un rendement théorique de 100 %. En tenant compte d'un rendement réaliste de 35 à 40 % pour des systèmes solaires thermiques standards [175], une surface d'au moins 12 m² serait nécessaire. Or, la surface actuelle de 2,8 m² de capteurs explique la fraction solaire limitée à 17 %.

Concernant la capacité de stockage, la demande quotidienne moyenne en eau chaude de 1,6 m³ excède six fois la capacité de stockage disponible (0,26 m³). Bien que la production corresponde aux heures d'ensoleillement, le stockage inter-journalier est limité par des pertes thermiques nocturnes élevées, caractéristiques des CES autostockeurs [188,190,192]. Pendant les jours pluvieux, la fraction solaire est particulièrement basse en raison de l'absence de stockage de chaleur résiduelle et de la diminution du rayonnement solaire. Cette inadéquation du CES par rapport aux besoins peut, en partie, être attribuée à un savoir-faire limité dans la conception et l'entretien des CES dans la région, comme le soulignent N'Tsoukpoe et al. [11]. Le manque d'entretien, notamment le nettoyage du capteur, est un autre facteur : nous n'avons pas observé de pratique de nettoyage des capteurs dans la pratique de l'hôpital. Dans le contexte sahélien, où la poussière est présente toute l'année avec un nettoyage naturel limité aux saisons des pluies (juin à octobre), un entretien régulier des capteurs pourrait améliorer les performances. Enfin, la configuration en parallèle du système pourrait être optimisée pour un équilibre hydraulique plus efficace, par exemple, en adoptant un raccordement en boucle de Tichelmann. Bien que l'ampleur du déséquilibre hydraulique n'ait pu être évaluée, elle reste présumée faible, mais

une analyse approfondie nécessiterait une compréhension précise de la résistance hydraulique du système, actuellement indisponible.

L'analyse économique qui a suivi (Section III.1) montre un temps de retour sur investissement simple relativement long et un temps de retour actualisé très prohibitif (Tableau 4), remettant également en question la pertinence économique de l'investissement. Malgré la forte insolation de la région et la correspondance entre la disponibilité de l'énergie solaire et les horaires de fonctionnement de la buanderie, le système n'est pas satisfaisant d'un point de vue économique. Cela pourrait être attribué à un décalage entre la technologie de CES sélectionnée et les exigences spécifiques de l'application prévue. Selon le fabricant du CES autostockeur, le produit est « particulièrement adapté pour des usages estivaux tels que : camping, maisons de vacances, hôtels, piscines, douches, centres sportifs, stations balnéaires, élevage de bétail, bungalows... » [160,161]. Cela suggère que le produit est conçu pour des besoins en eau chaude plus légers ou saisonniers, généralement associés à des temps chauds et à la saison estivale. Les applications listées par le fabricant suggèrent qu'il est idéal pour fournir de l'eau chaude dans des environnements où la demande d'eau chaude se manifeste durant les mois d'été ou dans des régions au climat chaud. Pour une buanderie qui fonctionne toute l'année et nécessite un approvisionnement constant en eau chaude à une température relativement élevée (60 °C), un système CES commercialisé principalement pour des applications saisonnières ou à faible consommation n'est sans doute pas le meilleur choix. En tenant compte des avantages des différents CES et du marché local (Tableau 15), les capteurs à tubes évacués semblent être le choix le plus approprié. Typiquement, un système thermosiphon à tubes sous-vide direct de 150 L/1,5 m² coûte environ 210 000 à 300 000 FCFA sur le marché local.

Nous avons proposé l'introduction et le suivi d'un CES à tubes sous-vide direct du marché local à la direction de l'hôpital. L'unité la plus grande disponible a été sélectionnée et ses caractéristiques sont présentées dans le Tableau 16. À l'instar de la plupart des CES à tubes sous-vide disponibles sur le marché local, le rendement optique et les coefficients de pertes thermiques du capteur sont inconnus et n'ont pas pu être fournis par le fournisseur. Le système comprend un réservoir de stockage de 360 L, en acier inoxydable, coûtant 425 000 FCFA. Ce choix privilégie une protection supérieure contre la corrosion. Étant donné que le réservoir de stockage reste ouvert à l'atmosphère, il n'y a pas de pressurisation : l'eau évaporée en cas de stagnation peut s'échapper sous forme de vapeur et être remplacée par de l'eau froide entrant. Les coûts d'installation couvrent les matériaux (IPN en acier, cornière métallique, ciment, tuyaux et raccords PPR, vannes) pour intégrer le CES sur le mur de la buanderie, ainsi que les

coûts de main-d'œuvre (soudeur et plombier), représentant environ 41 % du coût d'achat du CES. Le coût total du CES à tubes sous-vide est trois fois moins cher que celui du CES autostokeur.

Tableau 15. Comparaison des différents types de systèmes thermosiphons dans le contexte local.

Type	Avantages	Inconvénients
CES autostokeur	Économique, design simple, adapté aux espaces restreints.	Capacité de stockage limitée, difficulté à fournir de l'eau chaude tôt le matin et en fin d'après-midi. Pertes thermiques importantes du réservoir vers l'environnement, notamment la nuit et par temps nuageux.
CES à capteur plan	Efficace et fiable dans les climats chauds, adapté aux opérations en journée. Peut chauffer l'eau à 60 °C pendant la journée, réduisant la dépendance à l'électricité.	Coût élevé sur le marché local.
CES à capteur à tubes sous-vide	Efficace, capable de maintenir 60 °C de façon constante dans les climats chauds. Idéal pour des besoins élevés en température. Coût initial inférieur à celui d'autres FPC sur le marché local.	Durée de vie plus courte par rapport aux capteurs plans (surtout pour les CES à tubes sous-vide directs) ?

Tableau 16. Données techniques et économiques du système expérimental du CES à tubes sous-vide.

Type de SWH	Collecteur à tube évacué eau-dans-verre (ETE)
Fournisseur	HAGE MATERIAUX
Origine	Chine (pour le compte de HAGE MATERIAUX)
Diamètre extérieur du tube	58 mm
Longueur d'un tube	1800 mm
Nombre de tubes	36
Surface d'ouverture	3,76 m ² ^a
Capacité totale de stockage	360 L
Inclinaison du collecteur	45°, orientation sud
Élément chauffant	Aucun
Coût du CES	425 000 FCFA
Coût d'installation	175 000 FCFA (y compris accessoires et main-d'œuvre)

^a Calculée comme le produit du diamètre extérieur par la longueur et le nombre de tubes.

Le suivi du système mené au cours de l'année précédente indique que la demande maximale quotidienne en eau chaude pour une machine se situe dans la plage de 700 à 800 L pendant les périodes de pointe. Sur cette base, la décision a été prise d'assigner le CES à tubes sous-vide de 360 L à une seule machine à laver. Par conséquent, il a été installé début décembre 2023 et raccordé à une des machines à laver, tandis que les deux autres machines continuent d'utiliser le CES autostockeur (Figure 31). L'ensemble du système de suivi a également été déplacé et monté sur le CES à tubes sous-vide pour une évaluation continue.



Figure 31. Buanderie d'hôpital : installation du CES à tubes sous-vide à côté du CES autostockeur.

La Figure 32 montre l'évolution de l'énergie utile totale délivrée par le CES à tubes sous-vide à la buanderie du 21 décembre 2023 au 20 janvier 2024. Le système a fonctionné quotidiennement tout au long de la période de suivi, y compris les week-ends, avec des exceptions pendant Noël, le jour de l'An et le 3 janvier, qui sont des jours fériés au Burkina Faso. Les heures de travail pendant les week-ends étaient limitées, et par conséquent, la consommation d'eau pendant ces périodes a également été réduite.

Au cours de la période de suivi d'un mois, un total de 276 kWh a été fourni à la buanderie (Figure 32). Cela dépasse l'énergie fournie par le CES autostokeur pendant la même période en 2023 (Figure 28) et tous les mois précédents. Le CES à tubes sous-vide fournit une température moyenne de l'eau d'environ 55 °C à la buanderie, avec une température maximale atteignant 85 °C, comme observé le 26 décembre lors du démarrage du système, en raison du fait que le système n'a pas fonctionné la veille.

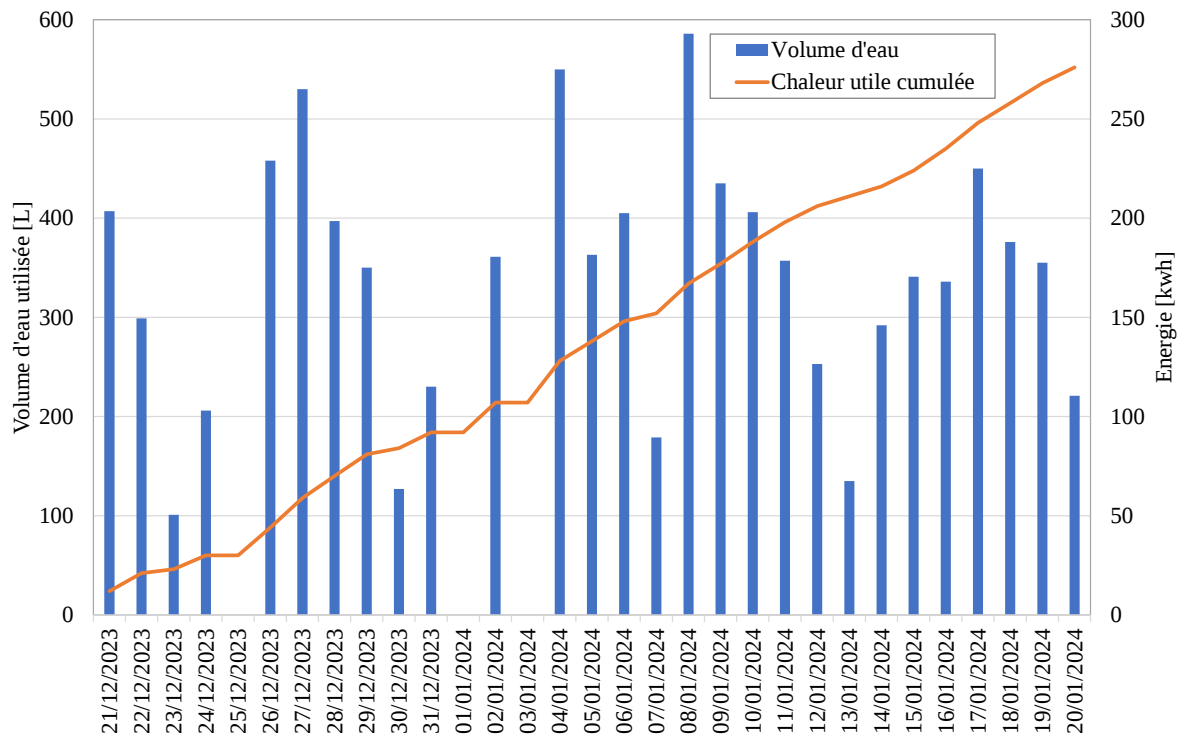


Figure 32. Buanderie d'hôpital : consommation quotidienne d'eau et énergie utile cumulée fournie par le CES à tubes sous-vide à la machine à laver, du 21 décembre 2023 au 20 janvier 2024.

Une discussion plus approfondie des résultats de ce nouveau système dépasse le cadre de cette recherche. Bien qu'une comparaison correcte des deux systèmes devrait inclure au moins l'irradiation solaire collectée pendant la période (dont la quantité n'a pas été disponible), ce résultat suggère que le CES à tubes sous-vide produirait au moins la même quantité d'énergie utile que le CES autostokeur pendant une période d'un an. En effet, à des températures relativement élevées, les CES à tubes évacués présentent des pertes thermiques inférieures à celles des CES autostokeurs, dont le principal inconvénient est la perte significative de chaleur vers l'environnement.

II.2. Chauffe-eau solaire à capteur plan dans un hôtel à Ouagadougou

La Figure 33 présente les données recueillies sur le compteur de chaleur sur une période de 4 ans, à savoir la consommation mensuelle et l'énergie utile à l'ECS. La consommation mensuelle d'eau présente une variation notable entre 2 et 8 m³, bien que des exceptions aient été enregistrées au cours du premier semestre 2021 ainsi qu'en février et en août 2023 (Figure 33). En moyenne, la demande d'eau chaude est la plus élevée pendant la saison froide (novembre à février), connue sous le nom d'harmattan en Afrique de l'Ouest. Cette période correspond également à la haute saison touristique, ce qui suggère que le pic de demande d'eau chaude est influencé par l'afflux de visiteurs.

La baisse de la consommation d'eau observée au premier semestre 2021 s'explique par la réduction d'activité dans le secteur du tourisme, en raison de défis tels que la crise sanitaire de la COVID-19 et des problèmes de sécurité. En revanche, l'augmentation exceptionnelle de la consommation d'eau en août 2023 correspond à un événement spécial au cours duquel toutes les chambres ont été occupées de manière continue pendant trois semaines, certaines chambres individuelles étant partagées par deux personnes.

De manière générale, la consommation d'eau chaude suit une tendance saisonnière liée aux températures ambiantes : elle est plus élevée durant la saison sèche lorsque les températures sont basses, répondant ainsi aux besoins accrus des usagers. Inversement, pendant la saison des pluies, la demande en eau chaude diminue en raison du faible taux d'occupation des hôtels. Ce profil saisonnier met en lumière les effets combinés de la température ambiante et de l'activité touristique sur la consommation d'eau chaude. Par ailleurs, une analyse des données a révélé une anomalie en août 2023, que nous avons exclue du calcul du profil moyen pour garantir la cohérence des résultats.

L'énergie utile fournie par le capteur suit logiquement la même tendance de variation de température, comme montré à la (Figure 33b). Cette corrélation peut s'expliquer par la stabilité relative de la température de l'eau froide (eau de robinet) alimentant le CES, qui fluctue peu au cours de l'année. En conséquence, la chaleur utile produite par le CES reflète les fluctuations saisonnières, alignées sur les variations de température ambiante mesurées à la surface du capteur. L'énergie fournie est pratiquement proportionnelle au volume d'eau consommé (Figure 34), avec une moyenne d'environ 13,3 kWh·m⁻³, correspondant à une augmentation moyenne de 11 °C de la température d'entrée. Cette augmentation est conforme aux prévisions nécessaires pour élever la température de l'eau d'entrée (~25-27 °C) à environ 36-38 °C, en l'absence de mélange dans la salle de bains.

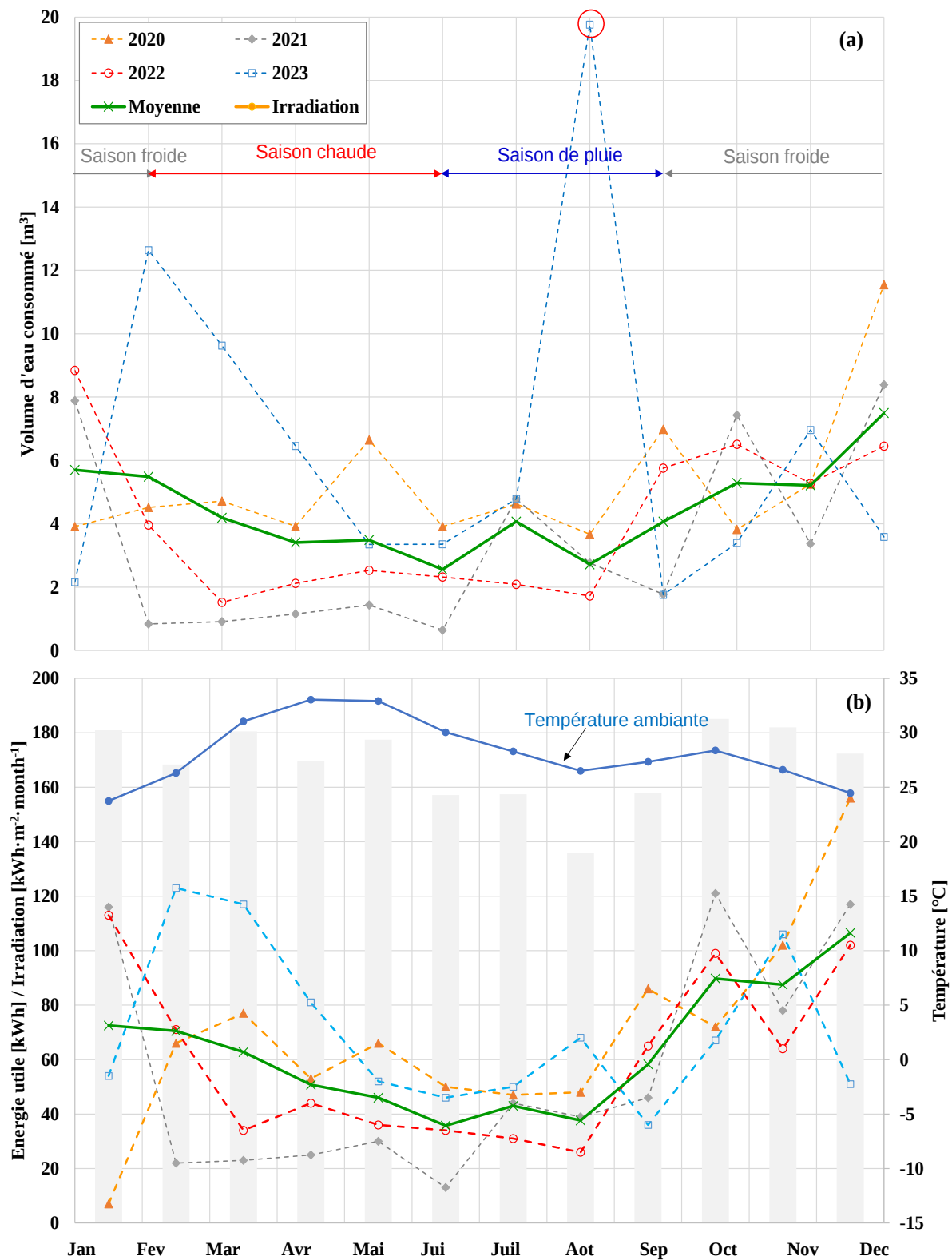


Figure 33. Hôtel : (a) profil annuel de consommation d'eau chaude et (b) profil de production d'énergie utile basé sur les données mesurées. La valeur inhabituelle observée en août 2023 a été exclue du calcul du profil moyen. La température ambiante correspond à la température moyenne mensuelle enregistrée sur le campus de 2iE d'octobre 2019 à octobre 2024. L'histogramme représente la moyenne sur cette période de quatre ans des irradiances globales mensuelles dans le plan inclinée du CES.

Cependant, en 2023, notamment en août, la quantité de chaleur fournie semble limitée et ne répond probablement pas à la demande, comme en témoigne la faible quantité d'énergie utile fournie en comparaison du volume élevé d'eau extraite (Figure 34). Cette insuffisance est principalement attribuable à la faible irradiation solaire en août 2023, pendant la saison des pluies, qui coïncide avec un volume exceptionnellement élevé d'eau utilisée (Figure 33b). Par ailleurs, l'énergie par unité de volume d'eau en juillet tend également à être faible (Figure 34), indiquant une période critique de l'année où la demande en eau chaude risque davantage de ne pas être satisfaite.

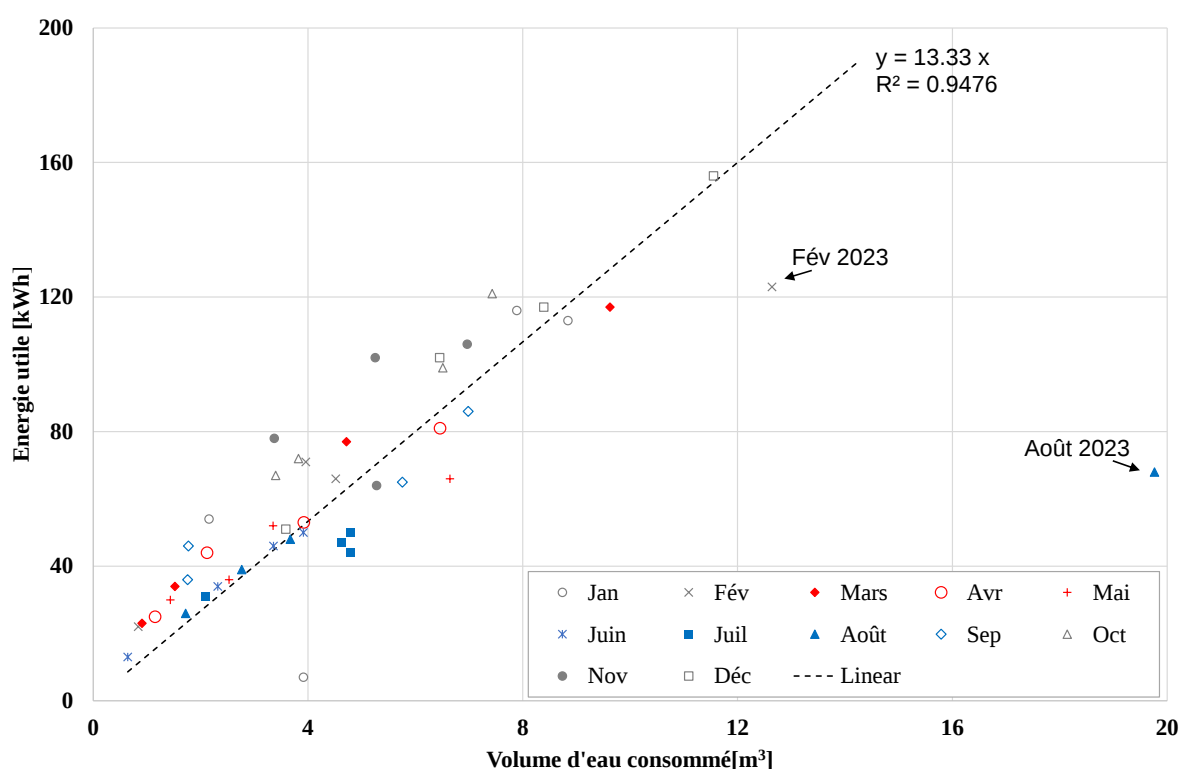


Figure 34. Hôtel : énergie utile fournie en fonction du volume d'eau extrait.

Il est pertinent de noter que le profil saisonnier de l'énergie utile extraite par le système présente des similitudes avec la consommation d'énergie d'un hôtel trois étoiles au Sénégal, tel que rapporté par Ndoeye et Sarr [126].

Selon leur étude, la consommation d'énergie pour l'ECS tout au long de l'année suit un schéma de type « bassin peu profond », caractérisé par une utilisation minimale de juin à août, avec une augmentation progressive vers décembre d'un côté et janvier de l'autre. Cette similitude pourrait indiquer une tendance commune dans les hôtels des pays sahéliens, où la demande en eau chaude varie de manière saisonnière. De tels profils ont des implications significatives pour la conception et l'exploitation du système, d'autant plus que la période de demande la plus

faible en eau chaude (Figure 33a) coïncide avec la période d'irradiation solaire la plus faible (Figure 33b).

Ces observations sont pertinentes pour la conception de CES pour les hôtels de la région, soulignant la nécessité de ne pas présumer un profil de consommation d'eau chaude constant tout au long de l'année lors des simulations de performance avec des outils dédiés. Comme mentionné précédemment, le profil de consommation est influencé par la demande en eau chaude ainsi que par le taux d'occupation. Plus précisément, les mois de juillet et août, souvent considérés comme la deuxième période la plus fraîche de l'année (voir la température moyenne dans la Figure 33b), devraient correspondre à un pic de demande. Cependant, le taux d'occupation plus faible durant cette période réduit probablement ce pic potentiel, entraînant une diminution notable de la demande.

La Figure 35 présente l'énergie utile délivrée à l'utilisateur, les pertes thermiques du réservoir et celles des capteurs. La somme de ces éléments du bilan énergétique représente l'énergie solaire totale captée sur la surface d'ouverture du capteur, soit l'irradiation totale. Cette irradiation est demeurée pratiquement constante à 4500 kWh, avec une variation de $\pm 2\%$ sur les quatre (4) années du suivi de mesure.

Les résultats de la Figure 35 révèlent une variation annuelle notable de l'énergie utile fournie pour chauffer l'eau, oscillant entre 1136 kWh en 2021 et 1465 kWh en 2022, soit une moyenne de $537 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1} \pm 13\%$ par surface brute de capteur. Ces fluctuations s'expliquent principalement par le profil de consommation d'eau, comme en témoigne la faible utilisation du système au premier semestre 2021, ainsi que par le manque d'entretien de la surface du capteur et d'autres facteurs (Figure 19b et c). En outre, comme à l'hôpital, aucun programme de maintenance n'est actuellement en place, et les dépôts de poussière fréquents pendant la saison de l'harmattan (novembre à février) sont majoritairement éliminés par les pluies de la saison humide (juin à septembre). Ce manque d'entretien affecte le rendement solaire spécifique, qui reste relativement faible à $537 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1} \pm 13\%$, avec un rendement du capteur variant de 23 à 30% (Figure 35). Selon le rapport de performance standard Solar Keymark pour le capteur, le rendement thermique brut attendu atteint $835 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, avec un rendement de 47% pour une température de fonctionnement moyenne de 50°C dans des conditions typiques d'Athènes (irradiation annuelle de $765 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, température ambiante moyenne de $18,5^\circ\text{C}$). À Ouagadougou, où l'irradiation annuelle est nettement plus élevée ($\sim 2000 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$) et la température ambiante moyenne est d'environ $28,7^\circ\text{C}$, les performances

et le rendement théoriques devraient en principe être supérieures à celles d'Athènes. Toutefois, l'ombrage causé par les panneaux d'enseigne de l'hôtel et, dans une moindre mesure, par la tour téléphonique voisine (Figure 19b et c) contribue également à la réduction du rendement du système.

Tout cela affecte la production solaire spécifique, se rapportant à l'énergie utile fournie l'utilisateur, qui est alors de 339 kWh/m², une valeur relativement faible par rapport aux autres CES. En moyenne, le CES a généré 770 kWh de chaleur utile par an entre 2020 et 2023 (Figure 35). Une proportion significative de cette chaleur est toutefois perdue au niveau du réservoir de stockage, représentant environ 30 à 50 % de la chaleur produite par le capteur, selon les années (Figure 35). Bien que ces pertes puissent sembler importantes, elles sont cohérentes avec les observations précédentes de Michaelides *et al.*[193], qui ont relevé des pertes nocturnes de chaleur au niveau du réservoir de stockage comprises entre 37 % et 43 % dans des CES à thermosiphon installés à Nicosie, où la température ambiante moyenne est d'environ 20,3 °C.

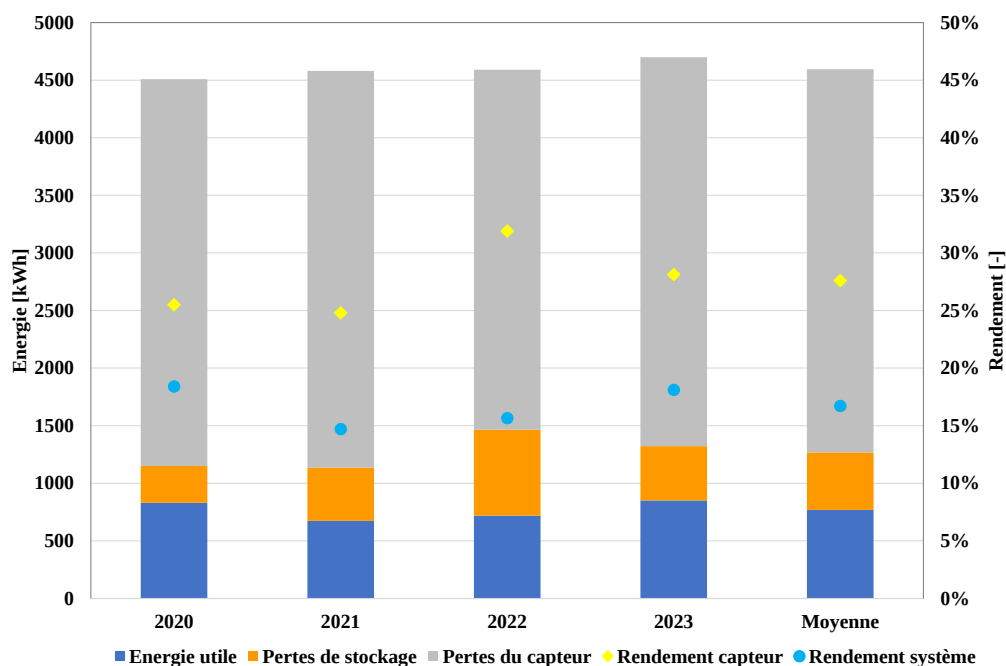


Figure 35. Hôtel : bilan énergétique annuel et rendement (basé sur la surface brute) du CES au cours des quatre dernières années.

II.3. Chauffe-eau solaire à tubes sous-vide dans un ménage à Lomé

La Figure 36 présente un aperçu des températures mesurées sur une période d'observation d'une année complète, comprenant la température ambiante ainsi que les températures d'entrée et de sortie du CES à tubes sous-vide. La température ambiante est présentée pour l'ensemble des

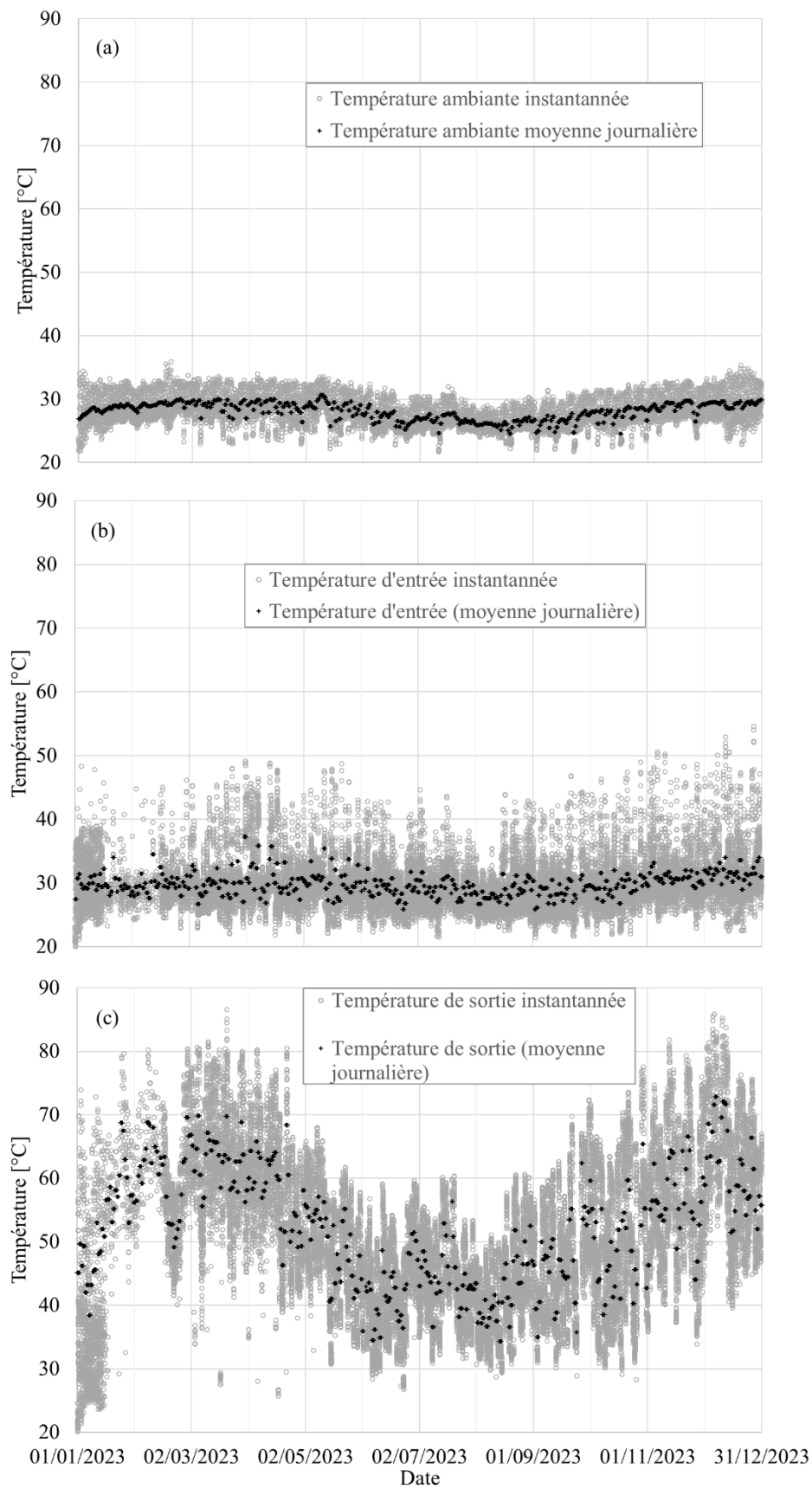


Figure 36. Ménage à Lomé : (a) température ambiante, (b) température d'entrée et (c) de sortie du CES.

données collectées, tandis que les températures d'entrée et de sortie sont uniquement présentées lorsque le flux vers ou depuis le CES est observé, afin d'exclure les relevés des températures de l'eau stockée dans les tuyaux lorsque le système est inactif.

L'analyse des données de température ambiante tout au long de la période d'observation montre que celle-ci (Figure 36a) varie entre 21 °C et 36 °C, avec des moyennes journalières comprises entre 24,5 °C et 30,8 °C. Bien que relativement stable pour la région de Ouagadougou, on note des températures ambiantes journalières plus basses en juillet et août, qui coïncident avec la petite saison sèche.

Les températures minimales sont enregistrées le matin durant le mois de janvier, particulièrement au cours de la première quinzaine (Figure 37), au cœur de la saison de l'harmattan. On note aussi avec intérêt les températures matinales et nocturnes très basses en la période de juin à septembre, et particulièrement en août (Figure 37). Cette observation confirme l'idée qu'il aurait été utile de mieux examiner à Lomé la différence de comportement en matière d'utilisation d'eau chaude, en séparant la période fraîche de la grande saison sèche (harmattan) de la période fraîche de la petite saison sèche.

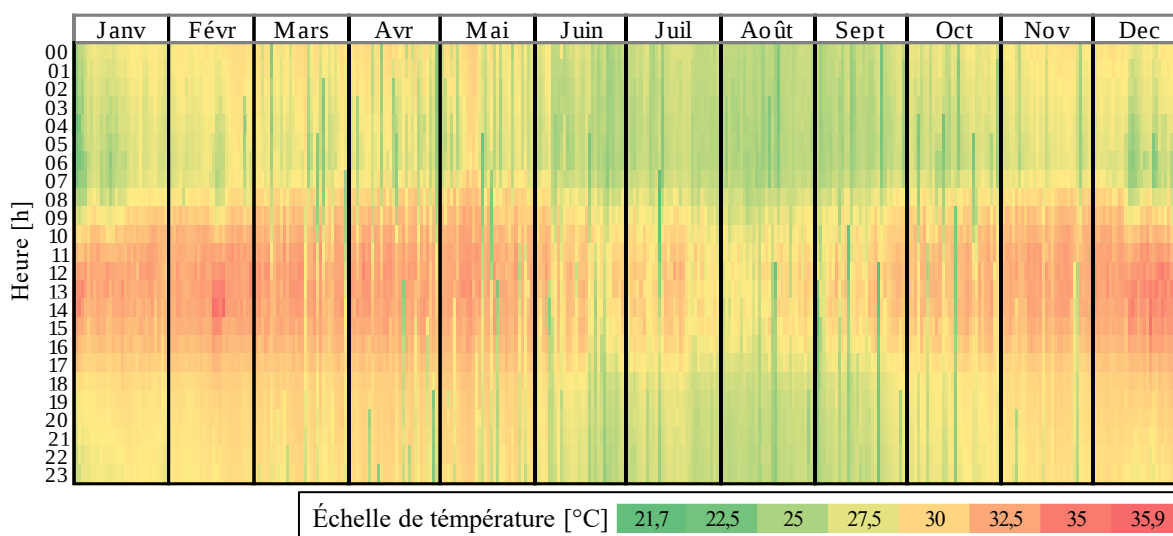


Figure 37 : Ménage à Lomé : distribution horaire de la température sur l'année.

La température moyenne journalière de l'eau à l'entrée du CES se situe entre 26 °C et 34 °C tout au long de l'année (Figure 36b et Figure 38), avec des valeurs plus basses observées de juin à septembre. Toutefois, certaines mesures instantanées montrent des températures atteignant jusqu'à 54 °C, ce qui pourrait indiquer un problème de mesure. Ces températures « élevées » de l'eau froide à l'entrée du CES, en particulier celles dépassant 32 °C, coïncident souvent avec le premier prélèvement d'eau, correspondant probablement à de l'eau ayant stagné

dans les tuyaux pendant un certain temps, influencée par la température ambiante et un transfert de chaleur potentiel du CES. Ce phénomène devra être examiné et contrôlé de manière précise. En effet, lors de l'installation d'un CES à tubes sous-vide à Ouagadougou, il a été constaté qu'en l'absence d'un clapet anti-retour sur le tuyau de sortie d'eau chaude, une circulation inverse de l'eau s'opérait depuis le réservoir de stockage vers le réservoir d'alimentation et le tuyau d'entrée. L'ajout d'un clapet anti-retour a permis de résoudre ce problème. Il est donc possible que des phénomènes similaires se produisent également avec ce CES, ce qui nécessiterait des vérifications supplémentaires pour en avoir confirmation. Dans tous les cas, la similarité entre la température moyenne de l'eau froide et la température ambiante moyenne quotidienne laisse penser que la chaleur mesurée représente une estimation conservatrice, sous-évaluant possiblement la production thermique réelle du CES.

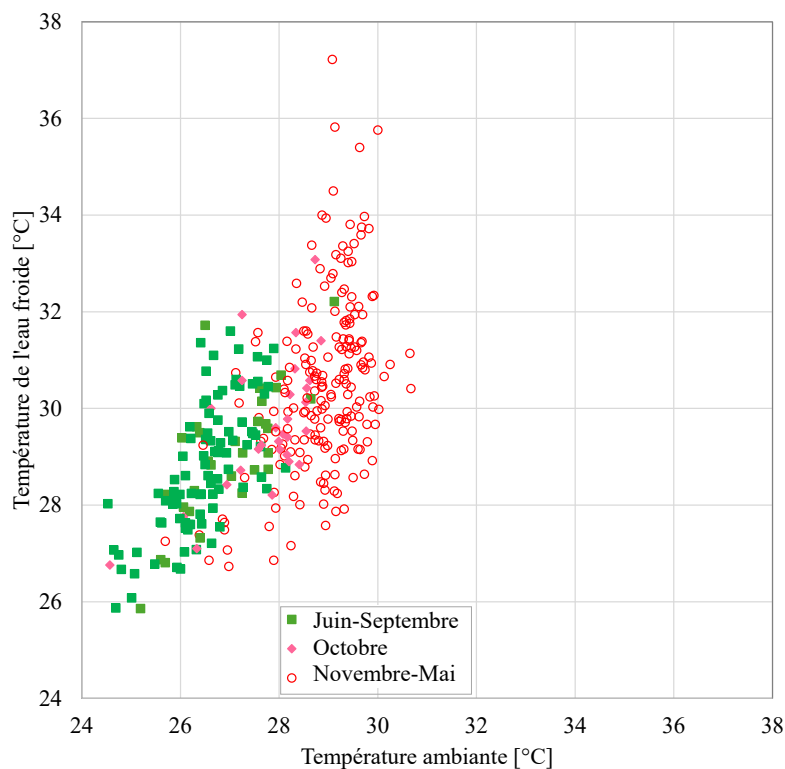


Figure 38. Ménage à Lomé : distribution de la température de l'eau à l'entrée du CES pendant le fonctionnement en fonction de la température ambiante.

La température de sortie du CES à tubes sous-vide varie généralement entre 30 et 70 °C tout au long de l'année, avec une moyenne excédant 50 °C (Figure 36c). Deux périodes de pointe sont observées durant les saisons sèches, soit en mars et à la fin du mois de novembre, coïncidant avec les températures ambiantes les plus élevées (Figure 36a). Cette corrélation pourrait indiquer une demande d'eau chaude potentiellement réduite en période de forte irradiation solaire et de grande disponibilité des ressources (Figure 12). À l'inverse, les températures

moyennes journalières de sortie inférieures à 40 °C sont principalement relevées de juin à septembre. Cette période correspond à la fin de la saison la plus pluvieuse (juin) et la période fraîche de la saison sèche (juillet à septembre), ce qui la rend critique en raison de la diminution de la ressource solaire disponible (jours nuageux et pluvieux, Figure 12) et d'une demande potentiellement accrue en eau chaude due à une température ambiante plus basse (Figure 36a).

Par ailleurs, la quantité d'eau chaude fournie par le CES montre une forte variabilité au cours de l'année (Figure 39). Compte tenu de ces fluctuations saisonnières de la température de sortie du CES, faire une comparaison correcte des besoins en eau chaude suivant les saisons nécessite une analyse faisant intervenir les températures d'entrée et de sortie, ainsi que la définition d'une température de référence.

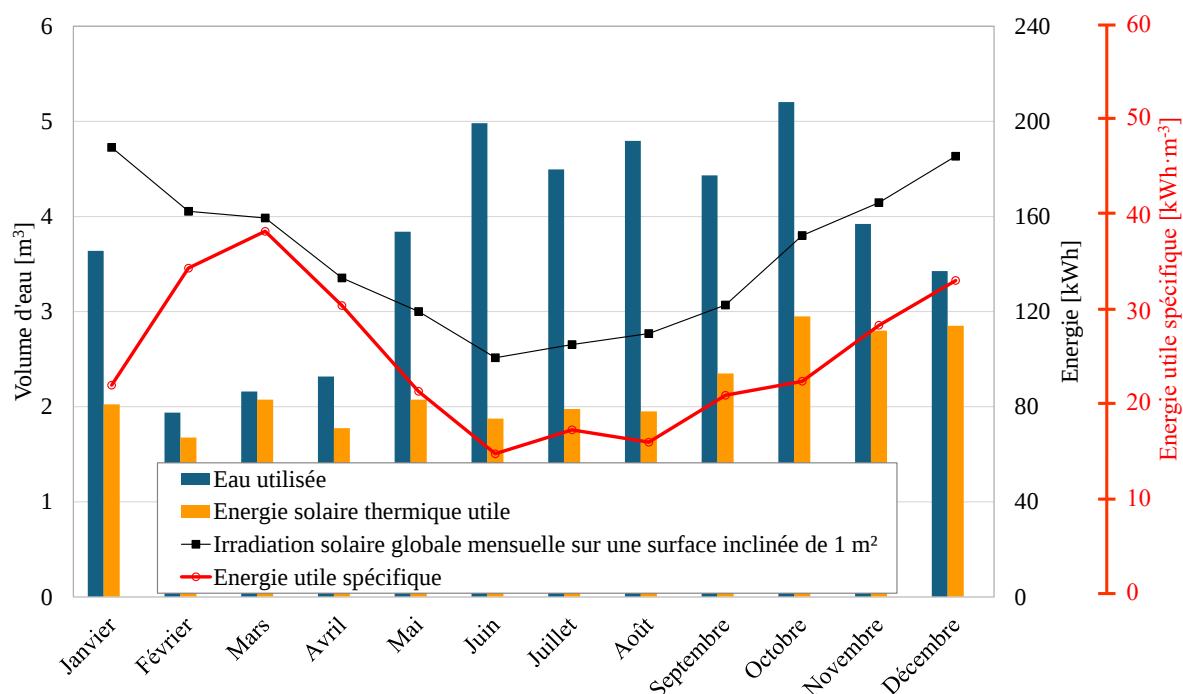


Figure 39. Ménage à Lomé : utilisation mensuelle d'eau mensuelle et énergie utile fournie par le CES.

Cependant, on constate que l'énergie utile spécifique, soit le ratio entre l'énergie fournie et le volume d'eau chaude extrait, tend à augmenter avec la température de l'eau. Les résultats indiquent qu'en période de juin à août, l'énergie fournie par unité d'eau est environ moitié moindre par rapport à celle disponible entre novembre et avril, exception faite d'une particularité pour le mois de janvier. Cette variation du ratio semble également suivre celle de l'irradiation solaire mensuelle, hormis en janvier. En effet, en supposant qu'il faut 1,16 kWh pour élever la température de 1 m³ d'eau de 1 °C, on observe une augmentation minimale de température en juin ($\Delta T \approx 13$ °C), correspondant au mois le plus pluvieux, et un maximum en

mars ($\Delta T \approx 33\text{ }^{\circ}\text{C}$), à la fin de la saison sèche, période où les températures ambiantes et l'irradiation solaire sont élevées. Ces performances sont encourageantes et témoignent de l'efficacité du CES à tubes sous-vide tout au long de l'année.

L'analyse des performances du système montre que la chaleur totale fournie par le CES au cours de l'année est d'environ 1 055 kWh, soit une production solaire spécifique de $672\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, ce qui donne un rendement annuel de 39 % (Figure 40). Ce rendement reste généralement constant ou supérieur à 40 % entre mai et novembre/décembre, mais il connaît une baisse notable durant la période de janvier à avril (Figure 40). Cette diminution peut être expliquée par une consommation d'eau relativement faible pendant les quatre premiers mois de l'année, en raison de températures ambiantes plus élevées durant cette période (Figure 36a), ce qui conduit à des températures de sortie plus élevées du CES (Figure 36c). Cette tendance est attendue, car il est bien établi que les débits d'eau influencent le rendement du capteur solaire et du CES. En effet, des débits élevés tendent à améliorer le rendement du système, tandis que des débits plus faibles la réduisent [192].

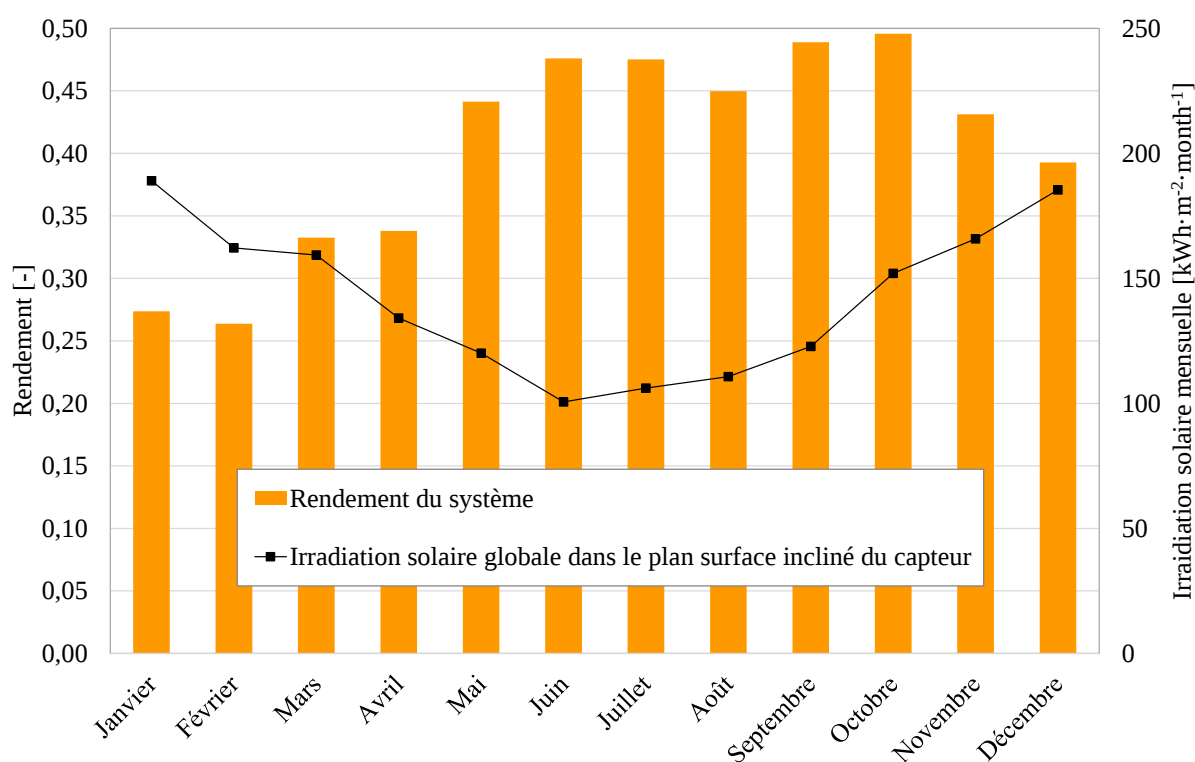


Figure 40. Ménage à Lomé : estimation du rendement mensuel du système

Ces résultats mettent en évidence la capacité du système à s'adapter efficacement aux variations des conditions solaires et à fournir de l'eau chaude de manière régulière pour satisfaire les

besoins des ménages. Le dimensionnement du système semble adéquat, permettant de répondre aux exigences des utilisateurs tout au long de l'année, à l'exception des périodes nuageuses, particulièrement en août, comme signalé par les usagers. En termes de rendement, le système présente des performances satisfaisantes, dépassant les valeurs annuelles typiques de 35 à 40 % observées pour la plupart des systèmes d'eau chaude sanitaire, dont le rendement global se situe généralement en deçà de 50 % [194].

Par ailleurs, ces observations montrent qu'un rendement énergétique stable peut être maintenu avec un CES, même sans entretien régulier, malgré les précipitations et la présence limitée de poussière en comparaison à Ouagadougou. Ce constat souligne la résilience du système dans des conditions climatiques similaires à celles de Lomé.

II.4. Chauffe-eau solaire à capteur plan dans un ménage à Ouagadougou

Pour le ménage à Ouagadougou, la chaleur totale fournie par le CES entre octobre 2023 et septembre 2024 s'élève à 1313 kWh. La famille ayant activé l'alimentation électrique de la résistance électrique en janvier 2024, puis l'ayant arrêtée fin février/début mars 2024, le compteur électrique a indiqué une consommation de 70,49 kWh. Ainsi, la chaleur solaire produite est estimée à 1243 kWh, soit une production spécifique de 683 kWh/m² d'absorbeur (la surface d'ouverture étant indisponible). Cette performance, élevée, est comparable à celle du CES à tubes sous-vide d'un ménage à Lomé.

En l'absence de mesures d'irradiation solaire spécifiques à Ouagadougou en 2024, nous avons utilisé les données d'irradiation recueillies sur le campus de 2iE-Ouagadougou (situé à 5,8 km), ajustées pour un plan incliné à 20° via Retscreen. Cela conduit à un rendement annuel du système de 38 %.

III. ANALYSE DES PERFORMANCES ÉCONOMIQUES

III.1. Chauffe-eau solaire à capteurs autostockeurs dans la buanderie d'un hôpital à Ouagadougou

Les résultats de l'analyse économique du CES autostockeur sont présentés au Tableau 17. Ils mettent en évidence des contraintes importantes en termes de viabilité financière. Quel que soit le scénario considéré, le délai de récupération simple dépasse 10 ans, ce qui est relativement long pour un tel investissement. Lorsque la valeur temporelle de l'argent est intégrée dans les calculs, le temps de récupération actualisée atteint environ 25 ans dans le scénario le plus

favorable. Un tel délai s'avère prohibitif d'un point de vue économique, notamment en raison de l'espérance de vie estimée du CES, qui se situe entre 10 et 20 ans.

Tableau 17. Buanderie d'hôpital fonctionnant avec le CES autostokeur : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années.

Scénario	SPP	DPP (i = 6%)	DPP (i = 8%)	DPP (i = 12%)
1. Tarif d'électricité : 94 FCFA/kWh	10,1	16,1	21,6	∞
2. Tarif d'électricité : 64 FCFA/kWh	14,8	37,5	∞	∞
3. Tarif d'électricité : Avant oct. 2023 : 94 FCFA/kWh Après oct. 2023 : 64 FCFA/kWh	12,5	25,3	∞	∞

En supposant un scénario optimiste où le CES aurait une durée de vie de 16 ans et un faible taux d'actualisation (6%), l'investissement pourrait être justifié dans des conditions spécifiques (Tableau 17). Cependant, dans le scénario le plus réaliste (scénario 3), tenant compte des données disponibles aujourd'hui, la période de récupération actualisée devient infinie, signifiant qu'il est impossible de récupérer l'investissement initial au cours de la durée de vie du système. Toujours dans ce scénario, pour qu'un temps de retour sur investissement actualisée de 20 ans soit atteinte, le taux d'actualisation devrait être inférieur à 3,2 %. Or, un tel taux est irréaliste dans le contexte local, caractérisé par des contraintes économiques et des taux d'intérêt généralement plus élevés. Ces résultats soulignent les défis liés à la rentabilité économique du CES autostockeur dans ce contexte.

L'évaluation économique réalisée suppose que l'hôpital est alimenté de manière continue par le réseau public d'électricité. Cependant, dans la réalité, des délestages fréquents affectent durant la période de pic de chaleur. Dans ces périodes, l'hôpital doit recourir à un groupe électrogène pour garantir la continuité de ses services, ce qui entraîne une augmentation significative du coût réel de l'électricité. La mise en œuvre du système de CES contribue alors à une amélioration notable de la sécurité énergétique de l'établissement. En fournissant une source alternative d'énergie pour la production d'eau chaude, le CES permet de réduire la dépendance au groupe électrogène et les coûts associés à son utilisation. Cependant, bien que ces avantages puissent améliorer le rendement énergétique globale et réduire les dépenses liées aux délestages, la durée annuelle estimée de ces interruptions, en particulier pendant la journée, reste insuffisante pour modifier significativement les conclusions de l'analyse économique initiale.

Le coût du CES à tubes sous-vide proposé comme alternatif étant trois fois plus bas que celui du CES autostockeur existant, son temps de retour simple pour le système devrait être au moins trois fois plus court. Plus précisément, en supposant que le CES à tubes sous-vide puisse générer un minimum de 2070 kWh annuels (énergie générée par l'autostokeur), ce qui est probable, le délai de récupération simple serait d'un maximum de 4,5 ans (Tableau 18, Scénario 2). De même, même dans le pire des cas, avec un taux d'actualisation de 12%, le temps de retour sur investissement actualisé serait de 6,9 ans, ce qui est considéré comme acceptable. Par conséquent, le CES à tubes sous-vide récemment installé apparaît comme un choix adapté pour cette application, en particulier lorsqu'il est comparé au CES autostokeur existant. Ce résultat est similaire à ce qui a été rapporté par Majar [134] dans la région méditerranéenne, lors de la comparaison expérimentale des performances de CES à tubes sous-vide et de CES à capteur plan.

Tableau 18. Buanderie d'hôpital fonctionnant avec le CES à tubes sous-vide : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années.

Scénario	SPP	DPP (i = 6%)	DPP (i = 8%)	DPP (i = 12%)
1. Tarif d'électricité : 94 FCFA/kWh	3,1	3,5	3,7	4,1
2. Tarif d'électricité : 64 FCFA/kWh	4,5	5,4	5,8	6,9

III.2. Chauffe-eau solaire à capteur plan dans un hôtel à Ouagadougou

Le Tableau 19 présente les résultats économiques obtenus pour le CES de l'hôtel. Selon les différents scénarios analysés, la période de récupération simple se situe entre 5 et 6 ans, ce qui est particulièrement encourageant dans le contexte. Cette période indique une capacité du CES à rembourser son investissement initial dans un délai relativement court, favorisant son adoption dans des environnements similaires.

Lorsque la valeur temporelle de l'argent est prise en compte, la période de récupération actualisée varie entre 6 et 10 ans, en fonction des scénarios envisagés et des taux d'actualisation appliqués. En considérant l'espérance de vie de ce CES à capteur plan répondant aux plus hauts standards de l'industrie (~25 ans), cet investissement est économiquement pertinent, même si le temps de retour sur investissement est beaucoup plus long que parfois annoncé pour les hôtels à Ouagadougou [195]. Bien que ces délais puissent sembler peu compétitifs dans des comparaisons globales, ils demeurent pertinents dans le contexte étudié, notamment pour des installations autonomes où les coûts énergétiques conventionnels sont élevés. L'impact

économique devient encore plus significatif lorsqu'il est envisagé à une échelle agrégée. Par exemple, dans le cas de l'hôtel analysé, qui dispose de plusieurs autres CES, l'intégration généralisée de ces systèmes pourrait réduire substantiellement les coûts opérationnels. Il garantit en outre la disponibilité de l'eau chaude pour le confort des clients, même en période de délestage.

Tableau 19. Hôtel : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années. Coût moyen de l'électricité suivant les factures de 2023 : 159 FCFA/kWh.

Scénario	SPP	DPP (i = 6%)	DPP (i = 8%)	DPP (i = 12%)
1. Moyenne des économies d'énergie mesurées sur 2020–2023 : 769 kWh/an	5,3	6,6	7,6	9,0
2. Moyenne des économies d'énergie mesurées sur 2022–2023 : 785 kWh/an	6,3	6,6	7,5	9,9
3. Économies mesurées (2020 : 830 kWh ; 2021 : 674 kWh ; 2022 : 719 kWh ; 2023 : 851 kWh) + moyenne sur 2020–2023 pour les années suivantes (769 kWh/an)	5,2	6,4	7,3	8,7

III.3. Chauffe-eau solaire à tubes sous-vide dans un ménage à Lomé

Les résultats présentés dans le Tableau 20 mettent en évidence des variations marquées dans les temps de retour sur investissement du CES à tubes sous-vide pour le ménage de Lomé, en fonction des méthodes de chauffage conventionnelles utilisées.

Tableau 20. Ménage à Lomé : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années.

Scenario	SPP	DPP (i = 6%)	DPP (i = 8%)	DPP (i = 10%)
1. Chauffe-eau électrique	2,4	2,6	2,7	2,9
2. Gaz	5,0	6,1	6,7	7,3
3. Charbon de bois	6,3	8,2	9,2	10,6

Parmi les configurations analysées, le CES se distingue par ses performances économiques les plus favorables quand il est comparé à un chauffe-eau électrique. Avec temps de retour sur

investissement simple de 2,4 ans et un temps de retour sur investissement actualisé de 2,9 ans à un taux d'actualisation de 10 %, cette combinaison offre un retour sur investissement rapide.

En revanche, l'association du CES avec un chauffage au charbon de bois entraîne une dégradation significative des performances économiques. Avec temps de retour sur investissement simple de 6,3 ans et un temps de retour sur investissement actualisé de 10,6 ans, cette option présente des délais de récupération sensiblement plus longs. Ces résultats restent susceptibles de freiner les investissements initiaux pour les CES, surtout quand on est dans les hypothèses prenant en compte la valeur temporelle de l'argent (Tableau 20). De manière similaire, les performances obtenues pour le chauffage au gaz reflètent des délais de récupération intermédiaires, qui, bien que légèrement meilleurs que ceux du charbon de bois, restent susceptibles de produire les mêmes hésitations.

Ces résultats confirment la compétitivité sur viabilité économique du CES, en particulier lorsqu'il est considéré comme alternative au chauffe-eau électrique. Toutefois, une adoption généralisée de ce système nécessitera de prendre en compte plusieurs facteurs contextuels, notamment les coûts locaux des différentes sources d'énergie, la disponibilité et l'accessibilité des mécanismes de financement, ainsi que le niveau de sensibilisation des utilisateurs aux avantages économiques à long terme de cette technologie. Une approche stratégique intégrant ces dimensions pourrait favoriser une transition énergétique plus rapide et durable des CES.

III.4. Chauffe-eau solaire à capteur plan dans un ménage à Ouagadougou

Les résultats présentés dans Tableau 21 le mettent en évidence des variations marquées dans les temps de retour sur investissement du CES à capteur plan pour le ménage de Ouagadougou, en fonction des méthodes de chauffage conventionnelles utilisées.

Tableau 21. Ménage à Ouagadougou : temps de retour sur investissement (SPP) et temps de retour sur investissement actualisé (DPP) en années.

Scenario	SPP	DPP (i = 6%)	DPP (i = 8%)	DPP (i = 12%)
1. Chauffe-eau électrique	2,7	3,0	3,1	3,4
2. Gaz	7,6	10,5	12,3	21,9
3. Charbon de bois	4,8	5,8	6,2	7,5

Le CES montre des performances économiques intéressantes, surtout par rapport à l'électricité. Avec un temps de retour sur investissement rapide, il constitue une option viable pour les

ménages cherchant à réduire leurs coûts énergétiques à moyen terme. Le temps de retour sur investissement simple de 2,7 ans et le temps de retour sur investissement actualisé de 3 à 3,4 ans dans ce cas sont similaires à ceux observés à Lomé, où l'électricité est légèrement plus chère. Cependant, l'attractivité économique du CES diminue face aux combustibles comme le gaz ou le charbon de bois, bien que ceux-ci présentent des désavantages environnementaux significatifs. Pour les scénarios de gaz et de charbon de bois, les temps de retour sur investissement actualisés sont plus élevés à Ouagadougou (jusqu'à 21,9 ans pour le gaz), ce qui reflète une subvention énergétique plus favorable et un usage moins courant du charbon de bois. Cela met en lumière l'importance de subventions ou d'incitations pour rendre le CES plus compétitif dans les contextes où ces combustibles dominent.

IV. ANALYSE DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES

Les émissions de CO₂ évitées par an grâce aux CES étudiés sont présentées dans le Tableau 22. Le Tableau 23 reprend les mêmes données en nombre d'arbres plantés par an, chaque arbre étant supposé mature, et absorbant 25 kg de CO₂/an, comme généralement admis.

Tableau 22. Emissions de CO₂ évitées grâce aux CES.

Installation de CES	Chaleur totale fournie au cours d'une année [kWh]	Émission de CO ₂ évitée [tCO ₂]		
		Électricité	Gaz	Charbon de bois
Buanderie de l'hôpital	2070	1,30	-	-
Hôtel	769	0,42	-	-
Ménage à Ouagadougou	1243	0,75	0,44	1,79
Ménage à Lomé	1055	0,22	0,37	1,50

Tableau 23. Emissions de CO₂ évitées grâce aux CES exprimées en nombre d'arbres plantés par an.

Installation de CES	Chaleur totale fournie au cours d'une année [kWh]	Émission de CO ₂ évitée [Nombre d'arbres plantés par an]		
		Électricité	Gaz	Charbon de bois
Buanderie de l'hôpital	2070	52	-	-
Hôtel	769	17	-	-
Ménage à Ouagadougou	1243	30	18	72
Ménage à Lomé	1055	9	15	60

L'énergie conventionnelle déplacée par le CES de la buanderie de l'hôpital est beaucoup plus importante que celle des autres CES, notamment à cause de la taille importante du capteur ($2,8 \text{ m}^2$) par rapport aux autres, et aussi de la sollicitation importante du système (fonctionnement quasi-continue au cours de la journée). Cela se traduit également en impact environnement positif important, notamment quand l'énergie conventionnellement considérée est l'électricité, produite essentiellement au Burkina Faso à partir de combustibles fossiles, qui contribuent fortement aux émissions de gaz à effet de serre : une cinquantaine d'arbre plantés par an.

Lorsqu'on considère les installations domestiques au niveau desquelles le CES peut avoir remplacé des sources comme le charbon de bois, les émissions nettement plus élevées du chauffage au charbon de bois mettent en évidence son caractère non durable et renforcent la nécessité de trouver des solutions plus propres. Bien que le CES présente des périodes de récupération plus longues vis-à-vis l'option du chauffage de l'eau au charbon de bois par rapport l'électricité, son impact en termes d'avantages environnementaux est beaucoup plus excellent : 60 arbres plantés par an, en considérant le CES dans le ménage de Lomé. Ainsi, l'adoption des CES est non seulement économiquement viable, mais également essentielle pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

V. CONCLUSION

Ce chapitre a été l'occasion d'analyser les performances techniques, économiques et environnementales de quatre CES dans le contexte ouest-africain, notamment à Ouagadougou et à Lomé. Ces études de cas sur l'utilisation CES révèlent des résultats intéressants, mais aussi des défis notables qui influencent leur efficacité et viabilité économique.

À la buanderie d'hôpital à Ouagadougou, le CES autostockeur a un rendement annuel de 38 %, mais le taux de couverture solaire reste faible à 17 %. Bien que l'impact environnemental soit positif avec 1,3 t de CO_2 évitée par an, le temps retour sur investissement est trop long et l'investissement est difficilement rentable. En comparaison, le CES à tubes sous-vide alternatif proposé offre une meilleure performance, avec une période de retour sur investissement entre 3 et 4,5 ans. Ce système a un potentiel notable d'amélioration dans les hôpitaux sahéliens, où la demande en eau chaude est constante.

Au niveau de l'hôtel à Ouagadougou, le CES à capteur plan industriel installé a montré un rendement annuel modeste, variant entre 14 % et 17 % sur une période de 4 ans. Ce système a été confronté à des pertes thermiques importantes, atteignant 30 % à 50 % au niveau du

réservoir. Le système est également ombragé et peu entretenu. Cependant, malgré ces pertes, l'économie d'énergie reste significative, avec environ 0,42 t de CO₂ évitée par an. Les périodes de retour sur investissement varient entre 5 et 10 ans. La consommation saisonnière d'eau chaude, marquée par un pic en saison froide, souligne l'importance de la gestion et de la maintenance du système pour optimiser son rendement.

Le CES installé dans un ménage à Lomé présente des résultats impressionnants avec un rendement annuel de 39 %, permettant des températures de sortie entre 30°C et 70°C. Ce système est particulièrement performant pendant les saisons sèches, avec un retour sur investissement rapide de 2,4 ans lorsqu'il est comparé à un chauffe-eau électrique. temps de retour sur investissement actualisé s'établit à 2,9 ans. L'impact environnemental est notable, avec une réduction de 0,22 t de CO₂ par an comparé à un chauffage électrique, et de 1,5 tonne par rapport au chauffage au charbon.

L'analyse des installations de CES a révélé plusieurs aspects cruciaux, notamment en ce qui concerne l'entretien des systèmes, un facteur déterminant pour la performance à long terme. Aucune des installations étudiées ne bénéficie d'un entretien régulier, ce qui entraîne des pertes considérables, en particulier pour les systèmes installés dans le secteur tertiaire, où l'entretien aurait été essentiel pour maintenir des rendements élevés. Cela est particulièrement vrai pour le Sahel, où l'atmosphère est très chargée en poussière, un facteur qui accélère l'encrassement des capteurs. Un exemple marquant de l'impact de l'absence d'entretien est l'installation de l'hôtel à Ouagadougou, qui présente une performance très faible, en particulier en raison du manque d'entretien et de l'ombrage de la zone d'installation. Cette installation affiche une production spécifique de seulement 340 kWh/m², soit bien inférieure à la moitié de la performance annoncée par le fabricant, et bien en deçà des performances des autres systèmes étudiés, qui varient entre 640 et 690 kWh/m². Néanmoins, malgré ces faibles performances, l'étude démontre que toutes les applications étudiées sont viables économiquement, aussi bien à Lomé qu'à Ouagadougou.

Les résultats expliquent, au moins en partie, la domination des CES à tubes sous-vide constatée lors de l'enquête de terrain. Ce succès est en grande partie dû à leur prix plus avantageux par rapport aux capteurs plans, qu'ils soient industriels importés ou fabriqués localement. D'un point de vue économique, le CES utilisé à Lomé, malgré un climat moins favorable que celui de Ouagadougou, présente de très bonnes performances économiques. De plus, le remplacement du système autostockeur de la buanderie de l'hôpital à Ouagadougou, qui n'était

pas rentable, par un CES à tubes sous-vide a permis d'améliorer de manière significative la rentabilité économique du système. En termes de performances techniques et économiques, ces systèmes se montrent très compétitifs, non seulement en raison de leur coût d'installation plus faible, mais aussi grâce à une efficacité énergétique comparable, voire supérieure dans certains cas, à celle des systèmes plus chers. En revanche, bien que des comparaisons strictes entre installations de même type aient été difficiles à établir, il semble que ces chauffe-eaux solaires soient particulièrement adaptés à des applications de grande échelle, comme dans le cas de l'hôpital.

Il est aussi important de souligner que la période critique pour la conception et l'optimisation des systèmes se situe entre juin et septembre, particulièrement en août, mais aussi pendant l'harmattan, que l'on soit à Lomé ou à Ouagadougou.

Enfin, du point de vue environnemental, l'impact des chauffe-eaux solaires est significatif. Chaque installation permet de réduire l'empreinte carbone en remplaçant, chaque année, l'équivalent de plusieurs dizaines d'arbres plantés. Cet aspect montre l'importance de promouvoir ces technologies pour contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la lutte contre la déforestation dans la région.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette thèse a exploré l'utilisation et la performance des chauffe-eaux solaires (CES) dans le contexte ouest-africain, en se concentrant sur les villes de Ouagadougou (Burkina Faso) et Lomé (Togo). L'objectif était de contribuer à la valorisation des technologies solaires thermiques, en particulier des CES, en Afrique de l'Ouest. Les résultats révèlent une diversité importante aussi bien au niveau de l'adoption que dans la performance des systèmes, qui varient en fonction des contextes géographiques, économiques et techniques.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu des systèmes de chauffe-eau solaire en Afrique de l'Ouest et décrit les cadres politiques et techniques existantes, en mettant en évidence les politiques énergétiques régionales et les mesures de soutien. Plusieurs lacunes dans la littérature existante ont été mises en lumière, notamment l'absence d'évaluations empiriques à long terme des performances des CES dans des conditions réelles, particulièrement dans les environnements sahéliens et côtiers. L'étude a souligné le manque de données locales sur la consommation d'eau chaude et le besoin de mieux adapter les systèmes aux conditions spécifiques des climats ouest-africains. Ce chapitre a mis en évidence la nécessité de mener des études empiriques pour valider les modèles de simulation et optimiser les systèmes pour l'Afrique de l'Ouest.

Dans le chapitre 2, nous avons exploré les habitudes d'utilisation de l'eau chaude à Ouagadougou et Lomé, en identifiant les différences dans les sources d'énergie utilisées pour le chauffage de l'eau. À Ouagadougou, le gaz est largement préféré, tandis qu'à Lomé, le charbon de bois est prédominant. La faible adoption des CES, malgré leur potentiel, est attribuée à des coûts initiaux élevés et à un manque de sensibilisation environnementale. Bien que l'adoption des CES reste faible dans les deux villes (9% à Ouagadougou et 0,4% à Lomé), Ouagadougou présente des perspectives encourageantes grâce au soutien des politiques et à son accessibilité. Les politiques différentes en matière de préservation de l'environnement ont montré leurs impacts différents dans les deux contextes. Bien que la satisfaction des utilisateurs reste élevée, les résultats ont également montré que la performance des CES est affectée par des problèmes techniques, tels que des systèmes sous-dimensionnés et des pannes fréquentes. L'enquête confirme la place dominante des CES à tubes sous-vide, qui ont conquis le marché au cours de la dernière décennie.

Dans le chapitre 3, ont été présentés quatre CES analysés dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'un CES autostockeur installé dans une buanderie d'hôpital, d'un CES à capteur plan destiné au confort des hôtes dans un hôtel, et d'un autre à capteur plan pour la production d'eau chaude domestique dans un ménage, tous situés à Ouagadougou, d'une part, et d'un CES à tubes sous-

vide destiné à un ménage à Lomé. Il met en évidence la diversité géographique, fonctionnelle et technologique des systèmes, et décrit la méthodologie de collecte de données et d'évaluation des performances, intégrant des aspects techniques, économiques et environnementaux.

Dans le chapitre 4, l'évaluation de la performance de quatre CES dans différents contextes a été détaillée, avec des résultats contrastés. Le CES installé dans une buanderie d'hôpital à Ouagadougou, malgré un rendement annuel de 38 %, présente un faible taux de couverture solaire et un retour sur investissement trop long. En revanche, un système à tubes sous-vide installé dans un ménage à Lomé a montré une meilleure performance, avec un rendement annuel de 39 % et un retour sur investissement de 2,4 ans. L'impact environnemental des CES s'est avéré significatif, avec des réductions de CO₂ notables, bien que la gestion et la maintenance des systèmes restent des défis à surmonter. Les hôtels et les hôpitaux représentent des secteurs d'application prometteurs pour les CES, mais des améliorations dans la gestion et l'entretien des systèmes sont cruciales pour maximiser leur efficacité.

Contrairement à la majorité des études existantes, qui se basent souvent sur des simulations ou des essais en laboratoire, cette étude présente une analyse détaillée des performances des CES dans des environnements réels à Ouagadougou et Lomé. En utilisant des études de cas dans des installations diverses (hôpitaux, hôtels, ménages), la recherche fournit des données empiriques cruciales sur l'efficacité des CES en milieu urbain en Afrique de l'Ouest, une région qui reste sous-étudiée à ce niveau. Il s'agit d'une des premières études qui démontre de manière empirique la viabilité économique des CES dans différentes applications et conditions en Afrique de l'Ouest. L'étude montre l'importance du choix de la technologie adaptée à l'application envisagée. Elle met également en évidence les principaux obstacles à l'adoption des CES dans les deux villes, notamment les coûts initiaux élevés, la faible sensibilisation environnementale et les problèmes techniques récurrents. Elle analyse aussi les différences dans les choix des sources d'énergie entre Ouagadougou et Lomé, révélant l'impact des politiques publiques et du soutien financier sur l'adoption de ces technologies. Un autre apport de ce travail est l'analyse de l'impact environnemental des CES. En comparant les émissions de CO₂ évitées par l'utilisation de ces systèmes par rapport aux solutions traditionnelles (chauffe-eau électriques, charbon de bois), cette recherche met en lumière l'importance des CES pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Sur la base des résultats obtenus, plusieurs recommandations pratiques visant à améliorer l'adoption des CES en Afrique de l'Ouest sont formulées. Ces recommandations incluent la réduction des coûts d'acquisition, l'amélioration de la fiabilité technique des systèmes, la mise en place de mécanismes de maintenance adaptés

et l'élargissement de la sensibilisation au niveau des consommateurs. Enfin, cette thèse enrichit la littérature sur les technologies solaires en élargissant l'analyse au contexte particulier des pays en développement d'Afrique de l'Ouest.

En résumé, ce travail offre une analyse détaillée des performances des chauffe-eaux solaires en Afrique de l'Ouest, en fournissant des bases solides pour la diffusion de ces technologies dans la région, tout en contribuant à la littérature scientifique sur les défis et les opportunités liés à la transition énergétique dans les pays en développement.

Cependant, plusieurs limites doivent être prises en compte pour interpréter les résultats et orienter les futures recherches sur le sujet. D'abord, l'étude repose sur des échantillons restreints à deux villes. Ensuite, elle couvre une période de 12 mois, ce qui ne permet pas de prendre en compte ni les performances des systèmes sur le long terme ni les défaillances potentielles. Par ailleurs, l'analyse des facteurs sociaux et économiques qui influencent l'adoption des CES s'appuie sur des données d'enquête, mais ces données peuvent être influencées par des biais de réponses, comme les perceptions individuelles de l'énergie solaire, les influences culturelles et les priorités économiques des foyers.

Ces limitations suggèrent qu'il serait nécessaire de mener des recherches supplémentaires pour approfondir certains aspects, notamment ceux liés à la durabilité, à l'impact social et aux coûts à long terme des chauffe-eaux solaires dans des contextes plus diversifiés en Afrique de l'Ouest. Il s'agit notamment de l'extension de l'étude à d'autres régions du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest, y compris dans les zones rurales où l'accès à l'énergie est souvent limité. Des recherches futures pourraient inclure une étude comparative entre les CES et d'autres technologies de chauffage de l'eau, comme les chauffe-eaux alimentés par l'énergie photovoltaïque. Il importe également de conduire des études approfondies sur la durée de vie des équipements solaires dans des conditions climatiques variées afin de rendre plus pertinents les analyses économiques.

L'étude suggère quelques pistes d'action pour améliorer l'adoption des CES. Il y a notamment le renforcement des politiques publiques et des incitations financières, la sensibilisation sur les avantages des CES, en mettant l'accent sur les économies d'énergie et le confort –puisque l'enquête a montré la sensibilité des consommateurs à ces arguments– le développement de réseaux de maintenance et de support technique, le renforcement des capacités de recherche et d'innovation, et la résurrection de l'industrie locale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Tappan GG, Cushing WM, Cotillon SE, Hutchinson JA, Pengra B, Alfari I, et al. Landscapes of West Africa: A window on a changing world 2016. <https://doi.org/10.5066/F7N014QZ>.
- [2] United Nations. Average annual rate of population change by region, subregion and country, 1950-2100 (percentage) 2019. [https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20\(Standard\)/EXCEL_FILES/1_Population/WPP2019_POP_F02_POPULATION_GROWTH_RATE.xlsx](https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20(Standard)/EXCEL_FILES/1_Population/WPP2019_POP_F02_POPULATION_GROWTH_RATE.xlsx).
- [3] Paice E. By 2050, a quarter of the world's people will be African – this will shape our future. The Guardian 2022. <https://www.theguardian.com/global-development/2022/jan/20/by-2050-a-quarter-of-the-worlds-people-will-be-african-this-will-shape-our-future>.
- [4] Schmidt P, Muggah R. Climate change and security in West Africa. Rio de Janeiro: Igarapé Institute; 2021.
- [5] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2020. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf>.
- [6] Maji IK, Sulaiman C, Abdul-Rahim AS. Renewable energy consumption and economic growth nexus: A fresh evidence from West Africa. Energy Rep 2019;5:384–92. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.03.005>.
- [7] Ndour PA. Energy Situation Report – West Africa 2016. https://e4sv.org/wp-content/uploads/2016/10/West-Africa-Energy-Report-AW-Draft-3-200516-V3_MT.pdf (accessed March 27, 2022).
- [8] Bauer H. Solar water heating for increasing power reserves in West Africa 2020. www.ecreee.org/sites/default/files/role_of_solar_water_heating_in_increasing_power_reserves_in_national_grids_-_hannes_bauer_ecreee.pdf.
- [9] N'Tsoukpoe KE, Bambara B, Gaye M. Rapport de l'étude de marché du solaire thermique: production d'eau chaude et de séchage de produits agricoles au Burkina Faso 2015. <https://www.aee-intec.at/0uploads/dateien1211.pdf>.
- [10] Weiss W, Spörk-Dür M. Solar Heat Worldwide, Edition 2024. Global market development and trends 2023. Detailed market figures 2022. Graz, Austria: IEA Solar Heating and Cooling Programme; 2024.
- [11] N'Tsoukpoe KE, Lekombo SC, Kemausuor F, Ko GK, Diaw EHB. Overview of solar thermal technology development and applications in West Africa: Focus on hot water and its applications. Sci Afr 2023;21:e01752. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01752>.
- [12] United Nations Environment Programme. UNEP Solar Water Heating – A strategic planning guide for cities in developing countries 2015. http://solarheateurope.eu/wp-content/uploads/2017/06/unep_report_cities_final_zp.pdf.
- [13] Weiss W, Spörk-Dür M. Solar Heat Worldwide, Edition 2021. Global market development and trends in 2020. Detailed market figures 2019 2021. <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2021.pdf> (accessed March 27, 2022).
- [14] Weiss W, Spörk-Dür M. Solar Heat Worldwide, Edition 2022. Global market development and trends in 2021. Detailed market figures 2020 2022. https://www.ises.org/sites/default/files/uploads/Presentation%20Werner%20Weiss_IEA%20SHC%20Solar%20Academy_Solar%20Heating%20and%20Cooling%20Markets%20and%20Industry%20Trends.pdf (accessed March 27, 2022).
- [15] Huang J, Fan J, Furbo S, Li Q. A policy study on the mandatory installation of solar water heating systems – Lessons from the experience in China. Sol Energy 2020;206:614–27. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.049>.
- [16] Farirai F, Shonhiwa C, Chikuruwo T, Nyoni S. A bankable proposal for solar thermal technologies in Zimbabwe. A viability assessment of solar water heating in Zimbabwe through financial models, monitoring and evaluation and implementation framework development. Government of Zimbabwe; 2021.
- [17] Chiguvare Z, Ileka H. A Vision of Namibia's Solar Thermal Energy Future. A Vision of Namibia's Solar Thermal Energy Future 2018.
- [18] South African Department of Energy. National Solar Water Heater Programme 2009. http://www.energy.gov.za/files/swh_frame.html (accessed September 3, 2022).
- [19] Trabacchi C, Micale V, Frisari G. San Giorgio Group Case Study: Prosol Tunisia. Climate Policy Initiative for the San Giorgio Group; 2012.
- [20] National Agency for Energy Conservation. Residential Solar Energy 2021. <http://www.anme.tn/?q=en/projets/residential-solar-energy/residential-solar-energy> (accessed September 4, 2022).
- [21] World Population Review. Hottest Countries in the World 2022 2022. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/hottest-countries-in-the-world> (accessed January 1, 2024).
- [22] Lebanese Economy Forum. Average yearly temperature (1961-1990, Celsius) - by country 2015. <https://web.archive.org/web/20150711150747/http://lebanese-economy-forum.com/wdi-gdf-advanced-data-display/show/EN-CLC-AVRT-C/> (accessed September 7, 2022).

- [23] The East African. Kenya's solar panel law takes effect. East Afr 2020. <https://www.theeastafrican.co.ke/tea/business/kenya-s-solar-panel-law-takes-effect-1365470> (accessed October 20, 2022).
- [24] Energy Water and Sanitation Authority (EWSA). National program for development of solar water heaters market in Rwanda SolaRwanda program 2014. www.reg.rw/fileadmin/user_upload/Article_on_SWH.pdf.
- [25] Stock R. Africa South of the Sahara: a geographical interpretation. 3rd ed. New York, USA: Guilford Press; 2013.
- [26] Ojo OS, Adeyemi B, Ogolo EO. Geostatistical Distribution of Net Radiation at Different Sky Conditions over West Africa. *Earth Syst Environ* 2021;5:43–57. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00200-1>.
- [27] Parker DJ, Diop-Kane M. Meteorology of Tropical West Africa: The Forecasters' Handbook. John Wiley & Sons; 2017.
- [28] CILSS. Landscapes of West Africa-A window on a changing world / Population 2016. <https://eros.usgs.gov/westafrica/population> (accessed October 20, 2022).
- [29] RETScreen® International Clean Energy Decision Support Centre. Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Textbook. 3rd ed. Quebec : Natural Resources Canada; 2005.
- [30] World Energy Council. 2004 Survey of energy resources. 20th ed. London, UK: Elsevier; 2004.
- [31] Sawadogo W, Abiodun BJ, Okogbue EC. Impacts of global warming on photovoltaic power generation over West Africa. *Renew Energy* 2020;151:263–77. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.032>.
- [32] GIZ. Solar water heaters (SWH) for shaving of electricity peak load and CO₂ reduction: development of recommendations for interventions to promote the use of solar water heaters in residential buildings and educational buildings 2013.
- [33] IEA, IRENA, UNSD, World Bank, WHO. Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2021. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/SDG7_Tracking_Progress_2021.pdf.
- [34] The World Bank. Development Projects: Solar Development in Sub-Saharan Africa - Phase 1 (Sahel) - P162580. Project Information Document/ Integrated Safeguards Data Sheet (PID/ISDS) 2018. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/721961580913680829/pdf/Project-Information-Documents-Integrated-Safeguards-Data-Sheet-Solar-Development-in-Sub-Saharan-Africa-Phase-1-Sahel-P162580.pdf>.
- [35] Adeoye O, Spataru C. Quantifying the integration of renewable energy sources in West Africa's interconnected electricity network. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;120:109647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109647>.
- [36] Benson EA. 10 countries with the most expensive household electricity prices in Africa. *Bus Insid Afr* 100AD. <https://africa.businessinsider.com/local/markets/10-countries-with-the-most-expensive-household-electricity-prices-in-africa/0emmkkk> (accessed March 27, 2022).
- [37] Electricity prices around the world 2022. https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/ (accessed March 27, 2022).
- [38] Atsu D, Yankey KI, Nyarko AK, Parbey J, Okoh AE. Ghana Market report on solar thermal water heating and drying of agricultural products. Koforidua, Ghana: Koforidua Polytechnic School; 2015.
- [39] Energy Commission Ghana. Average electricity end-user tariff | Ghana Open Data Initiative 2022. <https://data.gov.gh/sites/default/files/Average%20Electricity%20End-User%20Tariff.csv> (accessed April 12, 2022).
- [40] Chitou SM, Gbandey GT. Atlas de l'énergie dans l'espace UEMOA – Rapport 2020. Québec, Canada: Institut de La Francophonie Pour Le Développement Durable (IFDD); 2020.
- [41] The World Bank. Doing Business 2022. <https://archive.doingbusiness.org/en/doingbusiness> (accessed October 19, 2022).
- [42] WHO. Household air pollution and health 2020. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health> (accessed June 13, 2022).
- [43] CEREEC. Politique d'énergies renouvelables de la CEDEAO. Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency , Praia, Cap-Vert: 2015. <https://www.ecreee.org/download/97/policies-documents/17442/ecowas-renewable-energy-policy-fr.pdf>
- [44] SE4ALL. Action agenda for the sustainable energy for all - Cape Verde 2015. https://www.se4all-africa.org/fileadmin/uploads/se4all/Documents/Country_AAs/Action_Agenda_Sustainable_Energy_4_All_SE4ALL_CBV_-_Eng.pdf.
- [45] Arrêté interministériel No. 134 /MPEER/MCLU du 18 novembre 2020 fixant les mesures d'efficacité énergétique dans le bâtiment, leur domaine d'application, ainsi que les modalités d'évaluation de la conformité. République de Côte d'Ivoire. 2022. https://www.dgenergie.ci/fichiers_uploades/files/Arrete-interministeriel-n-134-MPEER-MCLU-EE-BAT.pdf.
- [46] Association senegalaise de normalisation (ASN). catalogue des normes sénégalaises 2017.
- [47] Ghana Standards Authority (GSA). Catalogue of Ghana standards 2018.

- [48] Agence Togolaise d'Electrification Rurale et des. Energies Renouvelables (AT2ER). Projet d'appui au volet social du programme CIZO d'électrification rurale du Togo (PRAVOST): Composante 1 . Spécifications techniques des chauffe-eaux solaires pour les centres de santé 2020.
- [49] Ministère de l'Energie, des Recherches Pétrolières et Minières, de l'Eau et du Développement des Energies. Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER) - Benin - Période [2015-2020-2030] 2015.
- [50] Bénin. Présidence de la République. Loi n° 2019 - 46 du 27 décembre 2019 portant loi de finances, pour la gestion 2020. Article 14. 2019.
- [51] Ministère des Mines et de l'Energie. Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER) - Burkina Faso - Période [2015-2020-2030] 2015.
- [52] Ministère de l'Energie. Stratégie dans le domaine de l'énergie 2019-2023 2018.
- [53] Assemblée Nationale du Burkina Faso. Loi n°058-2017/AN portant code général des impôts du Burkina Faso 2017.
- [54] Burkina Faso. Le Ministre de l'énergie, Le Ministre de l'Economie, des Finances et du Développement, Le Ministre du Commerce, de l'Industrie et de l'artisanat. Arrêté interministériel n°2020-033/ME/MINEFID/MCIA du 16 mars 2020 portant conditions d'éligibilité et modalités de jouissance de l'exonération de la Taxe sur la Valeur Ajoutée sur les importations et les ventes de matériel solaire. 2020.
- [55] Assembleia Nacional de Cabo Verde. Lei 86/IX/2020. Bol Of Sér Número 53 Repúb Cabo Verde 2020.
- [56] Assembleia Nacional de Cabo Verde. Lei 16/X/2022. Bol Of Sér Número 125 Repúb Cabo Verde 2022.
- [57] Ministère des Mines et de l'Energie. Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER) - Côte d'Ivoire - Période [2015-2020-2030] 2016.
- [58] Republic of the Gambia. Ministry of Energy. Renewable Energy Act 2013. 2013.
- [59] Gambia Investment & Export Promotion Agency. Solar energy in The Gambia 2022.
- [60] Action agenda for the sustainable energy for all - The Gambia 2015.
- [61] Ministry of Power. National Renewable Energy Action Plans (NREAPs) - Ghana: Period [2015-2020] 2015.
- [62] Energy Commission of Ghana. Ghana. Sustainable Energy For All Action Plan 2012.
- [63] Ministério da Energia e Indústria. Plano de Ação Nacional no Sector das Energias Renováveis (PANER) da Guiné-Bissau: Period 2015-2030 2017.
- [64] Ministry of Lands, Mines and Energy. National Renewable Energy Action Plans (NREAPs) - Liberia: Period 2015-2020/2030 2015.
- [65] Republic of Liberia. Executive order n° 107 suspending tariffs on off-grid solar renewable energy products. April 27th, 2022. 2023.
- [66] ECREEE. Technical Assistance Facility for the Sustainable Energy for All Initiative West and Central Africa. Elaboration of SE4ALL Investment Prospectuses in 8 of 15 ECOWAS member states SE4ALL Investment Prospectus for Liberia 2017.
- [67] IRENA. Planning and prospects for renewable power: West Africa 2018. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Planning_West_Africa_2018.pdf (accessed June 19, 2022).
- [68] République du Mali. Présidence de la République. Mali. Exonération de TVA des équipements d'énergies renouvelables. Ord onnance n°2020-012/P-RM du 23 mars 2020. 2020.
- [69] Département régional Ouest II (ORWB), The African Development Bank Group. Stratégie de développement de la maîtrise de l'énergie au Mali 2010.
- [70] Ministère de l'Energie et de l'Eau. Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER) - Mali - Période [2015-2020/2030] 2015.
- [71] Ministère de l'Energie et de l'Eau. Programme d'Action National d'Energie Durable pour Tous (SE4ALL) du Mali. Période [2015-2020/2030]. Version finale 2015.
- [72] Sanogo CA. Promotion des marchés des chauffe-eau solaires (CES). Fiche technique PRISME – Les technologies à haute performance énergétique - Fiche N° 12 2018.
- [73] Ministère de l'Energie et du Pétrole. Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER) - Niger - Période [2015-2020/2030] 2015.
- [74] République du Niger. Loi n° 2016-05 du 17 mai 2016 portant Code de l'Electricité. 2016.
- [75] République du Niger, La Ministre de l'Energie et le Ministre des Finances. Arrêté Conjoint n°0029/ME/MF du 13 septembre 2017 portant liste des équipements et matériels à énergies renouvelables à exonérer des droits et taxes perçus en douane. 2017.
- [76] Ministry of Lands, Mines and Energy. National Renewable Energy Action Plans (NREAP) for Nigeria (2015-2030). First version 2016.
- [77] Dina TO. Presentation on the status of solar water heater in Nigeria 2018.

- [78] GOPA Consultants and intec. Nigerian energy support programme (NESP) – Component 4: Capacity development – Training needs assessment for renewable energy, rural electrification and energy efficiency in Nigeria 2014.
- [79] Federal Ministry of Power, Works and Housing (Housing Sector). Federal Republic of Nigeria National Building Energy Efficiency Code. First edition 2017 2017.
- [80] Ministère de l’Energie et du Développement des Energies Renouvelables. Plan d’Actions National des Energies Renouvelables (PANER) - Sénégal - Période [2015-2020/2030] 2015.
- [81] République du Sénégal. Le Ministre des Finances et du Budget, Le Ministre du Pétrole et des Energies. Arrêté interministériel fixant la liste des matériels destinés à la production d’énergies renouvelables exonérés de la taxe sur la valeur ajoutée. 2020.
- [82] Agence pour l’Economie et la Maîtrise de l’Energie. Stratégie de Maîtrise de l’Energie du Sénégal (SMES). Rapport Final 2013.
- [83] Ministry of Energy. National Renewable Energy Action Plan (NREAP) - Republic of Sierra Leone: Period [2015-2020/2030] 2015.
- [84] Ministry of Energy and Water Resources. Sierra Leone national energy strategic plan 2009.
- [85] Ministère des Mines et de l’Energie. Plan d’Actions National des Energies Renouvelables (PANER) - Togo - Période [2015-2020-2030] 2015.
- [86] Togo First. Togo : 7,9 milliards FCFA pour le volet social du Projet CIZO 2019. <https://www.togofirst.com/fr/energies/1712-4601-togo-7-9-milliards-fcfa-pour-le-volet-social-du-projet-cizo> (accessed June 20, 2022).
- [87] Ramsay D. In Cabo Verde, tourism and trade at a crossroads. Trade Dev News 2020.
- [88] International Trade Administration U.S. Department of Commerce. Cabo Verde - Tourism 2022.
- [89] Barbosa A. Cabo Verde Market report on solar thermal water heating and drying of agricultural products. Cabo Verde: University of Cabo Verde; 2015.
- [90] da Rocha Nascimento CMF. Indústria Solar Térmica em Cabo Verde: Potencialidade do Mercado. Master thesis. Universidade de Aveiro, 2008.
- [91] Navarro RP, López MG, Barbosa A. Estudio de potencial de utilización de calor solar para procesos industriales en Canarias y Cabo Verde. CIES2020 - XVII Congr. Ibérico E XIII Congr. Ibero-Am. Energ. Sol., Lisbon, Portugal: 2020, p. 1259–65. <https://doi.org/10.34637/cies2020.2.4149>.
- [92] OPAÍS.cv R|. Formação profissional: 15 técnicos concluem formação no CERMI. J OPAÍScv 2019. <https://opais.cv/formacao-profissional-15-tecnicos-concluem-formacao-no-cermi/01/01/2019/> (accessed September 10, 2022).
- [93] HPW AG. HPW Fresh & Dry - Ghana – HPW AG 2022. <https://www.hpwag.com/en/about-us/hpw-fresh-dry-ghana/> (accessed August 7, 2022).
- [94] Ghana Ministry of Energy. Ghana renewable energy master plan 2019.
- [95] Solarthermalworld. Global PVT market on track for more growth 2021.
- [96] Nana M, Nounoun S. Etude sur la volonté et la capacité financière des populations en milieu rurale et périurbain à s’offrir les produits et services de qualité en énergies renouvelables: Rapport Final 2020.
- [97] Ministère de l’Environnement, de l’Économie Verte et du Changement Climatique du Burkina Faso. Premier rapport biennal actualisé (PRBA) du Burkina Faso sous la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) 2021.
- [98] International Monetary Fund. Burkina Faso: Strategy for Accelerated Growth and Sustainable Development 2011–2015. Country Report No. 12/123, International Monetary Fund; 2012. <https://www.imf.org/external/pubs/ft/scr/2012/cr12123.pdf>.
- [99] SEforALL. Sustainable Energy for All Rapid assessment and gap analysis –The Gambia 2012.
- [100] Nikos S, Paco D, Mayer-Tasch L, Sokona MY, Weisman N, Owusu-Nyanteky. Regional Progress Report on Renewable Energy, Energy Efficiency and Energy Access in ECOWAS region. Monitoring year: 2016. Praia, Cabo Verde: ECOWAS Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency (ECREEE); 2018.
- [101] Ministère du Cadre de Vie et du Développement Durable du Bénin. Promotion des chauffe-eau solaires pour l’atteinte des ODD et des objectifs du PAG: description de la technologie 2021.
- [102] Présidence de la République du Bénin. État de mise en oeuvre du programme d’action du gouvernement 2016-2021. Électricité 2020.
- [103] Groupe de la Banque Africaine de Développement. Projet d’appui au volet social du programme CIZO d’électrification rurale du Togo (PRAVOST): Rapport d’évaluation du projet 2019.
- [104] Thiam A. Sénégal Rapport de l’étude de marché du solaire thermique: production d’eau chaude et séchage de produits agricoles. Dakar, Sénégal: École Supérieure Polytechnique de l’Université Cheikh Anta Diop de Dakar; 2015.
- [105] Dioha MO, Emodi NV, Mathew M, Dioha EC. Techno-economic feasibility of domestic solar water heating system in Nigeria. 2018 Int. Conf. Power Energy Environ. Intell. Control PEEIC, 2018, p. 54–60. <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665467>.

- [106] Geissler S, GIZ. Energy Efficiency in Buildings (EEB) in Selected Sub-Sectors of the Nigerian Building Sector: Development of recommendations for interventions to promote energy efficiency in buildings. Final report 2014.
- [107] GOPA International Energy Consultants GmbH, Ley K, Gaines J, Ghatikar A. The Nigerian Energy Sector - an Overview with a Special Emphasis on Renewable Energy, Energy Efficiency and Rural Electrification 2014.
- [108] Geissler S, Macharm E. Energy Efficiency for a Sustainable Built Environment in Nigeria. Conf. Proc. World Sustain. Built Environ. Conf. 2017 Hong Kong, Hong Kong: 2017, p. 591–7.
- [109] Hope for Warm Water - 68 Solar Water Heater units installed at Boarding School in Plateau State. 2020.
- [110] Coulibaly A, Bonfiglioli A, Direction Nationale de l’Energie de la République du Mali, Banque Africaine de Développement. Energies renouvelables Mali: Réalisations, défis et opportunités. Résumé Exécutif 2011.
- [111] Traore SO. Energie solaire thermique au Mali 2014. Communication faire à l’atelier de définition du programme de la CEDEAO sur le renforcement des capacités dans le domaine de l’énergie solaire thermique. 12 juin 2014.
- [112] Le Sahel. Energie solaire au Niger : de l’espoir malgré tout 2010. <https://www.nigerdiaspora.net/Archives-Nigerdiaspora-2003-2020/index.php/breves/item/51626-energie-solaire-au-niger--de-l%E2%80%99espoir-malgr%C3%A9-tout> (accessed July 18, 2022).
- [113] Gecit J. Le départ raté de l’énergie solaire en Afrique de l’Ouest, 1960-1987. J Energy Hist 2022.
- [114] Caille F. Abdou Moumouni Dioffo, un demi-siècle solaire plus tard. Abdou Moumouni Dioffo 1929-1992 Précurseur Nigér. L’énergie Sol., Québec, Canada: Éditions science et bien commun; 2018.
- [115] Caille F. L’énergie solaire thermodynamique en Afrique. La Société française d’études thermiques et d’énergie solaire, ou Sofretes (1973-1983). Afr Contemp 2017;261–262:65–84. <https://doi.org/10.3917/afco.261.0065>.
- [116] Gbossou CK. Le jeu des acteurs de la filière « énergie solaire » en Afrique de l’Ouest. Sci Eaux Territ 2019. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2019.HS.01>.
- [117] Bach DC. The Politics of West African Economic Co-Operation: C.E.A.O. and E.C.O.W.A.S. J Mod Afr Stud 1983;21:605–23.
- [118] Sborz J, Cominato C, Kalbusch A, Henning E. Hourly and daily domestic hot water consumption in social housing dwellings: An analysis in apartment buildings in Southern Brazil. Sol Energy 2022;232:459–70. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.067>.
- [119] Lima TP, Dutra JCC, Primo ARM, Rohatgi J, Ochoa AAV. Solar water heating for a hospital laundry: A case study. Sol Energy 2015;122:737–48. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.006>.
- [120] Merkle T. Applied solar energy plants in a hospital in Northern Ghana. Renew Energy 1994;5:454–6. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90413-8](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90413-8).
- [121] Ezeanya-Bakpa CC, Inobeme A, Adekoya MA. 24 - Hospital laundries and their effect on medical textiles. In: Mondal MdIH, editor. Med. Text. Nat. Resour., Woodhead Publishing; 2022, p. 767–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90479-7.00004-X>.
- [122] Bockmühl DP, Schages J, Rehberg L. Laundry and textile hygiene in healthcare and beyond. Microb Cell 2019;6:299–306. <https://doi.org/10.15698/mic2019.07.682>.
- [123] Traverse M, Aceto H. Environmental cleaning and disinfection. Vet Clin North Am Small Anim Pract 2015;45:299–330. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2014.11.011>.
- [124] Odoi-Yorke F, Akpahou R, Opoku R, Mensah LD. Technical, financial, and emissions analyses of solar water heating systems for supplying sustainable energy for hotels in Ghana. Sol Compass 2023;7:100051. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100051>.
- [125] Rankin R, Rousseau PG. Sanitary hot water consumption patterns in commercial and industrial sectors in South Africa: Impact on heating system design. Energy Convers Manag 2006;47:687–701. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.002>.
- [126] Ndoye B, Sarr M. Analysis of domestic hot water energy consumption in large buildings under standard conditions in Senegal. Build Environ 2008;43:1216–24. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.012>.
- [127] Weiss W, Spörk-Dür M. Solar Heat Worldwide, Edition 2023. Global market development and trends 2022. Detailed market figures 2021. Graz, Austria: IEA Solar Heating and Cooling Programme; 2023.
- [128] Moner-Girona M, Szabo S, Bhattacharyya S. 1.05 - Finance Mechanisms and Incentives for Off-Grid Photovoltaic Technologies in the Solar Belt. In: Letcher TM, editor. Compr. Renew. Energy Second Ed., Oxford: Elsevier; 2022, p. 82–113.
- [129] Gautam A, Chamoli S, Kumar A, Singh S. A review on technical improvements, economic feasibility and world scenario of solar water heating system. Renew Sustain Energy Rev 2017;68:541–62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.104>.

- [130] Ben Taher MA, Kousksou T, Zeraoui Y, Ahachad M, Mahdaoui M. Energetic, economic and environmental analysis of domestic solar water heating systems under the African continent. *Int J Environ Sci Technol* 2022;19:2279–94. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03273-7>.
- [131] Kalogirou SA, Agathokleous R, Barone G, Buonomano A, Forzano C, Palombo A. Development and validation of a new TRNSYS Type for thermosiphon flat-plate solar thermal collectors: energy and economic optimization for hot water production in different climates. *Renew Energy* 2019;136:632–44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.086>.
- [132] Edwards S, Beausoleil-Morrison I, Laperrière A. Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems. *Sol Energy* 2015;111:43–52. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.026>.
- [133] Carbonell D, Cadafalch J, Consul R. Dynamic modelling of flat plate solar collectors. Analysis and validation under thermosiphon conditions. *Sol Energy* 2013;89:100–12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.12.014>.
- [134] Maraj A. Energy and the economic estimation of three SWH systems under the Mediterranean climate conditions. *Energy Sustain Dev* 2023;76:101292. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101292>.
- [135] Gill L, Mac Mahon J, Ryan K. The performance of an evacuated tube solar hot water system in a domestic house throughout a year in a northern maritime climate (Dublin). *Sol Energy* 2016;137:261–72. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.052>.
- [136] Ayompe LM, Duffy A. Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate. *Appl Therm Eng* 2013;58:447–54. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.04.062>.
- [137] Ayompe LM, Duffy A, Mc Keever M, Conlon M, McCormack SJ. Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate. *Energy* 2011;36:3370–8. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.034>.
- [138] Building Research Establishment. Viridian Solar – Clearline solar thermal test report - Average household simulation. 2009.
- [139] Pradier G. Présentation du dispositif: Evaluation des résultats - TélésuiWeb. Institut National de l’Energie Solaire. 2020. https://telesuiweb.ines-solaire.org/webapp/var/doc/Rapport_T%C3%A9l%C3%A9SuiWeb_juin2020.pdf.
- [140] Moreau A, Laurencelle F, Lê-Huu P. Performance des chauffe-eau solaires installés au Québec dans le cadre du projet pilote sur les chauffe-eau solaires domestiques du Bureau de l’efficacité et de l’innovation énergétiques – rapport final. Bureau de l’efficacité et de l’innovation énergétiques. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune 2012. https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/solaire/Rapport_technique_Chauffage-eau_solaires.pdf.
- [141] Chang K-C, Lin W-M, Chung K-M. Solar water heaters as a pre-heating system for industrial processes. *Energy Effic* 2018;11:755–60. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9611-2>.
- [142] Zhang R, Shen GQP, Ni M, Wong JKW. Techno-economic feasibility of solar water heating system: Overview and meta-analysis. *Sustain Energy Technol Assess* 2018;30:164–73. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.10.004>.
- [143] Kalogirou SA, Agathokleous R, Barone G, Buonomano A, Forzano C, Palombo A. Development and validation of a new TRNSYS Type for thermosiphon flat- plate solar thermal collectors: energy and economic optimization for hot water production in different climates. *Renew Energy* 2019;136:632–44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.086>.
- [144] Endale A. Analysis of status, potential and economic significance of solar water heating system in Ethiopia. *Renew Energy* 2019;132:1167–76. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.094>.
- [145] Artur C, Neves D, Cuamba BC, Leão AJ. Domestic hot water technology transition for solar thermal systems: An assessment for the urban areas of Maputo city, Mozambique. *J Clean Prod* 2020;260:121043. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121043>.
- [146] Khennas S, M. Chitou S, Kemausuor, F, Ramde EW. *ecowas energy outlook*. 2024.
- [147] Chitou SM, Ramde EW. *ECOWAS key energy facts and figures*. 2023 Edition. Abuja: ECOWAS Directorate for Energy and Mines (DoEM); 2023.
- [148] Institut national de la statistique et de la démographie (INSD). Cinquième Recensement Général de la Population et de l’Habitation du Burkina Faso. 2022. <https://www.insd.bf/fr/file-download/download/public/2071>.
- [149] ONU-HABITAT. Profil urbain de uagadougou 2007. https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Burkina%20Faso_Ouagadougou.pdf.
- [150] Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Textbook. Minist Nat Resour Can 2001-2005 2005:456.

- [151] Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques et Démographiques. Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH-5). Résultats définitifs du RGPH-5 de Novembre 2022. 2023. blob:<https://inseed.tg/835b2364-e5f6-4e21-b6ef-ee9b93fba4f4>.
- [152] Ekechukwu V, Usoh CO. Domestic hot water requirement profile in Nigeria. 30th ISES Bienn. Sol. World Congr. 2011 SWC 2011, vol. 4, Kassel, Germany: 2011, p. 3128–38.
- [153] Huang P, Castán Broto V, Liu Y. From “transitions in cities” to “transitions of cities”: The diffusion and adoption of solar hot water systems in urban China. *Energy Res Soc Sci* 2018;36:156–64. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.028>.
- [154] Muwanga R, Namugenyi I, Wabukala BM, Tibesigwa W, Katutsi PV. Examining social-cultural norms affecting the adoption of solar energy technologies at the household level. *Clean Energy Syst* 2024;9:100164. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100164>.
- [155] Sanguinetti A, Outcault S, Alston-Stepnitz E, Moezzi M, Ingle A. Residential solar water heating: California adopters and their experiences. *Renew Energy* 2021;170:1081–95. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.031>.
- [156] Africa Infrastructure: Electricity | DataBank 2024. <https://databank.worldbank.org/source/Africa-Infrastructure-Electricity/preview/on> (accessed December 11, 2024).
- [157] Bikoï FA. Technico-economic and environmental investigation of solar water heaters in tropical climate [Etude technico-économique et environnementale des chauffe-eau solaires en climat tropical]. Master thesis. International Institute for Water and Environmental Engineering, 2010.
- [158] N'Tsoukpoe KE, Lekombo CS, Zorom M, N'Tsoukpoe KGJ. Évaluation des chauffe-eau solaires à tubes sous-vide directs : perspectives, potentiel et défis à Ouagadougou 2024.
- [159] Agyekum EB, Velkin VI. Multi-criteria decision-making approach in assessing the key barriers to the adoption and use of SWH in West Africa–Combination of modified Delphi and Fuzzy AHP. *Int J Thermofluids* 2024;23:100795. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100795>.
- [160] Sunerg Solar. Solar thermal 2016. <https://www.schede-tecniche.it/schede-tecniche-solare-termico/SUNERG-catalogo-solare-termico-2016.pdf>.
- [161] Sunerg Solar. Suneco_Solar thermal 2011. https://s1p.manualzz.com/store/data/011977316.pdf?key=b9aa801ae37e0a125dd29daf08b4db4c&r=1&f_n=11977316.pdf&t=1694992549396&p=86400.
- [162] Burkina Faso. Le Ministre de l'énergie, Le Ministre de l'Economie, des Finances et du Développement, Le Ministère de la Culture des A et du T. Arrêté interministériel No. 2019-0109 MACT/SG/DGT du 24 juin 2019 portant publication de la liste officielle des Etablissements touristiques et d'hébergement en règle au Burkina Faso. Burkina24 2019.
- [163] Eugène Ido Babou. Les impacts du climat sur le tourisme : Le site de Laongo (Burkina Faso) Climate impacts on tourism: the Laongo site (Burkina Faso) Impactos climáticos en el turismo: el sitio de Laongo (Burkina Faso) 2020. <https://doi.org/DOI: 10.4000/etudescaribeennes.20391>.
- [164] Observatoire National du Tourisme. Tableau de bord des statistiques du tourisme 2017. Ouagadougou Burkina Faso Ministère Cult Arts Tour 2016 2018:39.
- [165] Solar Keymark. Solimpeks: technical specifications of thermosiphon systems 2022. <https://solimpeks.com/files/CertificationsFr/tsm.pdf>.
- [166] Solarkeymark. Annex to Solar Keymark Certificate Solimpeks Solar Corp . Licence Number Date issued Issued by 011-7S1941 2019.
- [167] EJAI ECOSUN SOLAR GROUP – Solar Water Heater, Solar Collector, Solar Lights 2004.
- [168] KARISTON. Natural circulation indirect solar system for the production of domestic hot water 2015. <https://www.oparuae.com/img/ariston/ariston-kairos-thermo-gr.pdf>.
- [169] ZENNER International GmbH & Co. KG. zelsius® C5-IUF 2024. https://pim.zenner.com/wp-content/uploads/documents/data_sheets/heat_meter/EN/DB_WMZ_zelsius_C5_IUF_EN.pdf.
- [170] Kamstrup. MULTICAL® 403 MULTICAL® 2022. <https://www.kamstrup.com/da-dk>.
- [171] Campbell Scientific. LP02 product manual 2020. <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/lp02.pdf>.
- [172] Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons; 1991.
- [173] Carbonell D, Cadafalch J, Consul R. Dynamic modelling of flat plate solar collectors. Analysis and validation under thermosiphon conditions. *Sol Energy* 2013;89:100–12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.12.014>.
- [174] Kalogirou SA. Solar thermal collectors and applications. *Prog Energy Combust Sci* 2004;30:231–95. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
- [175] (DGS) GSES. Planning and Installing Solar Thermal Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers. 2nd ed. London: Routledge 2010.

- [176] Taher B, MA BZ, Afass A SS, Ahachad M, M. Energy life cycle cost analysis of various solar water heating systems under Middle East and North Africa region. *Case Stud Therm Eng* 2021;27:101262. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101262>.
- [177] Lekombo CS, N'Tsoukpoe KE, Flores Bahamonde C, Dudita M, Ko GK, Agbokou KS. In situ performance evaluation of a solar water heating system for a hospital laundry in the Sahel. *Energy Sustain Dev* 2024;81. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101499>.
- [178] Sama HR. Révision des tarifs : La SONABEL cherche 10 milliards « avec torche ». *Obs Paalga* 2023.
- [179] The World Bank. Burkina Faso - Second Energy and Fiscal Management Development Policy Financing Project. 2015.
- [180] Fondation Énergies pour le Monde. 10 solar power plants for 40 000 people in rural areas in the northern region of Burkina Faso [French, 10 centrales solaires pour 40 000 ruraux dans la Région Nord du Burkina Faso. Brochure de présentation]. Paris, France: Fondation Énergies pour le Monde; 2017.
- [181] African Development Bank Group. Multinational - Desert to Power G5 Sahel Financing Facility - Project Appraisal Report 2022. <https://www.afdb.org/en/documents/multinational-desert-power-g5-sahel-financing-facility-project-appraisal-report>.
- [182] The World Bank Group. Solar Energy and Access Project 2021. <https://projects.worldbank.org/pt/projects-operations/project-detail/P166785>.
- [183] Le Groupe de la Banque mondiale. Projet d'investissement et de soutien au secteur de l'énergie (P160377). Rapport d'achèvement de la mise en œuvre et des résultats IDA-61680. 2024 2024.
- [184] Oumar Sanogo, Kayaba Haro, Roger Charles Mathurin COMPAORE, Reine Pélagie KOURAOGO KP. Évolution du Facteur d'émission électrique des réseaux électriques des pays de l'Afrique Subsaharienne : cas du Burkina Faso. *Sci Tech* 2021;40:1–9.
- [185] RETScreen® C international d'aide à la décision en matière d'énergies propres. Analyse de projets d'énergies propres : RETScreen Engineering & Cases Textbook. 3e éd. Québec : Québec : Ressources naturelles Canada 2005.
- [186] Oficina Catalana del Canvi Climati. Practical guide for calculating greenhouse gas (GHG) emissions. Version: 2019 2019. https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/04_ACTUA/Com_calcular_emissions_GEH/guia_de_calcul_demissions_de_co2/190301_Practical-guide-calculating-GHG-emissions_OCCC.pdf.
- [187] Niang SAA, Gueye A, Sarr A, Diop D, Goni S, Nebon B. Comparative Study of Available Solar Potential for Six Stations of Sahel. *Smart Grid Renew Energy* 2023;14:153–67. <https://doi.org/10.4236/sgre.2023.148009>.
- [188] Anupam Rao Y, Somwanshi A. A comprehensive review on integrated collector-storage solar water heaters. *Mater Today Proc* 2022;63:15–26. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.424>.
- [189] Bilardo M, Fraisse G, Pailha M, Fabrizio E. Modelling and performance analysis of a new concept of integral collector storage (ICS) with phase change material. *Sol Energy* 2019;183:425–40. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.032>.
- [190] Kalogirou S. Design, construction, performance evaluation and economic analysis of an integrated collector storage system. *Renew Energy* 1997;12:179–92. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(97\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(97)00029-3).
- [191] Rahimi-Ahar Z, Khiadani M, Rahimi Ahar L, Shafieian A. Performance evaluation of single stand and hybrid solar water heaters: a comprehensive review. *Clean Technol Environ Policy* 2023;25:2157–84. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02556-6>.
- [192] Víg P, Seres I, Vladár P. Improving efficiency of domestic solar thermal systems by a flow control. *Sol Energy* 2021;230:779–90. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.028>.
- [193] Michaelides I, Eleftheriou P, Siamas GA, Roditis G, Kyriacou P. Experimental investigation of the night heat losses of hot water storage tanks in thermosyphon solar water heaters. *J Renew Sustain Energy* 2011;3. <https://doi.org/10.1063/1.3595742>.
- [194] Society (DGS) German Solar Energy. Planning and installing solar thermal systems: A guide for installers, architects and engineers. 2nd ed. London: Routledge; 2010. <https://doi.org/10.4324/9781849775120>.
- [195] Lefaso.net. “Professeur Yezouma Coulibaly: 'C'est inadmissible qu'on installe des chauffe-eau électriques au Burkina pendant que nous avons du soleil qui nous brûle la tête.'”. 10 juin 2010. <https://lefaso.net/spip.php?article37113>.