



APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPÉCIALITÉ : GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 17 Juillet 2024 par :

Arnaud Bato'ora BAMANA-BAYELEKA (n° 20130583)

**Directeur de mémoire : Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR),
Maître de Conférence (CAMES), Institut 2iE**

**Maîtres de stage externe : M. Maxime Houindo O. SEHOU, Chef-service des Offres et
Formations /KYA-Energy Group**

**M. Jean-Claude MESSAN, Chef-service Logiciels et
Informatique /KYA-Energy Group**

Structure d'accueil du stage : KYA-Energy Group

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Pr Yrébégnan Moussa SORO

Membres et correcteurs : Dr.-Ing. Gaëlle Kafira KO

Dr.-Ing. Sayon Dit Sadio SIDIBE

Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE

Promotion [2023-2024]



DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents ceux-là qui m'ont tout donné. Ce mémoire est le fruit de leurs sacrifices. A mes frères et sœurs pour leur amour, leur confiance, leur soutien et leurs encouragements. A toutes les personnes qui ont apporté leur contribution, qu'elle soit directe ou indirecte, à ce travail. À tous ceux que ma mémoire a laissé dans l'ombre, je souhaite exprimer sincèrement ma reconnaissance.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à traduire toute notre reconnaissance à l'endroit de tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce document. Nos remerciements vont à l'endroit de :

- l'ensemble du personnel pédagogique et administratif de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de L'Environnement (2iE), pour m'avoir accueilli et formé ;
- **Dr. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE**, enseignant-chercheur à 2iE, pour la confiance placée en notre modeste personne en nous accompagnant du début jusqu'à la fin de notre travail.
- **Prof. Yao K. AZOUMAH**, Directeur Général de KYA-Energy Group, pour ses conseils méthodologiques, sa rigueur scientifique, sa patience et surtout sa disponibilité malgré ses multiples responsabilités.
- **M. SEHOU Maxime**, Chef-service des Offres et Formations à KYA Energy Group et **M. MESSAN Jean-Claude**, Chef service logiciels et informatique à KYA-Energy Group qui m'ont, tous les deux, encadrés tout au long de ce stage.
- à **Monsieur LAWSON Yves**, Directeur Général Adjoint, **Madame SHIKPE Sylvie**, Directrice Commerciale, **Monsieur EKLOU Yaovi**, Responsable des Ressources Humaines, pour leur accueil.
- mes remerciements vont également à **Monsieur TCHANGBEDJI Fhad**, **Monsieur SEGBEDJI K. Fofonè** et **Monsieur Rock BIGUEME**, à tous les ingénieurs de KYA Energy Group pour leur disponibilité, leur aide, leur objectivité et leurs précieux conseils.
- à tout le personnel technique et administratif de KYA-Energy Group qui n'ont ménagé aucun effort pour nous assister durant notre stage ;
- dans l'impossibilité de citer tous les noms, nos sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis, par leurs conseils et leurs compétences, la réalisation de ce mémoire.

RESUMÉ

Ce mémoire propose une nouvelle méthode de dimensionnement des systèmes solaires basse température plus précisément les chauffe-eaux solaire thermosiphon, basée sur une adaptation de la méthode de KYA-Energy Group (méthode KEG) développée préalablement pour le dimensionnement des systèmes solaires PV.

La méthode repose sur une étude d'optimisation technico-économique des systèmes. En utilisant des techniques de simulation avancé et des algorithmes d'optimisation.

Cette nouvelle méthode permet de déterminer avec précision, pour un besoin en eau chaude dans n'importe quelle localité, les tailles des composants du chauffe-eau solaire donnent la meilleure fiabilité technique et un coût minimum de l'énergie. Les paramètres d'optimisation considérés sont les coefficients de sécurité du stockage

Une étude comparative des résultats issus de la méthode KEG et de deux logiciels de dimensionnement (T*SOL et RETScreen), a été effectuée. Les résultats de cette comparaison ont abouti à une conclusion significative : Pour un besoin identique en eau chaude de 200 litres dans huit localités différentes, avec une probabilité de perte d'alimentation en chaleur (LHSP) défini à 10 % ou un taux de couverture de 90 %, la méthode KEG s'est révélée être la meilleure option dans la plupart des cas en termes de compromis entre la fiabilité technique (probabilité annuelle de satisfaction des besoins énergétiques) et l'accessibilité économique (LCoH) des systèmes dimensionnés, comparativement à TSOL et RETScreen.

Mots Clés :

- 1- Besoin énergétique défavorable**
- 2- Besoin énergétique favorable**
- 3- Chauffe-eau solaire**
- 4- Facteur de qualité**
- 5- Méthode KEG**
- 6- Solaire thermique basse température**

ABSTRACT

This paper proposes a new sizing method for low-temperature solar systems, specifically thermosiphon solar water heaters, based on an adaptation of the KYA-Energy Group (KEG) method previously developed for sizing PV solar systems.

The method is based on a techno-economic optimization study of the systems, using advanced simulation techniques and optimization algorithms.

This new method allows for the precise determination of component sizes for solar water heaters to meet hot water needs in any location, ensuring the best technical reliability and minimum energy cost. The optimization parameters considered include storage safety coefficients.

A comparative study of the results from the KEG method and two sizing software (TSOL and RETScreen) was conducted. The results of this comparison led to a significant conclusion: For an identical hot water need of 200 liters in eight different locations, with a loss of heat supply probability (LHSP) defined at 10% or a coverage rate of 90%, the KEG method proved to be the best option in most cases in terms of the compromise between technical reliability (annual probability of meeting energy needs) and economic accessibility (LCoH) of the sized systems, compared to TSOL and RETScreen.

Key words:

- 1- Unfavorable Energy Need**
- 2- Favourable Energy Need**
- 3- Solar water heater**
- 4- Quality factor**
- 5- KEG method**
- 6- Low-temperature solar thermal**

SOMMAIRE

DÉDICACES	
REMERCIEMENTS	i
RESUMÉ	ii
ABSTRACT	iii
SOMMAIRE	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	viii
I. INTRODUCTION	1
1. Contexte du sujet et problématique du thème	1
2. Objectif du sujet	1
II. Présentation de la structure d'accueil : KYA-Energy Group	3
III. État de l'art des chauffe-eaux solaires : Généralités et dimensionnement	4
1. Généralité sur les chauffe-eaux solaires	4
1.1 . Principe de fonctionnement d'un CES	4
1.2 . Les principaux composants d'un CES.....	5
1.3 . Les différents types de CES.....	5
2. Les méthodes de dimensionnement des chauffe-eaux solaires	9
2.1 . La méthode simplifiée	9
2.2 . Méthode détaillée	10
2.3. Méthode de dimensionnement de F-Chart.....	12
3. Logiciels existants d'évaluation des performances des chauffe-eaux solaires	14
4. Analyse comparative des différents logiciels de dimensionnement des chauffe-eaux solaires	15
V. Application de la méthode KEG au dimensionnement des chauffe-eaux solaires	17
1. Méthode KEG	17
2. Application de la méthode KEG au solaire thermique basse température	17
2.3 Évaluation du besoin en chaleur	17
2.4 Le facteur de qualité thermique	18

**APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES
THERMIQUES BASSE TEMPERATURE**

2.5	Évaluation du besoin en stockage.....	21
2.6	Évaluation de la production d'énergie utile thermique d'un CES	22
2.7	Évaluation de la production d'énergie utile favorable (ressource énergétique fluctuante disponible).....	22
2.8	Évaluation du productible énergétique utile défavorable (ressource fluctuante non disponible).....	23
2.9	Productible énergétique utile total	23
2.10	Détermination du rendement du capteur	24
3.	Caractérisation d'un chauffe-eau solaire	24
3.1	Le rendement de la production énergétique.....	25
3.2	La fiabilité technique	25
3.3	L'accessibilité économique	26
4.	Méthodologie de dimensionnement des chauffe-eaux solaires.....	26
5.	Détermination des dimensions des composants du chauffe-eau solaire.....	28
5.1	Évaluation de la surface totale des capteurs à installer.....	28
5.2	Évaluation du réservoir de stockage	29
VI.	Études comparatives et discussion	30
1.	Étude de cas.....	30
2.	Comparaison des résultats	33
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	41
	BIBLIOGRAPHIE.....	43
	ANNEXES.....	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Tableau de comparaison des chauffe-eau solaires	8
Tableau 2: Dimensionnement de système solaire d'eau chaude pour l'Afrique tropicale et équatoriale [9]	9
Tableau 3: Besoin en eau chaude à 50°C pour différents types d'utilisateurs [10]	10
Tableau 4 : Analyse comparative des logiciels de simulations des chauffe-eaux solaires [18]	15
Tableau 5 : Coordonnées géographiques des sites sélectionnés pour la simulation	31
Tableau 6: Données d'entrées considérées pour les simulations.	32
Tableau 7: Type de paramètres d'entrée requis pour les différents logiciels	34
Tableau 8: Résultats des simulations issus de la méthode KEG	35
Tableau 9: Comparaison des résultats obtenus avec la méthode KEG et ceux obtenus avec les logiciels T*SOL et RETScreen.	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Principe de fonctionnement d'un CES	5
Figure 2: Les différents composants d'un chauffe-eau solaire.....	5
Figure 3: Les chauffe-eaux solaires thermosiphon monobloc.....	6
Figure 4 : Le chauffe-eau solaire thermosiphon à éléments séparés	6
Figure 5 : Le chauffe-eau solaire à circulation forcée.....	7
Figure 6 : Le chauffe-eau auto vidangeable à circulation forcée	8
Figure 7: Schéma de circulation de l'énergie lorsque la ressource énergétique fluctuante est disponible	19
Figure 8: Schéma de circulation de l'énergie lorsque la ressource énergétique fluctuante n'est pas disponible	19
Figure 9 : Etapes de dimensionnement de CES	28
Figure 10 : Profil de consommation d'eau chaude sanitaire.....	30
Figure 11: Localités sélectionnées pour la simulation	31
Figure 12 : Capteur choisi pour les simulations	32
Figure 13: Besoin énergétique pour les différents sites sélectionnés.....	33
Figure 14: Comparaison de la production énergétique annuelle	38
Figure 15 : Comparaison du LCoH	39
Figure 16 : Comparaison du taux de couverture en eau chaude.....	40

**APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES
THERMIQUES BASSE TEMPERATURE**

Liste des Abréviations

ABBREVIATIONS

Notation	Signification
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
CES	Chauffe-eau solaire
PMI-PME	Petites et moyennes industries/Petites et moyennes entreprises
PV	Photovoltaïque

NOMMENCLATURE

Notation	Signification	Unité
A_c	Surface des capteurs thermiques	m^2
E_a	Besoin énergétique thermique favorable	kWh
E_n	Besoin énergétique thermique défavorable	kWh
E_t	Besoin énergétique total	kWh
E_{xa}	Productible utile favorable	kWh
E_{xn}	Productible utile défavorable	kWh
E_{xt}	Productible utile total	kWh
f	Taux de couverture solaire	%
GJ	Gigajoule	
j	Jour	
kg	Kilogramme	
kWh	Kilowattheure	
L	Litre	L
LCoH	Coût actualisé de la chaleur	\$/kWh
LHSP	Probabilité de perte d'alimentation en chaleur	%
LHS	Part du besoin énergétique non satisfait	kWh
MJ	Mégajoule	
m^2	Mètre carré	
S_a	Stockage énergétique favorable	kWh
S_n	Stockage énergétique défavorable	kWh
S_t	Stockage énergétique total	kWh
TWh	Térawattheure	
V_{St}	Volume de stockage	L

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

η_{cap}	Rendement du capteur
η_s	Rendement du stockage
Υ_{Prod}	Rendement de la production solaire
Υ_{th}	Facteur de qualité de la demande énergétique
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius
α_a	Coefficient de sécurité du stockage favorable (allant de 0 à 1)
α_n	Coefficient de sécurité du stockage défavorable (allant de 0 à 1)

I. INTRODUCTION

1. Contexte du sujet et problématique du thème

L'énergie solaire est aujourd'hui une des sources les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Cette énergie a l'avantage d'être propre et renouvelable avec 169 440 TWh par an d'ensoleillement [1,2].

L'énergie solaire est exploitée sous différentes formes. Parmi les formes d'exploitation de l'énergie solaire, nous pouvons citer le solaire thermique basse température qui joue un rôle significatif, notamment dans la production d'eau chaude sanitaire par exemple. Cette technologie offre une approche efficace et écologique pour répondre aux besoins en eau chaude sanitaire [3].

Malgré la disponibilité des ressources énergétiques renouvelables en Afrique, leur développement est aujourd'hui freiné par une combinaison de facteurs, dont l'absence ou l'insuffisance de cadres réglementaires spécifiques, des coûts d'investissements initiaux élevés et la non-maîtrise technologique [4]. Face à cette situation, une question se pose : comment dimensionner les systèmes solaires thermiques basse température en vue d'avoir des systèmes à la fois techniquement fiables et accessibles économiquement ?

C'est dans cette perspective que KYA-Energy Group souhaite proposer une nouvelle méthode de dimensionnement des chauffe-eau solaire pour améliorer l'accessibilité et économique des systèmes dimensionner tout en garantissant la fiabilité technique. Cette initiative est le cœur de notre travail.

2. Objectif du sujet

L'objectif de ce stage est d'élargir la méthode KEG aux systèmes solaires thermiques basse température en vue d'avoir des systèmes solaires thermique basse température techniquement fiables et accessibles économiquement.

Ce mémoire est divisé en quatre parties principales, chacune explorant des aspects essentiels de l'étude sur les chauffe-eau solaires.

➤ **Première section : État de l'art sur les chauffe-eau solaires**

Nous commencerons par une présentation générale des chauffe-eau solaires. Ensuite, nous analyserons les différentes méthodes et outils de dimensionnement des chauffe-eau solaires, en identifiant les avantages et les limites de chaque outil.

➤ **Deuxième section : Présentation de l'application de la méthode KEG au dimensionnement des chauffe-eau solaires**

Nous décrirons en détail la nouvelle méthode de dimensionnement proposée, la méthode KEG.

➤ **Troisième section : Simulation et résultats d'un cas d'étude**

Nous appliquerons la nouvelle méthode à un cas d'étude, et nous présenterons ainsi qu'analyserons les résultats des simulations obtenues.

➤ **Quatrième section : Étude comparative des résultats obtenus avec la méthode KEG et ceux obtenus avec T*SOL et RETScreen**

Nous comparerons les résultats obtenus avec la méthode KEG à ceux générés par les outils T*SOL et RETScreen

II. Présentation de la structure d'accueil : KYA-Energy Group

KYA-Energy Group est une entreprise togolaise à vocation sous régionale spécialisée dans les énergies renouvelables (énergie solaire en particulier) et l'efficacité énergétique. L'entreprise KYA-Energy Group est une équipe d'une soixantaine de personnes aux profils très variés : électriciens, énergéticiens, informaticiens, spécialistes des énergies renouvelables (solaire en particulier), d'une équipe administrative et commerciale.

L'ambition de KYA-Energy Group est de développer des produits innovants, durables et abordables afin de fournir un accès à l'énergie pour tous. À cette fin, elle produit et assemble des systèmes, des composants de gestion, suivis et contrôle à distance (télégestion) dans le domaine de l'énergie tels que : les groupes électrosolaires (KYA-SoP), le KYA-SolWasherKit, les gestionnaires d'énergie KYA-FlexyControl, le logiciel de dimensionnement KYA-SolDesign, etc.

Ce sont des produits destinés aussi bien aux particuliers qu'aux entreprises et communautés urbaines et rurales. Les groupes électrosolaires KYA-SoP sont des systèmes solaires compacts, autonomes, hybrides, mobiles, modulaires et multiservices. Ce sont des solutions qui conviennent à des secteurs tels que : les centres de santé, l'agroalimentaire, agriculture, les PME-PMI, etc. Les groupes électrosolaires KYA-SoP se composent d'un générateur solaire et d'un coffret électrique contenant des batteries, des onduleurs hybrides ainsi que des éléments de protection.

En parallèle, l'entreprise s'investit dans d'autres activités telles que les études de faisabilité et l'installation des systèmes PV ou PV/diesel (mini ou microcentrales), les audits énergétiques ou encore les programmes de formation et de renforcements de capacités des professionnels du solaire. L'une des grandes ambitions de KYA-Energy Group, à court et à moyen terme, est de parvenir à des systèmes ou groupes électrosolaires PV standardisés, à des coûts réduits et donc abordables à la population africaine dans sa grande majorité.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en Annexe A, présente l'organigramme général de KYA-Energy Group.

III. État de l'art des chauffe-eaux solaires : Généralités et dimensionnement

1. Généralité sur les chauffe-eaux solaires

Un chauffe-eau solaire est un système qui permet de produire de l'eau chaude grâce à l'énergie solaire thermique.

1.1. Principe de fonctionnement d'un CES

Les capteurs solaires transforment le rayonnement solaire en chaleur grâce à un absorbeur. L'absorbeur est un corps caractérisé par des propriétés d'absorption très élevées et d'émissivité très basse. L'absorbeur transfère la chaleur à un fluide caloporteur (généralement de l'eau glycolée) circulant au travers de chacun des capteurs [5]. Comme le montre la Figure 1, le capteur solaire thermique capte les rayons du soleil, chauffant le fluide caloporteur qui circule ensuite à travers les tuyaux de circulation. Le fluide chauffé se dirige vers le ballon de stockage, le fluide caloporteur passe par les serpentins de l'échangeur de chaleur afin de transmettre sa chaleur à l'eau par contact, en échangeant sa chaleur, il va refroidir et retourner au panneau via le circulateur et ainsi de suite. Lorsqu'il y a peu ou pas de rayonnement solaire, un appoint prend le relais pour amener l'eau à température. Cet appoint peut avoir recours à plusieurs types d'énergies : bois, électricité, gaz ou fioul

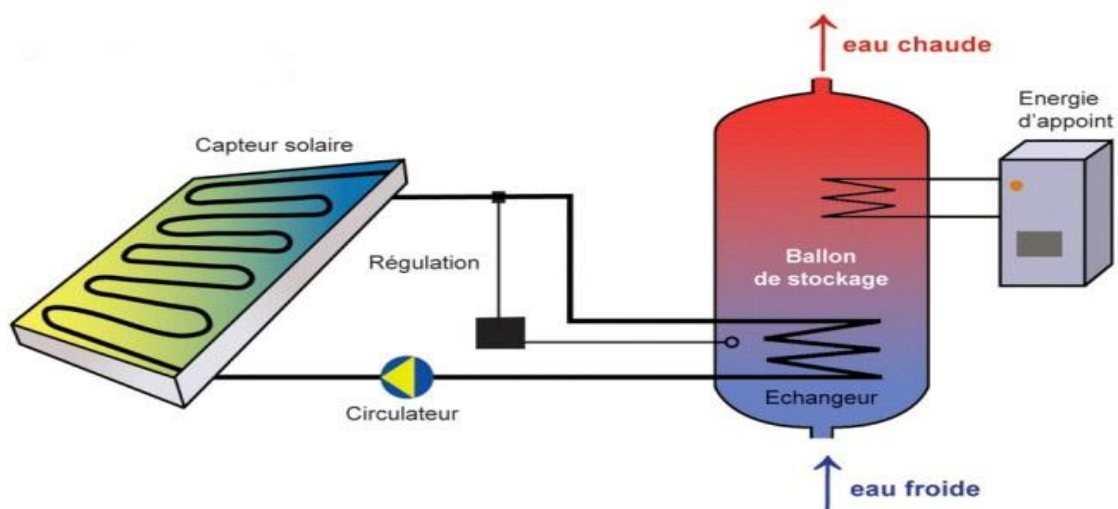


Figure 1: Principe de fonctionnement d'un CES

1.2. Les principaux composants d'un CES

Les deux principaux composants d'un chauffe-eau solaire sont [6,7] : le capteur (capte l'énergie solaire et transmet la chaleur au fluide caloporteur) et le ballon de stockage (stocke l'eau chauffée). Généralement, à ces équipements s'ajoutent, les conduites de circuit, une pompe, un clapet anti-retour, une vase d'expansion, une soupape de sécurité, des robinets de vidange, des purgeurs et un régulateur. la Figure 2 présente les différents composants d'un CES.

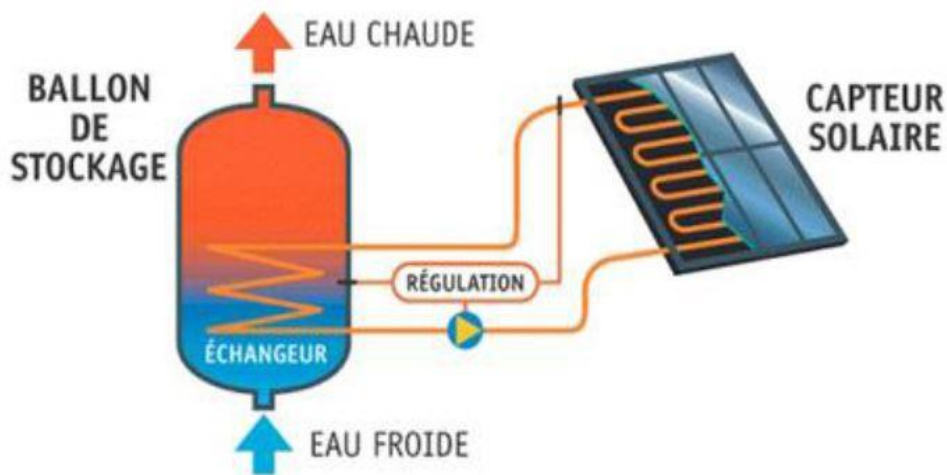


Figure 2: Les différents composants d'un chauffe-eau solaire

1.3. Les différents types de CES

On distingue quatre types de chauffe-eaux solaires [8] :

✚ Les chauffe-eaux solaires thermosiphon monobloc

Les capteurs et le ballon de stockage forment un seul composant. L'eau est mise en circulation sous l'effet thermosiphon : chauffée par les capteurs, et donc moins dense, l'eau monte naturellement vers le ballon de stockage placé au-dessus des capteurs (Figure 3).

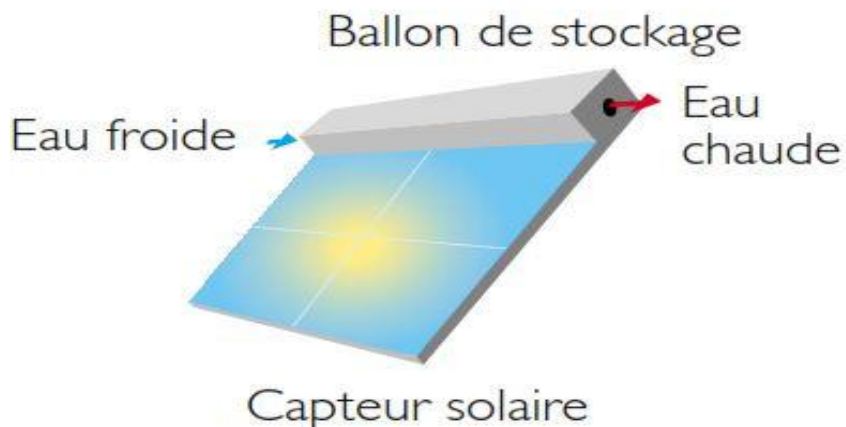


Figure 3: Les chauffe-eaux solaires thermosiphon monobloc

✚ Le chauffe-eau solaire thermosiphon à éléments séparés

À la différence du CES monobloc, les capteurs et le ballon de stockage ne forment pas un seul composant. Le ballon de stockage est généralement placé au-dessus des capteurs pour avoir une circulation naturelle du fluide caloporteur (Figure 4).

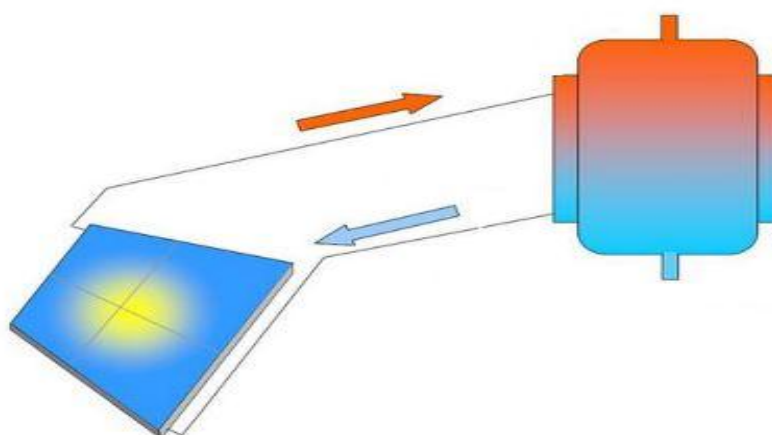


Figure 4 : Le chauffe-eau solaire thermosiphon à éléments séparés

✚ Le chauffe-eau solaire à circulation forcée

C'est un système dans lequel le mouvement de l'eau chauffée ou du fluide caloporteur dans le capteur est assuré par un circulateur artificiel (pompe ou turbine) contrôlé par un dispositif de régulation.

Comme on peut le voir sur la Figure 5, La circulation de l'eau est assurée par une pompe.

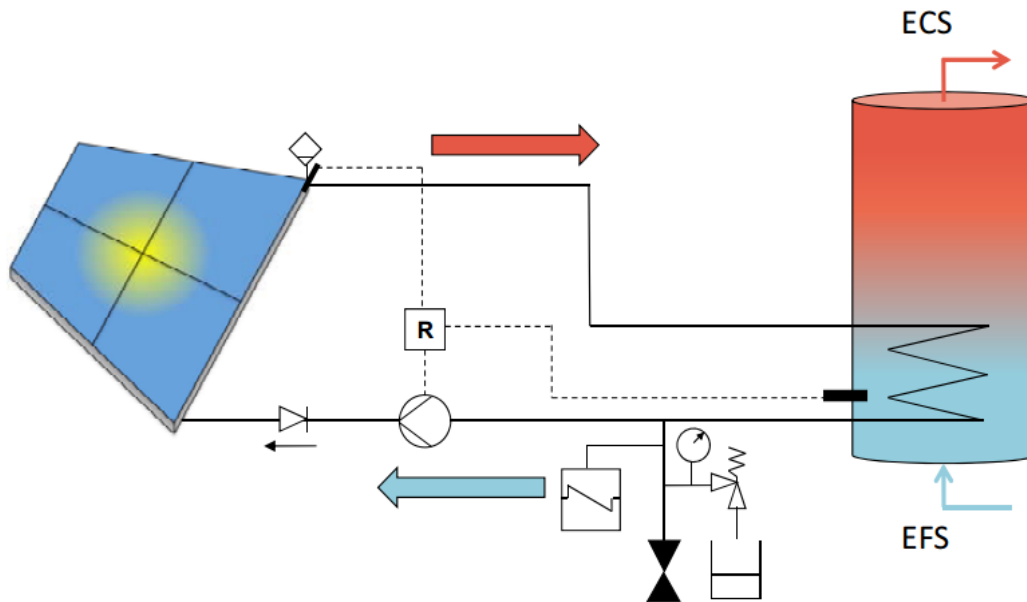


Figure 5 : Le chauffe-eau solaire à circulation forcée

Le chauffe-eau auto vidangeable à circulation forcée

Lorsque l'ensoleillement est adéquat et que le ballon de stockage n'a pas encore atteint sa température de consigne, la pompe se met en marche, acheminant le fluide caloporteur vers le capteur solaire. Ce fluide absorbe les calories et les libère dans l'échangeur de chaleur avant de remonter vers le capteur. En cas d'absence de soleil ou lorsque la température du ballon atteint le niveau prédéfini, la pompe s'arrête. À ce moment, le fluide quitte le capteur pour retourner au vase de rétention.

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

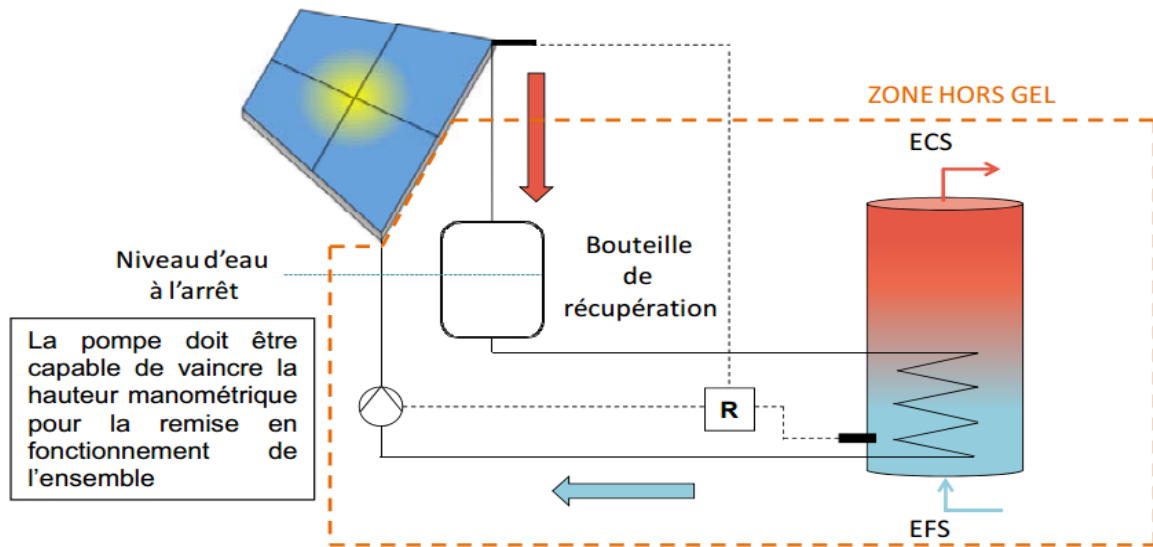


Figure 6 : Le chauffe-eau auto vidangeable à circulation forcée

2. Comparaison entre les deux types de CES

Tableau 1: Tableau de comparaison des chauffe-eau solaires

Type de chauffe-eau solaire	Avantages	Inconvénients
Chauffe-eaux solaires thermosiphon monobloc	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité d'installation. • Solution compacte, idéale pour les espaces restreints. • Moins de pertes thermiques car tout est intégré. • Moins cher 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de stockage limitée. • Moins de flexibilité pour des configurations sur mesure.
Chauffe-eau solaire thermosiphon à éléments séparés	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité d'installation. • Moins cher 	<ul style="list-style-type: none"> • Le réservoir doit être au-dessus des capteurs, limitant les options d'installation. • Moins efficace dans les climats froids, réduisant les performances par temps froid.
Chauffe-eau solaire à circulation forcée	<ul style="list-style-type: none"> • Plus efficace, surtout dans les climats plus froids. • Le réservoir peut être placé indépendamment des capteurs. • Meilleur contrôle de la température de l'eau. 	<p>Coût initial et d'entretien plus élevé.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dépendance à une source d'énergie externe pour la pompe. • Dépendance à une source d'énergie externe pour la pompe.

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

Type de chauffe-eau solaire	Avantages	Inconvénients
Chauffe-eau auto vidangeable à circulation forcée	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure performance même en climat froid grâce à la pompe. • Fonction auto-vidange pour éviter les dommages dus au gel. • Meilleur contrôle de la température de l'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation coûteuse en raison de la pompe et des régulateurs. • Nécessite une source d'énergie externe pour la pompe. • Installation et maintenance plus complexes. • Plus de composants, donc plus de risques de défaillance.

Le choix du type de chauffe-eau solaire dépend de plusieurs facteurs tels que le climat, l'emplacement, le budget, et les besoins spécifiques en eau chaude.

3. Les méthodes de dimensionnement des chauffe-eaux solaires

2.1. La méthode simplifiée

La méthode simplifiée permet d'estimer le volume du ballon de stockage et la surface du capteur requise pour satisfaire le besoin quotidien en eau chaude [9].

Tableau 2: Dimensionnement de système solaire d'eau chaude pour l'Afrique tropicale et équatoriale [9]

Besoin quotidien en ECS (litres)	Volume de stockage (litres)	Surface de capteur VS (m ²)	Surface de capteur RS (m ²)
50	50 - 75	1,0 – 1,5	0,9 – 1,3
100	100 - 150	2,0 – 3,0	1,5 – 2,5
200	200 - 300	3,5 – 4,5	3,0 – 4,0
300	300 - 450	4,5 – 6,0	4,0 – 5,0
500	500 - 750	7,5 – 10	6,0 – 8,5
1000	1000 - 1200	14 – 20	11 – 16
2000	2000 - 2500	30 – 40	24 - 32
4000	4000 - 5000	60 – 80	50 - 70
10 000	10 000 - 12000	140 – 200	110 - 160

Avec :

VS : revêtement type verni solaire,

RS : revêtement sélectif

Les valeurs fournies dans le tableau 2 s'appliquent généralement à l'Afrique de l'Ouest.

2.2. Méthode détaillée

Le dimensionnement d'un CES à partir de la méthode détaillée suit les étapes suivantes [10]:

2.2.1. Évaluation du besoin journalier en eau chaude

Un exemple de typologies de besoin journalier en eau chaude est présenté dans le Tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3: Besoin en eau chaude à 50°C pour différents types d'utilisateurs [10]

Type d'utilisation	Fréquence d'usage	Faible besoin (litre/jour)	Besoin moyen (litre/jour)	Besoin élevé (litre/jour)
Habitat	Par personne et par jour	30	50	60
Équipement sportif	Par douche	20	30	50
Hébergement	Par nuit	20	40	60

2.2.2. Estimation du besoin net journalier en chaleur

Le besoin en eau chaude peut être exprimé en termes d'énergie. La relation suivante permet de passer d'un besoin en litre à un besoin exprimé en kWh/j :

$$B_{net} = \rho_e \cdot V_e \cdot C_{pe} \cdot (T_{ef} - T_{ei}) \quad (1)$$

Avec :

B_{net} : Besoin net journalier en chaleur en kWh

V_e : Volume moyen d'eau chaude requise par utilisateur en L

T_{ef} : température d'utilisation finale en °C

T_{ei} : température de prise d'eau en °C

ρ_e : masse volumique de l'eau en kg/l

C_{pe} : chaleur spécifique de l'eau en kWh · kg⁻¹ · °C⁻¹

2.2.3. Estimation du volume du réservoir de stockage

Le volume du réservoir de stockage est évalué à partir de la formule ci-dessous :

$$V_{st} = k \cdot V_e \quad (2)$$

V_{st} : Volume de stockage en litres

k : Coefficient de sécurité du stockage

- k : 0,8 à 1,2 pour les régions à fort ensoleillement ;
- k : 2 à 2,5 pour les régions à faible ensoleillement.

On choisit k d'autant plus élevé qu'on recherche une grande fraction solaire. On retient un réservoir de capacité comprise entre 90 et 120% du volume

2.2.4. Calcul de la surface du capteur

La surface du capteur est évaluée à partir de la formule ci-dessous :

$$S_{CS} = FS \frac{B_{net}}{\eta_{inst} \cdot \eta_{CS} \cdot I_{GMj}} \quad (3)$$

Avec :

S_{CS} : Surface des capteurs en m²

FS : Taux de couverture solaire

η_{inst} : Rendement de l'installation

η_{CS} : Rendement du capteur

I_{GMj} : Ensoleillement global moyen journalier en kWh · m⁻² · j⁻¹

Après avoir effectué un dimensionnement manuel, il est important d'effectuer une simulation du système avec les logiciels de simulations. La simulation permet d'évaluer les performances du système dimensionné, et d'améliorer de manière efficace et rentable le système.

2.3. Méthode de dimensionnement de F-Chart

La méthode F-chart a été développée par Klein et Beckmann [11]. Elle sert à évaluer les performances thermiques annuelles des systèmes de chauffage actifs utilisés dans les constructions. Cette approche permet d'estimer la quantité d'énergie apportée au système de chauffage solaire. Trois variables principales doivent être prises en considération.

La première variable est la surface des capteurs solaires. La seconde variable inclut le type de capteur utilisé. La troisième variable prend en compte la capacité de stockage, les débits de fluide et les dimensions des échangeurs de chaleur des capteurs. Les corrélations qui en résultent fournissent la fraction de la charge mensuelle de chauffage couverte par l'énergie solaire.

La fraction solaire (f) est déterminée à partir de deux coefficients adimensionnels, notés X et Y .

$$X = \frac{A_C \cdot F'_R \cdot U_L \cdot (T_{\text{réf}} - \bar{T}_a) \Delta t}{L} \quad (4)$$

$$Y = \frac{A_C \cdot F'_R \cdot (\overline{\tau\alpha}) \cdot \bar{H}_T \cdot N}{L} \quad (5)$$

Les équations (4) et (5) peuvent s'écrire comme suit :

$$X = F_R U_L \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot (T_{\text{réf}} - \bar{T}_a) \cdot \Delta t \cdot \frac{A_C}{L} \quad (6)$$

$$Y = F_R (\overline{\tau\alpha})_n \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot \frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \cdot \bar{H}_T N \cdot \frac{A_C}{L} \quad (7)$$

Avec :

A_C : Surface des capteurs en m^2 ;

L : Besoin de chauffage total mensuel en GJ ;

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

F'_R : Facteur modifié d'évacuation de la chaleur du capteur solaire en % ;

F_R : Facteur modifié d'évacuation de la chaleur du capteur solaire en % ;

U_L : Coefficient global de pertes thermiques en $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$;

Δt : Nombre de secondes par mois ;

N : Nombre de jours dans le mois ;

$T_{réf}$: Valeur empirique de référence égale à $100^\circ C$;

$\overline{T_a}$: Température moyenne mensuelle ambiante en $^\circ C$;

$\overline{\tau\alpha}$: Moyenne mensuelle du produit de la transmissivité et de l'absorptivité du capteur en % ;

$\tau\alpha$: Produit normal de transmittance-absorptance en % ;

$\overline{H_T}$: Moyenne mensuelle du rayonnement solaire incident quotidien dans le plan des capteurs en MJ/m^2 .

X doit être corrigé à la fois en fonction de la dimension du stockage et de la température de l'eau froide. La méthode f-Chart a été développée avec une capacité de stockage standard de $75 L/m^2$ de capteur solaire. Pour les autres capacités de stockage, X doit être multiplié par un facteur correctif (X_c / X) défini par :

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{\text{Volume réel de stockage}}{\text{Volume standard de stockage}} \right)^{-0,25} \quad (8)$$

Pour prendre en considération les fluctuations de la température de l'eau froide (T_f) et pour avoir une température de l'eau chaude minimale acceptable (T_c) (les deux ayant une influence sur la performance du chauffe-eau solaire), X doit être multiplié par un facteur correctif (X_{cc} / X) défini par :

$$\frac{X_{cc}}{X} = \frac{11,6 + 1,18 \cdot T_c + 3,86 \cdot T_f - 2,32 \cdot \overline{T_a}}{100 - \overline{T_a}} \quad (9)$$

La fraction f de la charge de chauffage totale mensuelle couverte par le chauffe-eau est donnée en fonction de X et Y :

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3 \quad (10)$$

4. Logiciels existants d'évaluation des performances des chauffe-eaux solaires

Il existe de nombreux logiciels de dimensionnement des systèmes de chauffage solaire. Chacun a sa particularité, mettant l'accent sur certains aspects et applications, ainsi qu'un public cible. Une courte liste des logiciels généralement utilisés pour le dimensionnement des chauffe-eaux solaires est ci-après présentée :

- **RETScreen international** : est un outil canadien, disponible depuis le 30 Avril 1998, qui vise à l'analyse de projets impliquant différentes sources d'énergie renouvelable. Avec cet outil, il est possible d'effectuer des études comparatives des sources d'énergie renouvelable et conventionnelle [12].

RETScreen utilise la méthode de F-chart pour évaluer la performance des chauffe-eaux solaires pour des applications domestiques, commerciales et industrielles.

- **T*SOL** est un logiciel commercial allemand disponible depuis 1989 pour la conception et l'analyses thermo-énergétiques détaillées des systèmes thermiques. Il dispose d'une vaste base de données de capteurs solaires, des réservoirs thermiques, de la tuyauterie, des pompes hydrauliques, etc. Outre, il est possible d'évaluer la viabilité économique des projets de chauffage solaire [13].
- **TRNSYS** est actuellement l'un des programmes de modélisation de systèmes thermiques les plus répandus dans le monde. Il a été développé aux États-Unis depuis 1975 et son principal avantage est de réaliser des analyses dynamiques. Sa nature modulaire permet une grande flexibilité de simulations, permettant l'insertion de modèles mathématiques dans le programme [14].
- **Le programme SolarPro** a été développé aux États-Unis, il permet de simuler le fonctionnement des chauffe-eaux solaires à des intervalles de temps donnés en utilisant des fichiers météorologiques de type TMY [15]. SolarPro a été créé en 1997.
- **EnergyPlus** Parmi les outils de simulation les plus répandus pour étudier le comportement thermique des bâtiments, il a été conçu par le Département de l'Énergie des États-Unis en 1980 [16,17].

5. Analyse comparative des différents logiciels de dimensionnement des chauffe-eaux solaires

Les logiciels de simulations possèdent chacun des spécifications différentes. Certains sont conçus de manière simple, se focalisant principalement sur la détermination des composants du chauffe-eau solaire tandis que d'autres se caractérisent par une analyse plus approfondie des systèmes. Par ailleurs, il existe des programmes permettant d'évaluer la faisabilité économique et le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le Tableau 4 présente une analyse comparative des différents logiciels que nous avons eu à présenter précédemment [18].

Tableau 4 : Analyse comparative des logiciels de simulations des chauffe-eaux solaires [18]

Programme	Points forts	Points faibles	Cibles	Accessibilité
EnergyPlus	Simulation détaillée et précise.	La saisie des données en format texte peut être plus Problématique	Concepteurs, Chercheurs Sociétés de conseil Agences gouvernementales	Gratuit
RETScreen	Analyse économique détaillée	-	Concepteurs, Planificateurs, Managers et les Formateurs	Gratuit
SolDesigner	La conception du système de production d'eau chaude	Ne permet pas de calculer le rendement énergétique	Concepteurs, Constructeurs spécialistes en l'hydraulique	Payant
SolarPro	Modélisation détaillée des systèmes de chauffage solaire	Données d'entrée complexes	Concepteurs Constructeurs	Payant

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

Programme	Points forts	Points faibles	Cibles	Accessibilité
TRNSYS	Conversion d'énergie Modélisation dynamique	Ne dispose pas de données d'entrée standard	Concepteurs Chercheurs Les consultants	Payant
T*SOL	Simulation détaillée et précise.	Nécessite une formation pour être pleinement exploité	Concepteurs, Planificateurs, Managers et les Formateurs	Payant

Après avoir fait une revue bibliographique des différentes méthodes et logiciels de dimensionnement des chauffe-eaux solaires, les limites suivantes ont été relevées :

- ✚ La complexité des données d'entrée pour certains logiciels rendant leur utilisation fastidieuse au vu du nombre important d'informations à renseigner ce qui augmente le risque d'erreurs de saisie.
- ✚ La nécessité d'entrer le volume de stockage dans d'autres logiciels.
- ✚ La nécessité d'avoir des connaissances en programmation pour utiliser certains logiciels.

L'application de la méthode KEG au solaire thermique basse température a pour objectif non seulement de concevoir des systèmes économiquement accessibles et techniquement fiables, mais aussi de fournir un outil de dimensionnement facile d'utilisation et qui permet de déterminer le volume de stockage approprié et optimisé pour répondre à un besoin donné.

Les détails de l'application de la méthode KEG au système solaire thermique basse température sont présentés en profondeur dans les sections suivantes.

V. Application de la méthode KEG au dimensionnement des chauffe-eaux solaires

Cette section présente la méthode KEG appliquée au dimensionnement des chauffe-eaux solaires. L'objectif de l'application de cette méthode est d'obtenir un meilleur compromis entre la fiabilité technique et l'accessibilité économique.

1. Méthode KEG

La méthode KEG est une méthode de dimensionnement optimisée, développée au sein de l'unité de Recherche et Développement (R&D) de KYA-Energy Group. La méthode KEG peut être appliquée au dimensionnement de tout type d'énergie fluctuante.

Actuellement utilisée pour dimensionner des systèmes solaires photovoltaïques, la méthode KEG permet de dimensionner des systèmes solaires PV économiquement accessibles et techniquement fiables. Le logiciel KYA-SolDesign, fruit de cette application, est disponible au grand public [19,20].

Nos travaux ont consisté à étendre l'application de la méthode KEG au solaire thermique basse température, en particulier pour le dimensionnement des chauffe-eaux solaires.

2. Application de la méthode KEG au solaire thermique basse température

Cette section présente les principales étapes de la mise en œuvre de la méthode KEG. Pour la suite de nos travaux, seuls les CES thermosiphon sont pris en compte (à l'état actuel) dans cette approche de dimensionnement.

2.3 Évaluation du besoin en chaleur

Le besoin en chaleur est évalué suivant le profil horaire de consommation en eau chaude. Le besoin en chaleur à un instant t est obtenu à partir de la formule suivante :

$$E(t) = C_p \cdot \rho \cdot V_e(t) \cdot (T_C - T_f) \quad (11)$$

Avec :

$E(t)$: Besoin en chaleur à un instant t en kWh ;

C_p : Capacité calorifique de l'eau en kWh · kg⁻¹ · °C⁻¹ ;

ρ : Masse volumique d'eau en kg/l ;

$V_e(t)$: Volume d'eau à chauffer à un instant t en L ;

T_C : Température d'eau chaude demandée en °C ;

T_f : Température d'eau froide en °C.

2.4 Le facteur de qualité thermique

Afin d'acquérir une vision claire du concept de "facteur de qualité thermique", il convient au préalable de définir quelques concepts clés.

- Une ressource énergétique fluctuante : Cette expression se réfère à une ressource énergétique naturelle dont le potentiel en termes d'énergie varie au cours de la journée. Les exemples typiques de telles sources d'énergie comprennent l'énergie solaire et éolienne, qui illustrent bien cette variabilité.
- Une source d'énergie fluctuante sera considérée comme étant disponible à un instant donné lorsque sa puissance minimale requise pour être transformée en une autre forme d'énergie, telle que l'électricité ou la chaleur, est atteinte.

Pour illustrer cela davantage, prenons le cas d'un système solaire photovoltaïque installé dans une région spécifique. Dans cette situation, la ressource pourrait être considérée comme disponible à un moment donné seulement lorsque l'irradiation solaire minimale requise pour alimenter les régulateurs/onduleurs est atteinte.

Les **Figure 7** et **Figure 8** illustrent le fonctionnement d'un CES. La **Figure 7** montre le système lorsque la ressource fluctuante est disponible. La **Figure 8** représente le système lorsque la ressource fluctuante n'est pas disponible.

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

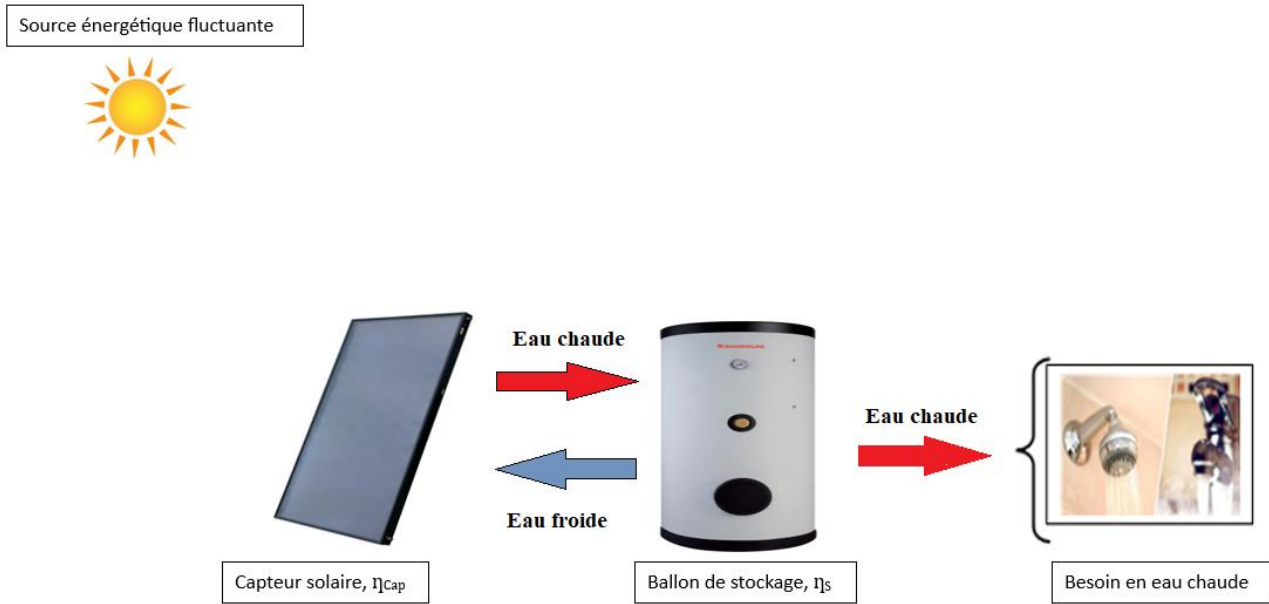


Figure 7: Schéma de circulation de l'énergie lorsque la ressource énergétique fluctuante est disponible

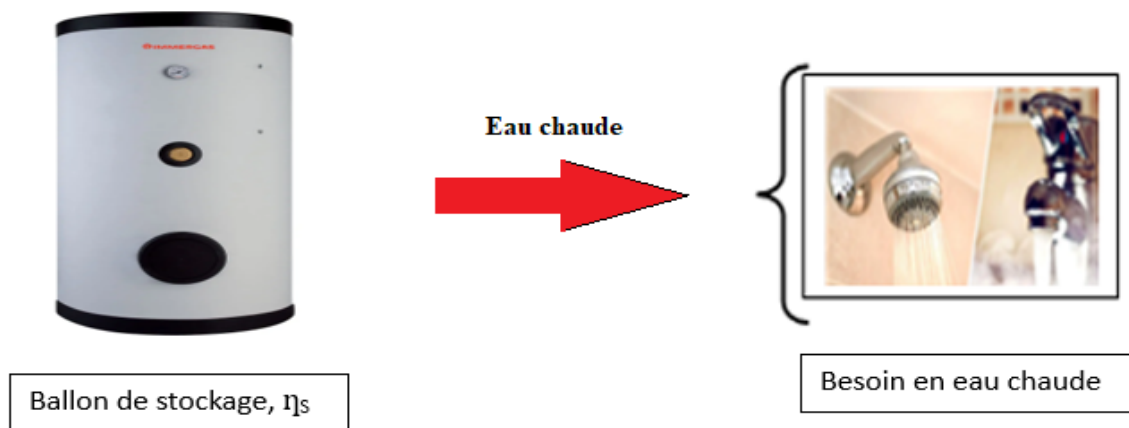


Figure 8: Schéma de circulation de l'énergie lorsque la ressource énergétique fluctuante n'est pas disponible

Considérons E_T Comme le besoin énergétique thermique quotidien total, à satisfaire par un CES.

- ✚ Le besoin énergétique thermique favorable E_a est défini comme la part du besoin énergétique quotidien total qui correspond à la période de disponibilité de la ressource énergétique fluctuante (le soleil).
- ✚ Le besoin énergétique thermique défavorable E_n est défini comme la part du besoin énergétique quotidien total qui correspond à la période où la ressource énergétique fluctuante n'est pas disponible.

Le facteur de qualité de la demande énergétique (γ_{th}) est défini comme le rapport entre le besoin énergétique favorable thermique E_a et le besoin énergétique thermique quotidien total E_t .

Le facteur de qualité est obtenu par l'expression suivante :

$$\gamma_{th} = \frac{E_a}{E_t} = \frac{E_a}{E_a + E_n} \quad (12)$$

Avec :

E_a : Besoin énergétique thermique favorable en kWh

E_n : Besoin énergétique thermique défavorable en kWh

E_t : Besoin énergétique thermique quotidien en kWh

Si $\gamma_{th} = 0$, cela indique que la demande d'énergie survient lorsque la ressource énergétique fluctuante est disponible (soleil).

Si $\gamma_{th} \neq 0$, cela indique que la demande d'énergie survient lors d'une période où la ressource énergétique fluctuante n'est pas disponible (soleil).

Un faible facteur de qualité thermique implique que la majeure partie du besoin énergétique ne coïncide pas avec la période de disponibilité de la ressource énergétique. En revanche, un facteur de qualité thermique élevé indique que la majeure du besoin du besoin énergétique cadre avec la période de disponibilité de la ressource énergétique.

Les données fournies par le facteur de qualité thermique jouent un rôle crucial dans la conception d'un chauffe-eau solaire. Elles permettent de déterminer la capacité de stockage adéquate ainsi que la quantité d'énergie nécessaire pour répondre au besoin énergétique.

2.5 Évaluation du besoin en stockage

Les CES ont besoin de stockage afin de fonctionner à tout moment de la journée en raison de l'intermittence des ressources énergétiques fluctuantes. Dans la méthode KEG, le stockage a été classé en deux catégories :

- ✚ Le stockage thermique favorable S_a : ce type de stockage est défini pour les périodes où le temps de consommation en eau chaude correspond aux périodes de disponibilité de la ressource énergétique fluctuante ($\gamma_{th} \neq 0$).

Le stockage thermique favorable est obtenu par l'expression suivante :

$$S_a = \frac{\alpha_a}{\eta_{cap} \cdot \eta_s} E_a \quad (13)$$

Avec :

S_a : Stockage thermique favorable en kWh

E_a : Besoin énergétique favorable thermique en kWh/j

α_a : Coefficients de sécurité du stockage favorable allant de 0 à 1

η_{cap} : Rendement du capteur

η_s : Rendement du stockage

- ✚ Le stockage thermique défavorable S_n : ce type de stockage est défini pour les périodes où la consommation en eau chaude correspond aux périodes de non-disponibilité de la ressource énergétique fluctuante ($\gamma_{th} = 0$)

Le stockage thermique défavorable est obtenu par l'expression suivante :

$$S_n = \frac{1+\alpha_n}{\eta_s} E_n \quad (14)$$

Avec :

- S_n : Stockage défavorable en kWh
- E_n : Besoin énergétique défavorable thermique en kWh/j

- α_n : Coefficient de sécurité du stockage défavorable allant de 0 à 1
- η_s : Rendement du stockage

Le stockage thermique total d'un CES est donc la somme du stockage défavorable thermique et du stockage favorable thermique. Il est obtenu par l'expression suivante :

$$S_t = S_a + S_n \quad (15)$$

Avec :

S_t : Stockage total en kWh

2.6 Évaluation de la production d'énergie utile thermique d'un CES

L'énergie utile thermique produite par un CES doit répondre au besoin énergétique thermique pendant la période où la ressource énergétique fluctuante est disponible et les périodes où elle n'est pas disponible.

Deux types de production d'énergie utile sont considérés pour les CES : la production d'énergie utile en période où la ressource énergétique fluctuante est disponible et la production d'énergie utile en période de non disponibilité de la ressource énergétique fluctuante.

2.7 Évaluation de la production d'énergie utile favorable (ressource énergétique fluctuante disponible)

La production d'énergie utile favorable E_{xa} est l'énergie à produire par un CES lorsque le facteur de qualité de la demande énergétique est différent de zéro ($\gamma_{th} \neq 0$). E_{xa} doit couvrir le besoin en chaleur en période où la ressource énergétique fluctuante est disponible E_a , et le stockage de chaleur associé S_a (voir Figure 7).

Elle est obtenue à partir de l'expression suivante :

$$E_{xa} = \frac{E_a}{\eta_{cap}} + S_a = \frac{E_a}{\eta_{cap}} + \frac{\alpha_a}{\eta_{cap} \cdot \eta_s} E_a \quad (16)$$

$$E_{xa} = \left(\frac{\eta_s + \alpha_a}{\eta_{cap} \cdot \eta_s} \right) E_a \quad (17)$$

Avec :

- E_{xa} : productible utile favorable thermique en kWh
- E_a : Besoin énergétique favorable thermique en kWh
- α_a : Coefficient de sécurité du stockage favorable allant de 0 à 1
- η_{cap} : Rendement du capteur
- η_s Rendement du stockage

2.8 Évaluation du productible énergétique utile défavorable (ressource fluctuante non disponible)

Le productible énergétique utile défavorable E_{xn} est l'énergie à produire par un CES lorsque le facteur de qualité de la demande thermique est égal à zéro ($\gamma_{th} = 0$).

E_{xn} doit couvrir le besoin en chaleur en période où la ressource n'est pas disponible E_n , et le stockage de la chaleur associé S_n (voir Figure 8).

Elle est obtenue à partir de l'expression suivante :

$$E_{xn} = S_n = \left(\frac{1 + \alpha_n}{\eta_s} \right) E_n \quad (18)$$

Avec :

- E_{xn} : productible utile thermique défavorable en kWh
- E_n : Besoin énergétique défavorable thermique en kWh/j
- α_n : Coefficients de sécurité du stockage défavorable allant de 0 à 1
- η_s : Rendement du stockage

2.9 Productible énergétique utile total

Le productible énergétique utile total E_{xt} , à fournir par un CES est égal à la somme du productible énergétique utile favorable E_{xa} et du productible énergétique utile défavorable E_{xn} .

$$E_{xt} = E_{xa} + E_{xn} = \left(\frac{\eta_s + \alpha_a}{\eta_{cap} \cdot \eta_s} \right) E_a + \left(\frac{1 + \alpha_n}{\eta_s} \right) E_n \quad (19)$$

E_{xt} : productible énergétique utile total en kWh/j

2.10 Détermination du rendement du capteur

Le capteur permet de convertir l'énergie reçue par rayonnement solaire en chaleur. Le rendement des capteurs thermiques est obtenu à partir de la formule suivante [21] :

$$\eta_c = \eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{I_G} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{I_G} \quad (20)$$

Avec :

η_c : le rendement des capteurs

η_0 : le rendement optique ou coefficient de conversion optique du capteur thermique

a_1 : coefficient de déperdition de 1^{er} ordre du capteur en $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

a_2 : coefficient de déperdition du 2nd ordre du capteur en $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-2}$

T_m : température moyenne du caloporteur dans le capteur thermique (moyenne des températures d'entrée et de sortie) en $^\circ C$

T_a : température ambiante en $^\circ C$

I_G : Irradiance globale en $W \cdot m^{-2}$

Les paramètres η_0 , a_1 et a_2 sont obtenus à la suite d'un essai normalisé selon la norme ISO 9806 :2014. Ces paramètres sont donnés par les fabricants dans la fiche technique du capteur.

Le rendement des capteurs dépend de la température moyenne du fluide caloporteur T_m , la température extérieure T_a et de l'ensoleillement global I_G

3. Caractérisation d'un chauffe-eau solaire

Un CES est caractérisé, dans la méthode KEG, par trois fonctions :

- Le rendement de la production ;

- La fiabilité technique ;
- L'accessibilité économique.

3.1 Le rendement de la production énergétique

Le rendement de la production énergétique γ_{prod} est défini comme le rapport entre la production totale d'énergie utile E_{xt} à fournir par un CES et le besoin total en énergie E_T , en tenant compte des rendements des convertisseurs (capteurs) et des unités de stockage (ballon de stockage).

Elle est obtenue à partir de l'expression suivante :

$$\gamma_{prod} = \frac{E_{xt}}{E_T} = \frac{1}{\eta_{cap} \cdot \eta_s} [(\alpha_a + \eta_s - \alpha_n - 1)\gamma_{th} + \alpha_n + 1] \quad (21)$$

3.2 La fiabilité technique

- ❖ Le LHSP (Probabilité de perte d'alimentation en chaleur), pour une période T, est le rapport entre le besoin non couvert (LHS) et le besoin énergétique total (E_T).

Le LHSP est évalué comme suit :

$$LHSP = \frac{\sum_{t=1}^T LHS(t)}{\sum_{t=1}^T E_t(t)} = \frac{\sum_{t=1}^T E_t(t) - E_{xt}(t) - (S_t(t-1) - S_{t,min})}{\sum_{t=1}^T E_t(t)} \quad (22)$$

Avec :

$E_t(t)$: Besoin en énergétique thermique total à un instant t en kWh

$E_{xt}(t)$: productible énergétique thermique à un instant t en kWh

$S_{t,min}$: Besoin en stockage minimum en kWh

Le LHS se produit à l'instant t lorsque l'énergie produite par le CES ne peut pas satisfaire le besoin en énergie à l'instant t. Il est évalué sur une base horaire et de manière dynamique tout au long de l'année. Pour obtenir le LHSP, on calcule le rapport entre la somme des besoins non couverts (LHS) au cours de l'année et l'énergie annuelle produite.

- ❖ Le taux de couverture correspond à la proportion des besoins énergétiques annuels couverte par l'énergie solaire thermique en %.

Le taux de couverture est obtenu à partir de la formule suivante :

$$\text{Taux de couverture} = \frac{\text{Production solaire}}{\text{Besoin énergétique}} \quad (23)$$

À partir des formules 22 et 23, on peut déduire le taux de couverture solaire avec la formule suivante :

$$f = 1 - \text{LHSP} \quad (24)$$

3.3 L'accessibilité économique

Le coût actualisé de la chaleur (LCoH) est un indicateur utile pour estimer le coût de la chaleur générée par l'ensemble du système de chauffage solaire au cours de son cycle de vie, en tenant compte à la fois de l'investissement initial, de l'exploitation et du coût de maintenance. Le LCoH est exprimé comme suit [22] :

$$\text{LCoH} = \frac{\text{LCC}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_{xt}}{(1+a)^t}} \quad (25)$$

Avec :

LCC : le coût total du système sur la durée de vie du projet

T : la durée de vie du projet en années

E_{xt} : l'Énergie thermique produite sur une année en kWh

a : taux d'actualisation

Les Annexes D et E fournissent plus de détails sur le calcul du LCoH.

4. Méthodologie de dimensionnement des chauffe-eaux solaires

Le dimensionnement des CES avec la méthode KEG(Figure 9), suit huit (8) étapes principales. Elles sont énumérées ci-dessous.

- ✚ **Étape 0** : À ce niveau, tous les paramètres d'entrée et les données nécessaires pour le dimensionnement d'un chauffe-eau solaire sont définis.
- ✚ **Étape 1** : Le facteur de qualité thermique γ_{th} est évalué à ce stade.
- ✚ **Étape 2** : le calcul du LHSP, du LCoH et du γ_{Prod} est effectué pour chaque couple de coefficients de sécurité du stockage α_a et α_n (121 couples).
- ✚ **Étape 3** : Cette étape comporte le premier filtre du modèle. Ce filtre porte sur la fiabilité technique. Seuls les couples de coefficients de sécurité de stockage (α_a, α_n) qui conduisent à un LHSP inférieur au LHSP_{max} défini passeront ce premier filtre. Cette étape permet de garantir la fiabilité technique du système qui sera obtenu à la fin.
- ✚ **Étape 4** : Cette étape est consacrée au deuxième filtre qui porte sur le LCoH. Ici, seuls les couples de facteurs de sécurité de stockage (α_a, α_n) qui ont passé le premier filtre de l'étape 3 et qui donnent le LCoH minimal devraient passer cette étape.
- ✚ **Étape 5** : Un dernier filtre est appliqué, à ce stade, pour choisir le couple optimal de facteurs de sécurité du stockage. Les facteurs de sécurité du stockage, qui conduisent à la plus grande efficacité de production de chaleur γ_{Prod} passera à travers ce dernier filtre.
- ✚ **Étape 6** : Les couples optimaux de coefficients de sécurité de stockage (α_a, α_n) sont obtenus.
- ✚ **Étape 7** : Les valeurs optimales des trois fonctions (LHPS_{min}, LCoH_{min} et $\gamma_{Prod\ max}$) du chauffe-eau solaire énumérées ci-dessus sont obtenues. Tous les paramètres dérivés tels que E_{xTmin} , $S_{t\ min}$, etc. sont également obtenus.
- ✚ **Étape 8** : Les principaux composants du CES optimal sont dimensionnés et leurs coûts sont évalués lors de cette dernière étape.

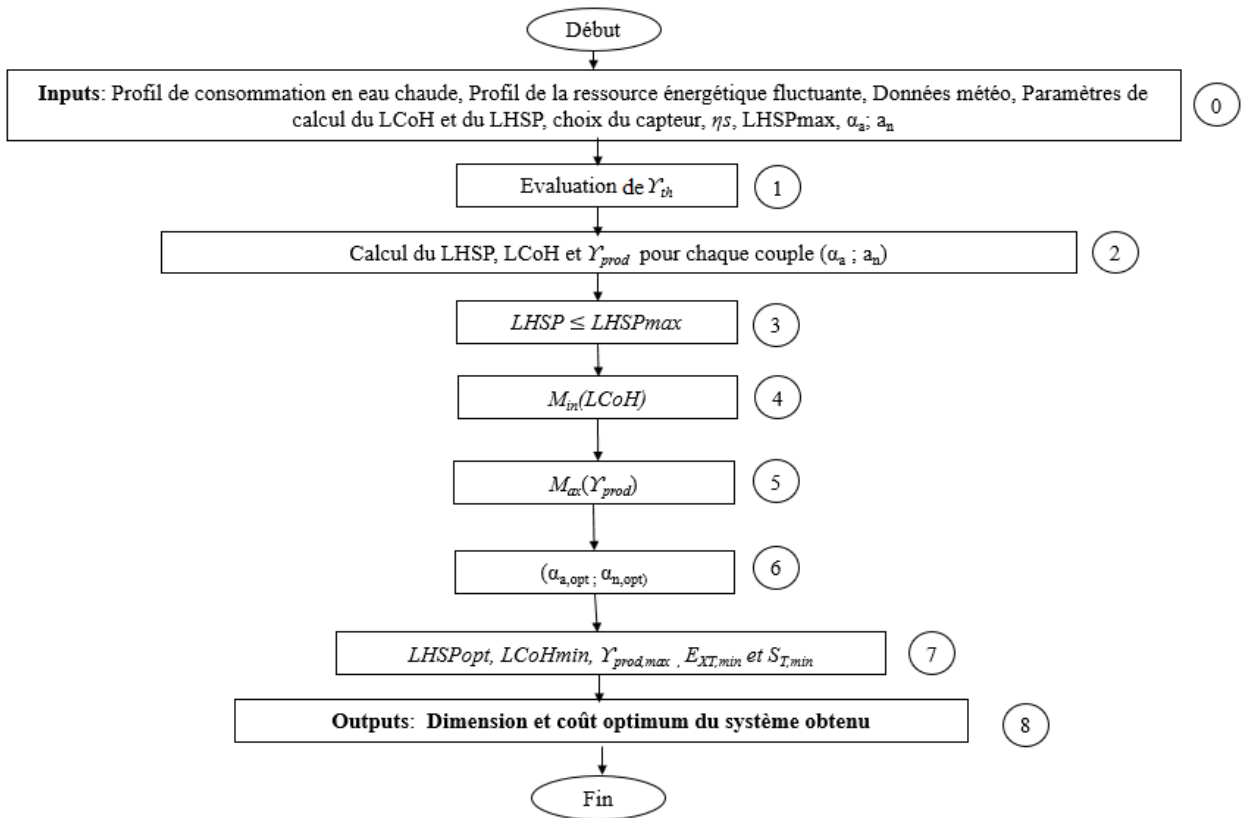


Figure 9 : Etapes de dimensionnement de CES

5. Détermination des dimensions des composants du chauffe-eau solaire

5.1 Évaluation de la surface totale des capteurs à installer

La surface totale des capteurs à installer pour satisfaire le besoin en chaleur est obtenue par l'expression suivante :

$$A_S = \frac{E_{xt}}{I_R \cdot PR} \tag{26}$$

Avec :

A_S : La surface des capteurs en m^2

E_{xt} : Le productible énergétique journalier total en kWh/j

PR : Le rendement global du système

I_R : L'irradiation moyenne mensuelle en kWh/m².j

5.2 Évaluation du réservoir de stockage

Le volume du réservoir de stockage est obtenu par l'expression suivante :

$$V_{st} = \frac{S_t}{\rho * C_p \cdot (T_c - T_f)} \quad (27)$$

Avec :

V_{st} : Volume de stockage en l

C_p : La chaleur spécifique de l'eau en kWh · kg⁻¹ · °C⁻¹

ρ : La masse volumique de l'eau en kg/l

S_t : le besoin en Stockage total en kWh

T_c : Température d'eau chaude demandée en °C

T_f : Température d'eau froide en °C

VI. Études comparatives et discussion

Dans cette section, la méthode KEG implémentée dans un logiciel est comparée à d'autres méthodes de dimensionnement classique utilisées dans les logiciels T*SOL et RETScreen.

1. Étude de cas

1.1 Énoncé

Pour les simulations, nous avons pris en compte un besoin en eau chaude de 200 litres pour un ménage, dont le profil de consommation est détaillé ci-dessous.

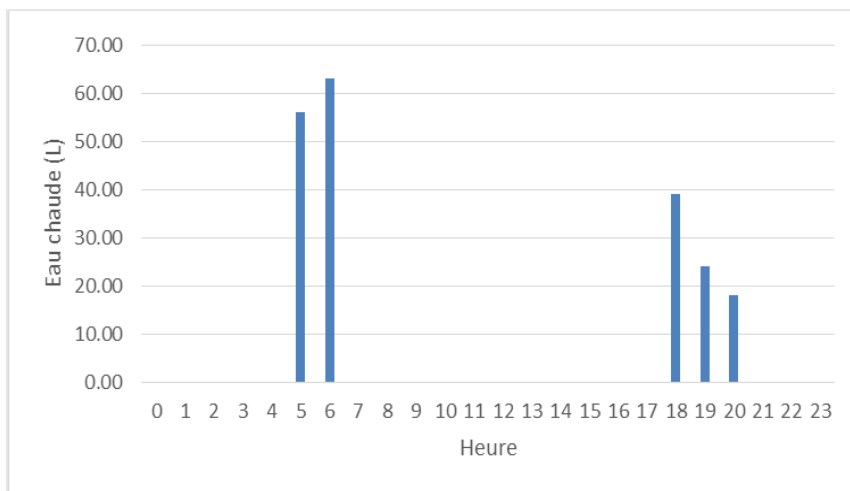


Figure 10 : Profil de consommation d'eau chaude sanitaire

Les simulations ont été effectuées en utilisant les données de 8 sites différents. Le Tableau 5 ci-dessous résume les différents sites considérés pour les simulations. La Figure 11 présente la carte des sites sélectionnés pour la simulation.

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

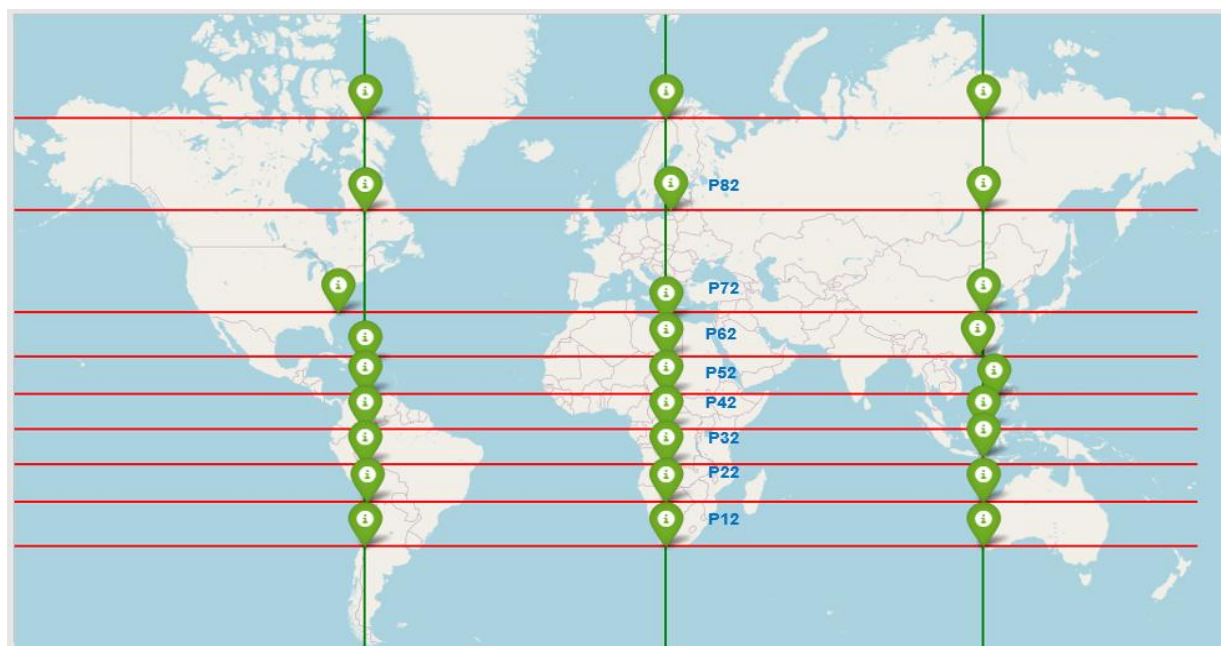


Figure 11: Localités sélectionnées pour la simulation

Les coordonnées de ces localités sont présentés dans le Tableau 5

Tableau 5 : Coordonnées géographiques des sites sélectionnés pour la simulation

N°	Localités	Coordonnées géographiques	
		Latitude (°)	Longitude (°)
P12	Langeberg Ward, Afrique du Sud	-33,98	20
P22	Omaheka, Namibia	-22	20
P32	Lunda Sul Province, Angola	-11	20
P42	Équateur, RDC	0	20
P52	Djarat Abounimir, Tchad	11	20
P62	Al-Koufrah, Tchad	22	20
P72	Al Karmah Town, Libya	32	20
P82	Vėlaičiai, Lithuania	55,89	21,5

1.2 Hypothèses de simulations

Pour effectuer les simulations, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- Le besoin en eau chaude reste identique pour chaque site (200 litres).
- La température finale est égale à 50 °C pour chaque Localité.

1.3 Données d'entrées pour les simulations

Le Tableau 6 et la Figure 12 résumes les données d'entrées considérées pour les simulations.

Tableau 6: Données d'entrées considérées pour les simulations.

Paramètres	Valeurs
LHSP max	10 %
Durée de vie du projet	20 Ans
Rendement du stockage (η_S)	0,80
Coût spécifique du capteur thermique ($\$/m^2$)	305
Coût de maintenance et d'opération	4 %
T (jour)	365



Type de capteur : A vitrage

Fabricant : Polster Energietechnik

Modèle : GPO-TEC 2000

Surface brute par capteur thermique : 1,96 m²

Surface de captage par capteur thermique : 1,86 m²

Rendement optique par capteur thermique : 80,7%

Coefficient de déperdition du 1^{er} ordre du capteur : 4,7 W·m⁻²·°C⁻¹

Coefficient de déperdition du 2nd ordre du capteur : 0,0036 W·m⁻²·°C⁻²

Figure 12 : Capteur choisi pour les simulations

1.4 Besoin énergétique pour chaque site

La **Figure 13** ci-dessous présente le besoin énergétique des différents sites pour un besoin en eau chaude de 200 litres.

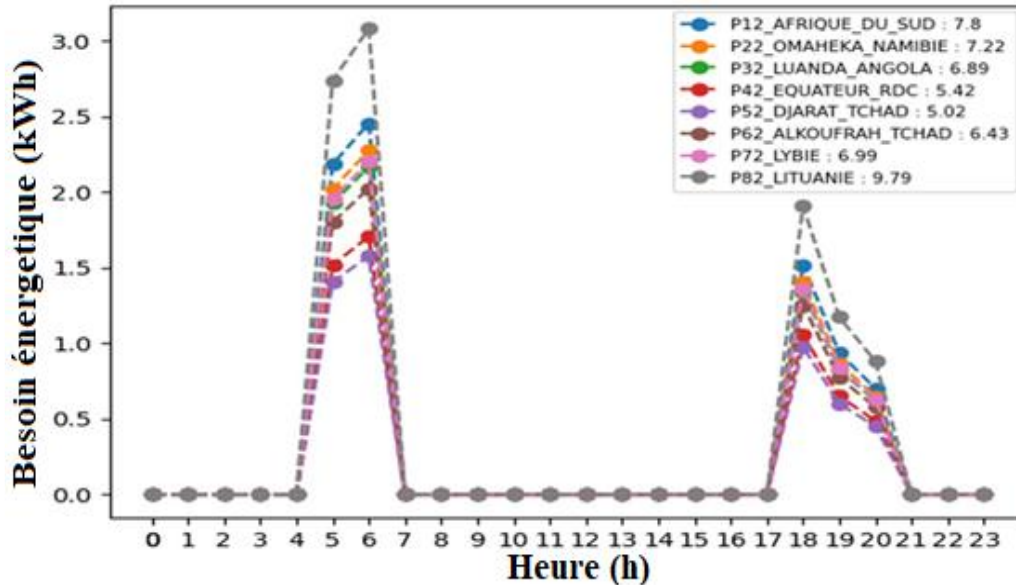


Figure 13: Besoin énergétique pour les différents sites sélectionnés.

Le besoin en énergie varie considérablement en fonction de la localisation géographique, avec une dépendance majeure sur l'ensoleillement et les conditions climatiques. Plus la région est ensoleillée, moins le chauffe-eau solaire nécessitera d'énergie supplémentaire pour fonctionner efficacement. Comme on peut le constater, le Tchad qui est une zone ensoleillée, a besoin de moins d'énergie que les autres zones moins ensoleillées.

2. Comparaison des résultats

2.1 Comparaison des logiciels de T*SOL et RETScreen à celui de la méthode KEG

Notre logiciel développé sur la base de la méthode KEG, est comparé à T*SOL et RETScreen. Pour que la comparaison entre les trois logiciels soit bien réalisée, il est important de s'assurer que les mêmes paramètres d'entrée sont utilisés par chacun des logiciels.

Le Tableau 7 présente les paramètres entrés pour chaque logiciel.

Tableau 7: Type de paramètres d'entrée requis pour les différents logiciels

Méthode KEG	RETScreen	T*SOL
<ul style="list-style-type: none"> • Données météorologiques • Besoin en eau chaude journalier • Température de l'eau chaude • Choix du capteur • Coûts exploitation et de maintenance • Coût spécifique des composants 	<ul style="list-style-type: none"> • Données météorologiques • Besoin en eau chaude journalier • Température de l'eau chaude • Choix du capteur • Coûts d'exploitation et de maintenance • Volume du ballon de stockage • Coût d'investissement initial, 	<ul style="list-style-type: none"> • Données météorologiques • Besoin en eau chaude journalier • Température de l'eau chaude • Choix du capteur • Coûts d'exploitation et de maintenance • Volume du ballon de stockage • Coût d'investissement initial

Dans le Tableau 7, les paramètres en couleur noire sont communs aux trois autres logiciels, tandis que les paramètres en rouge ne sont communs qu'à certains logiciels.

Il est important de noter que le volume de stockage qui est un paramètre d'entrée dans les autres logiciels est une donnée de sortie dans la méthode KEG.

2.2 Résultats de la simulation obtenue avec la méthode KEG

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

Dans cette section, les résultats des simulations sont présentés et analysés. Le **Tableau 8** présente les résultats des simulations effectuées pour chacun des sites.

Tableau 8: Résultats des simulations issus de la méthode KEG

Localité	Ext (kWh)	St (kWh)	LHSP Max (%)	Yth	LHSP calculé (%)	Surface des capteurs (m ²)	Volume de stockage (L)	LCoH (\$/kWh)	Lcc (\$)	alpha A	alpha N	Production annuelle (MWh)
Langeberg Ward, Afrique du Sud	11,43	5,13	10	0,6	10	3,56	131,51	0,053	3159,63	0,1	0	4,16
Omaheka, Namibia	10,16	4,65	10	0,59	7	2,80	128,78	0,049	2574,29	0	0,1	3,72
Lunda Sul Province, Angola	9,69	4,33	10	0,6	9	2,96	125,79	0,052	2635,88	0	0,1	3,54
Équateur, RDC	7,63	3,41	10	0,6	9	2,38	125,79	0,057	2263,53	0	0,1	2,78
Djarat Abounimir, Tchad	7,06	3,16	10	0,6	8,4	2,07	125,61	0,051	1851,82	0	0,1	2,57
Al-Koufrah, Tchad	9,06	4,14	10	0,59	7,92	2,76	128,73	0,048	2275,1	0	0,1	3,3
Al Karmah Town, Libya	11,68	5,86	10	0,59	7,98	5,91	167,69	0,057	3454,64	0,3	0	4,27
Vėlaičiai, Lithuania	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Le facteur de qualité thermique varie d'un site à l'autre. Le LHSP pour les 7 premiers sites est inférieur ou égal au LHSP_{max} défini au début (10 %). Par contre, pour la Lituanie nous n'avons pas de résultats parce que le besoin pour le LHSP_{max} défini ne peut pas être satisfait.

2.3 Comparaison des résultats obtenus avec la méthode KEG et ceux des logiciels RETScreen et T*SOL

Cette section compare les résultats de simulation obtenus avec les différentes méthodes de dimensionnement.

Pour effectuer la comparaison, nous avons saisi dans T*SOL et RETScreen les dimensions des systèmes dimensionnés avec la méthode KEG, ainsi que les paramètres d'entrée utilisés (données météorologiques, type de capteur, paramètres financiers, etc.). Les critères de comparaison entre les trois logiciels sont la production énergétique annuelle, le LCoH et le taux de couverture solaire.

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

Tableau 9: Comparaison des résultats obtenus avec la méthode KEG et ceux obtenus avec les logiciels T*SOL et RETScreen.

Site	Méthode KEG			T*SOL			RETScreen		
	Production énergétique annuelle (MWh)	Taux de couverture (%)	LCoH (\$/kWh)	Production énergétique annuelle (MWh)	Taux de couverture (%)	LCoH (\$/kWh)	Production énergétique annuelle (MWh)	Taux de couverture (%)	LCoH (\$/kWh)
Langeberg Ward, Afrique du Sud	4,16	90	0,053	2,52	76,56	0,076	2	68	-
Omaheka, Namibia	3,72	93	0,049	2,76	89,42	0,056	1,9	72	-
Lunda Sul Province, Angola	3,54	91	0,052	2,33	78,25	0,069	1,8	73	-
Équateur, RDC	2,78	91	0,057	1,63	68,99	0,085	1,2	61	-
Djarat Abounimir, Tchad	2,57	92	0,051	2,06	76	0,054	1,4	79	-
Al-Koufrah, Tchad	3,3	92,08	0,048	2,87	83,21	0,052	2	87	-
Al Karmah Town, Libya	4,27	92,02	0,057	3,2	99,25	0,065	2,4	93	-
Vėlaičiai, Lithuania	0	0	0	0	0	0	0	0	-

❖ **Comparaison de la production énergétique annuelle**

La **Figure 14** ci-dessous montre la production énergétique annuelle obtenue pour chacun des sites avec les trois logiciels pour le profil de consommation en eau chaude donné ci-dessus.

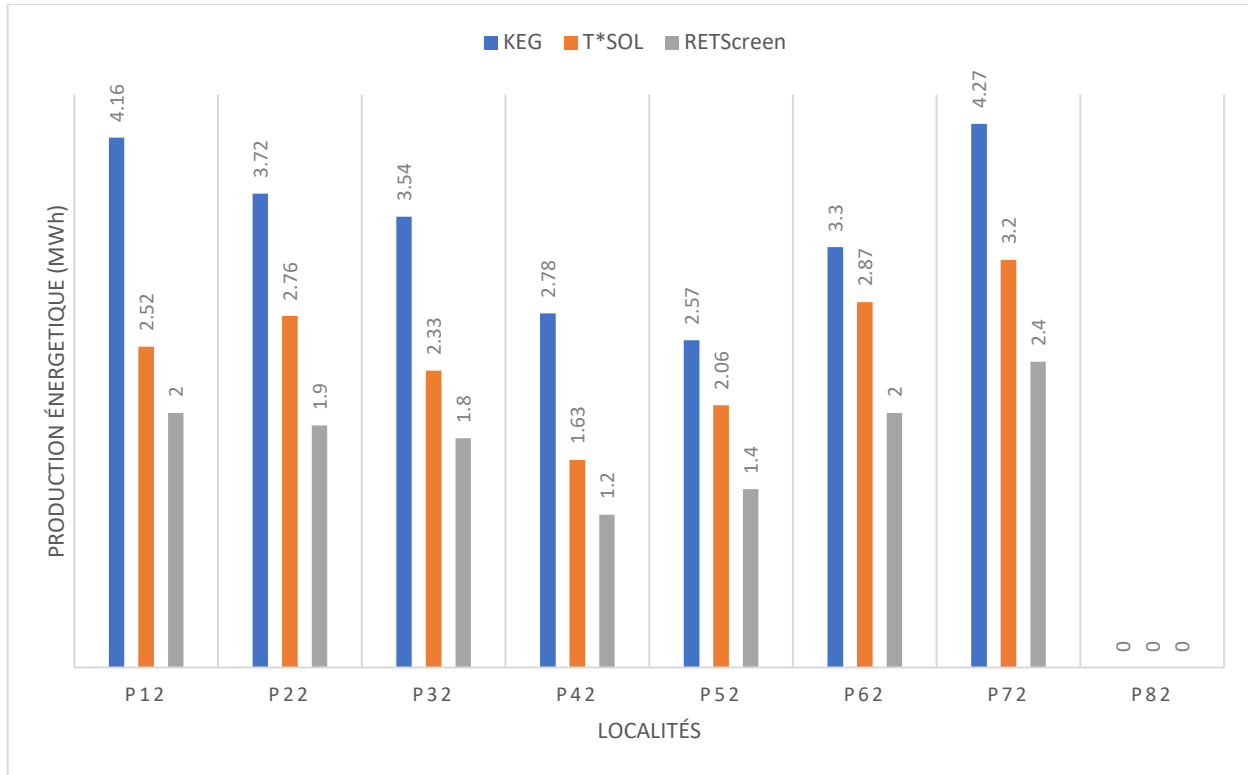


Figure 14: Comparaison de la production énergétique annuelle

Les observations suivantes ont été faites :

- 1- La production énergétique annuelle obtenue par la méthode KEG est toujours supérieure à celles obtenues avec T*sol et RETScreen ;
- 2- La production énergétique obtenue avec T*SOL est dans la plupart des cas supérieurs à RETScreen.

La méthode KEG obtient de meilleurs résultats en termes de production énergétique que T*SOL et RETScreen. Cette supériorité peut être attribuée au fait que les couples (α_a, α_n) , représentant respectivement les coefficients de stockage favorable et défavorable, cruciaux pour l'optimisation dans la méthode KEG, ne sont pas pris en compte dans T*SOL et RETScreen.

❖ **Comparaison du LCoH**

La **Figure 15** ci-dessous, montre le LCoH obtenu pour chacun des sites avec les trois logiciels pour le profil de consommation en eau chaude considéré (**Figure 10**).

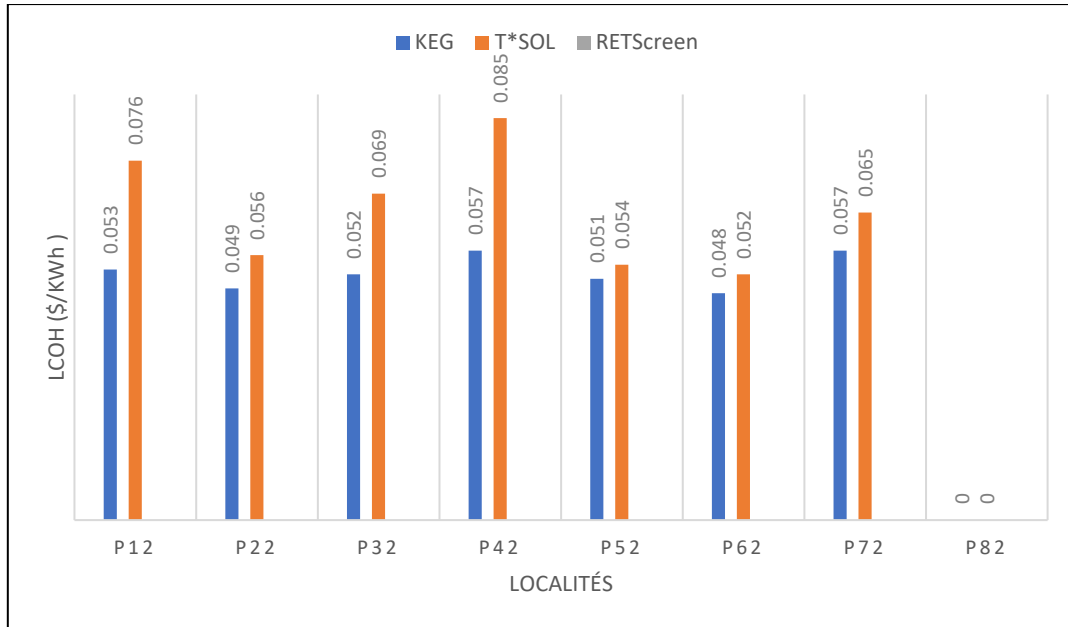


Figure 15 : Comparaison du LCoH

Il n'est pas possible d'avoir le LCoH avec le logiciel RETScreen. De ce fait, nous avons fait la comparaison en prenant en compte les résultats obtenus avec T*SOL et la méthode KEG.

L'observation suivante est faite : le LCoH obtenu par la méthode KEG est dans tous les cas inférieurs aux résultats obtenus avec T*SOL.

La méthode KEG offre les meilleurs résultats en termes de LCoH. Cette performance s'explique par une production énergétique supérieure à celle obtenue avec les autres logiciels, à savoir T*SOL et RETScreen.

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

❖ Comparaison du taux de couverture en eau chaude

La **Figure 16** ci-dessous montre le taux de couverture en eau chaude obtenu pour chacun des sites avec les trois logiciels pour le profil de consommation en eau chaude considéré pour les simulations.

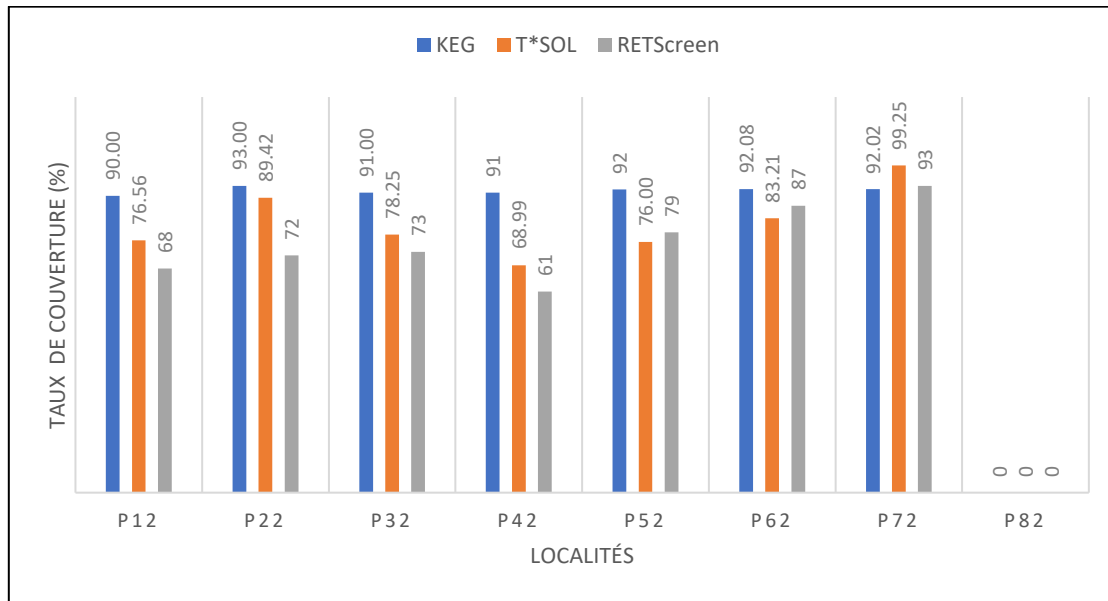


Figure 16 : Comparaison du taux de couverture en eau chaude

Les observations suivantes ont été faites :

- 1- Le taux de couverture en eau chaude obtenu avec la méthode KEG est dans la plupart des cas supérieur à ceux obtenus avec les deux autres logiciels.
- 2- La méthode KEG donne les meilleurs résultats en ce qui concerne taux de couverture dans la majeure partie des cas.

Au vu des résultats ci-dessus exposés, nous concluons que la méthode KEG appliquée aux systèmes solaires thermiques basse température (pour la production d'eau chaude sanitaire) conduit à des résultats plus intéressants que ceux obtenus avec les logiciels ou méthodes existants.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce mémoire consistait à appliquer la méthode KEG pour le dimensionnement des systèmes de chauffe-eaux solaires à basse température. Pour parvenir à cette fin, la première étape a été de réaliser une revue des méthodes de dimensionnement existantes pour les chauffe-eaux solaires. Ensuite, des équations de dimensionnement spécifiques ont été élaborées en utilisant une approche analogue à la méthode KEG, qui est traditionnellement utilisée pour dimensionner les systèmes solaires photovoltaïques.

L'application de la méthode KEG au dimensionnement des chauffe-eaux solaires se distingue par trois aspects principaux. Tout d'abord, le profil du besoin en chaleur est divisé en deux catégories : le besoin énergétique favorable, associé à la disponibilité de la ressource énergétique, et le besoin énergétique défavorable, lié à l'indisponibilité de la ressource énergétique. Ensuite, le besoin en stockage est examiné selon deux perspectives : le stockage de gestion ou favorable au moment de la disponibilité de la ressource, et le stockage de production ou défavorable pendant la période d'indisponibilité de la ressource. Enfin, la production énergétique utile pour répondre au besoin est également considérée sous deux angles : le productible utile favorable, pour la période où la ressource énergétique est disponible, et le productible utile défavorable, pour la période où la ressource énergétique n'est pas disponible.

Une analyse comparative a été menée en utilisant deux logiciels de dimensionnement couramment utilisés (T*SOL et RETScreen), ainsi que la méthode KEG appliquée au dimensionnement des systèmes solaires basse température. Les résultats de cette comparaison ont abouti à une conclusion significative : Pour un besoin identique en eau chaude de 200 litres dans huit localités différentes, avec une Probabilité de perte d'alimentation en chaleur (LHSP) définie à 10 % ou un taux de couverture de 90 %, la méthode KEG s'est révélée être la meilleure option dans la plupart des cas en termes de compromis entre la fiabilité technique (probabilité de répondre aux besoins énergétiques) et l'accessibilité économique (LCoH) des systèmes dimensionnés, comparativement à T*SOL et RETScreen.

Nos principales recommandations sont les suivantes :

- Effectuer des études expérimentales en vue de valider les résultats obtenus avec la méthode KEG ;

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

- Réaliser des études sur l'irradiance solaire nécessaire pour le démarrage de la production d'eau chaude avec un chauffe-eau solaire. L'objectif de cette étude est de déterminer le seuil d'irradiance solaire à partir duquel une augmentation de la température de l'eau est constatée, afin de mieux quantifier les besoins favorable et défavorable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S.A. H, N K, M M. Performances journalières d'un chauffe-eau solaire, 2008.
- [2] S.A. H, KACI K. L'évolution du chauffe-eau solaire en Algérie.
- [3] Tayyebatossadat PA. Solar Electric and Solar Thermal Energy: A Summary of Current Technologies. 2014.
- [4] GBOSSOU C. Sciences Eaux & Territoires. 2019.
- [5] HANS GF. TECHNOLOGIE DES CHAUFFE – EAUX SOLAIRES INDUSTRIELS POUR LA PASTEURISATION DU LAIT, mémoire de master 2. 2012.
- [6] Aghilas B. Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau. 2018.
- [7] Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique. Guide pratique : chauffe-eau solaire. 2017.
- [8] COSTIC. EAU CHAUDE SANITAIRE SOLAIRE Application à l'individuel et au collectif GUIDE POUR L'INSTALLATEUR. 5^{ème} éditions 2013.
- [9] AEE – Institute for Sustainable Technologies. DIMENSIONING AND DESIGN OF SOLAR THERMAL SYSTEMS. A-8200 Gleisdorf.
- [10] N'TSOUKPOE KE. Solar Energy II. 2018.
- [11] Duffie JA, Beckman WA, Blair N. Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind. 5eme édition 2020.
- [12] Manuel d'ingénierie et d'études de cas, RETScreen. Troisième édition. 2006.
- [13] Valentin S. Manuel d'utilisation T*SOL.
- [14] Ayompe LM, Duffy A, McCormack SJ, Conlon M. Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors. Appl Therm Eng. Juin 2011.
- [15] Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Huang YJ, Pedersen CO, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy Build. Avril 2001.
- [16] U.S. Department of Energy U.S. Department of Energy. EnergyPlus Version 22.2.0 Documentation. 2022.
- [17] Fumo N, Mago P, Luck R. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. Energy Build. Décembre 2010.
- [18] Altoé L, Oliveira Filho D, Carlo JC, Monteiro PM de B. Computer tools applied to analysis of solar water heaters. Eng Agríc, Octobre 2013.

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

- [19] AZOUMAH YK, TOSSA A. Dimensionnement de systèmes solaires PV » ; Support de cours ; KYA-ENERGY Group ,2018.
- [20] AZOUMAH YK, TOSSA AK. Sizing method for off-grid fluctuating energy systems, 2022.
- [21] Iparragirre I, Huidobro A, Aránzazu A. Solar thermal collectors for medium temperature applications: a comprehensive review and updated database, 2016.
- [22] Louvet Y, Fischer S, Federico G. LCoH for Solar Thermal Applications, 2019.
- [23] Ferreira AC, Silva Â. Application of a Costing Methodology to Estimate Capital Costs of Solar Thermal Systems in Residential Portuguese Context, 2020.
- [24] Ferreira AC, Silva A, Teixeira J é C, Teixeira S. Multi-Objective Optimization of Solar Thermal Systems Applied to Portuguese Dwellings, 2020.

ANNEXES

Annexe A: Organigramme de KYA-Energy Group	46
Annexe B: Détermination de la fiabilité technique d'un CES	47
Annexe C: Détermination de l'accessibilité économique d'un chauffe-eau solaire (LCoH)	50
Annexe D: Détermination du coût spécifique des capteurs et du coût du ballon de stockage	51

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

Annexe A: Organigramme de KYA-Energy Group

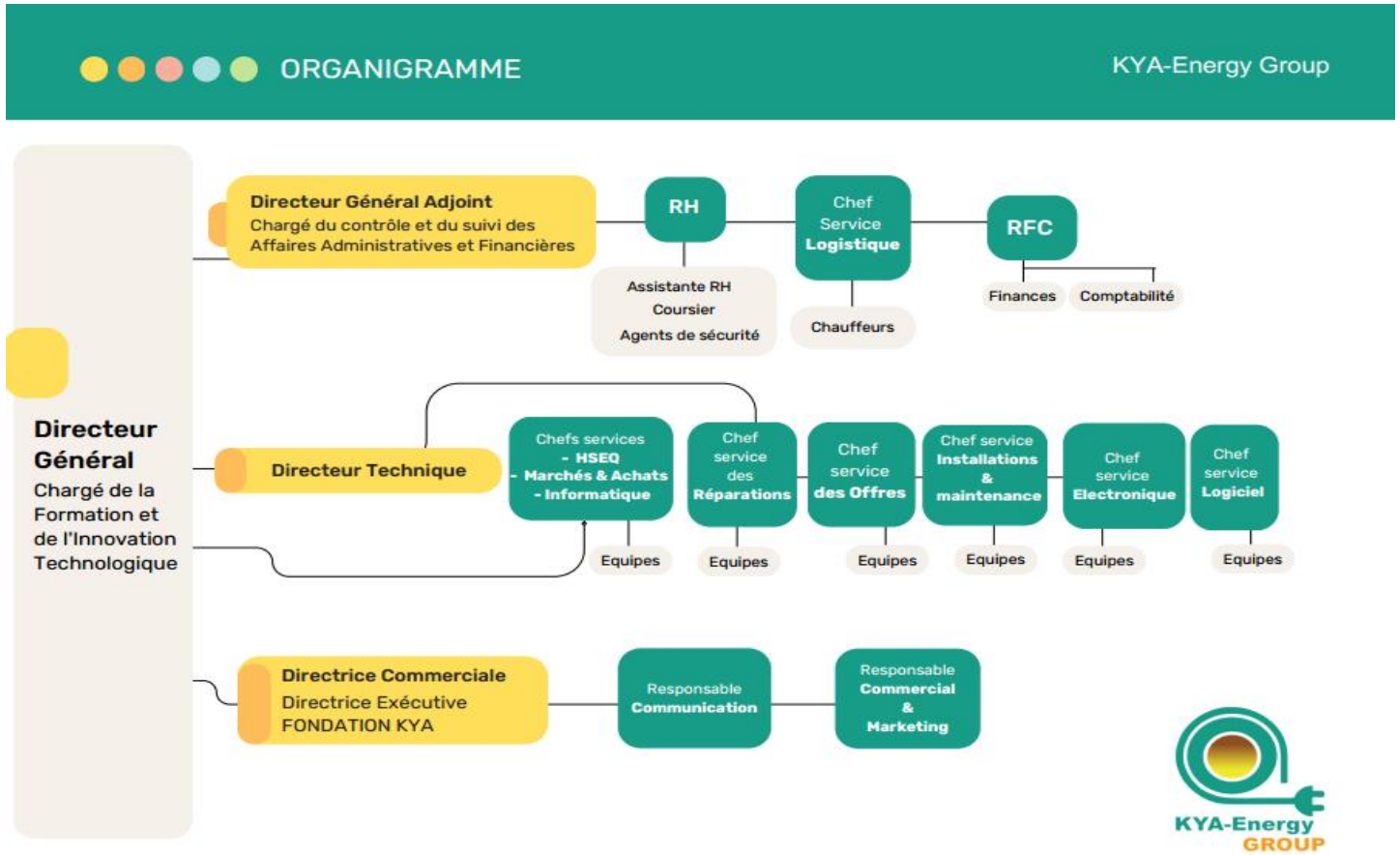


Figure A.1. Organigramme de KYA-Energy Group

Annexe B: Détermination de la fiabilité technique d'un CES

Comme on peut le voir sur la Figure B.1, 4 principales étapes permettent d'évaluer le LHSP et sont énumérées ci-dessous.

Étape 0 : Saisie des données d'entrée.

Étape 1 : Lecture du besoin en chaleur $E(t)$ et évaluation du productible utile total horaire.

Initialisation du LHS à 0.

Étape 2 : Vérification de la production par rapport au besoin en chaleur.

Étape 2.1 : Vérification de la capacité du ballon de stockage à stocker de la chaleur.

Étape 2.1.1 : Évaluation de la quantité de chaleur qu'on peut stocker et la chaleur disponible pour remplir le ballon de stockage

Étape 2.1.2 : Évaluation de quantité de chaleur nécessaire pour remplir le ballon de stockage par rapport à la quantité de chaleur disponible.

Si elle est supérieure à la chaleur disponible pour remplir le ballon de stockage on passe à l'étape 2.1.2.1 sinon on passe à l'étape 2.1.2.2

Étape 2.1.2.1 : Remplissage du ballon de stockage avec la chaleur disponible

Étape 2.1.2.2 : Remplissage du ballon de stockage

Étape 2.2 : Vérification de la quantité de chaleur disponible dans le ballon de stockage pour compléter la production afin de satisfaire la demande en chaleur.

Étape 2.2.1 : Utilisation de la chaleur disponible dans le ballon de stockage afin de fournir la chaleur nécessaire pour compléter la production et satisfaire le besoin en chaleur.

Étape 2.2.2 : Évaluation de la demande en chaleur non satisfaite (LHS)

Étape 2.2.2.1 : Vérification de la capacité du ballon de stockage à stocker toute la chaleur produite.

Étape 2.2.2.1.1 : Remplissage du ballon de stockage avec la chaleur produite.

Étape 2.2.2.1.2 : Remplissage du ballon de stockage avec la chaleur maximale nécessaire.

Étape 3 : Mise à jour de l'état du ballon de stockage.

APPLICATION DE LA METHODE KEG AUX SYSTEMES SOLAIRES THERMIQUES BASSE TEMPERATURE

Étape 4 : fin de la simulation

Étape 4.1 : Évaluation du LHSP

Étape 4.2 : Poursuite de la simulation avec les données d'entrée de l'heure suivante

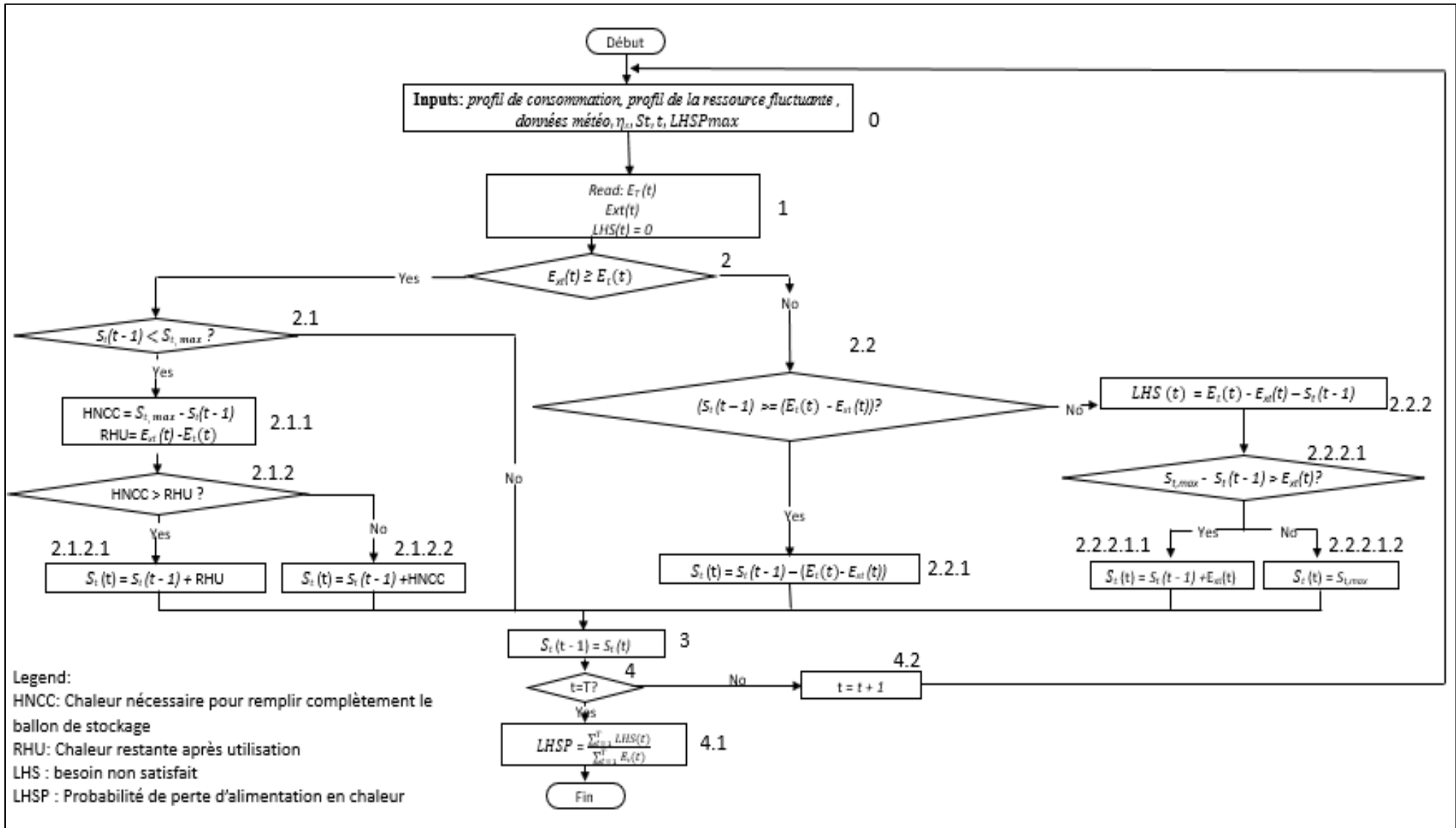


Figure B.1. Diagramme de détermination du LHSP

Annexe C: Détermination de l'accessibilité économique d'un chauffe-eau solaire (LCoH)

Le LCoH pour un chauffe-eau solaire est exprimé comme suit :

$$LCoH = \frac{I_0 - S_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (C.1)$$

Avec :

I_0 : Coût d'investissement initial (€) ;

S_0 : Subventions (€) ;

C_t : Coût d'opération et de maintenance (€/an) ;

E_t : Énergie produite (kWh/an) ;

r : Taux d'actualisation (%);

T : Période d'analyse (an).

Dans travaux nous avons utilisé la formule du LCoH suivante :

$$LCoH = \frac{LCC}{\sum_{t=1}^N \frac{E_{xt}}{(1+a)^t}} \quad (25)$$

Avec :

$$LCC = C_I + C_t$$

Où C_I et C_t représentant respectivement les coûts d'investissement initial et les coûts de maintenance et d'opération. Les subventions ne sont pas considérées.

N : la durée de vie du projet en années

E_{xt} : l'Énergie thermique produite sur une année en kWh

a : taux d'actualisation

Annexe D: Détermination du coût spécifique des capteurs et du coût du ballon de stockage

- **Évaluation du coût spécifique du capteur**

Le coût spécifique du capteur est obtenu à partir du rendement du capteur choisi en utilisant la courbe ci-dessous [23].

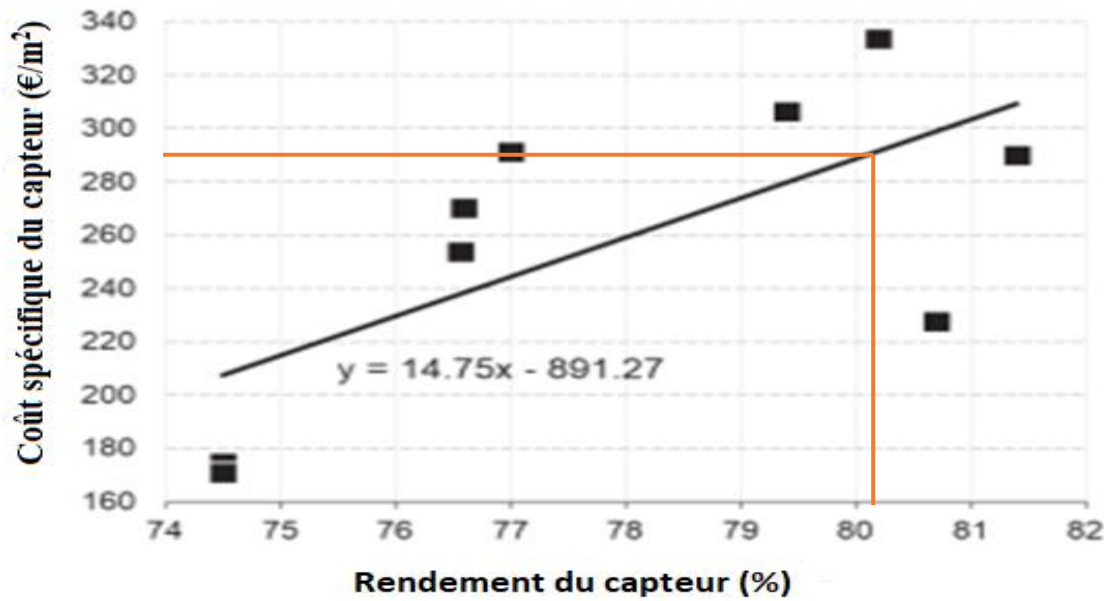


Figure D. 1. Courbe de détermination du coût spécifique du capteur

- **Évaluation du coût du ballon de stockage**

Le coût du ballon de stockage est obtenu à partir de la formule suivante [24]:

$$C_{storage} = C_{ref,storage} \cdot V_{ref,storage} \cdot \left(\frac{V_{storage}}{V_{ref,storage}} \right)^{b_{storage}} \cdot Ins_{storage} \quad (D.1)$$

Avec :

$C_{storage}$: coût du ballon de stockage

$C_{ref,storage}$: coût de référence (3 506 €/m³)

$V_{ref,storage}$: volume de stockage de référence (0.32 m³)

$V_{storage}$: Volume de stockage en (m³)

$b_{storage}$: facteur de dimensionnement (0,5)

$Ins_{storage}$: facteur de correction de l'isolation thermique (0.985)