

# *Conception Et Réalisation D'un Distillateur Solaire En Cascade Avec Appoint*

## *[Design And Realization Of A Cascade Solar Distiller With Extra Energy]*

Vincent Modeste<sup>1</sup>, Jean Luc Rasoanaivo<sup>2</sup>, Achille Ravoninjatovo<sup>3</sup>, Jean de Dieu Ramaroson<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

Antananarivo, Madagascar

<sup>1</sup>Email : modvincent@yahoo.fr

<sup>2</sup>Email : jeanlucnj@gmail.com

<sup>3</sup>Email : achillegc@yahoo.fr

<sup>4</sup>Email : ddramaro@yahoo.fr



**Résumé** – Le problème accru d’approvisionnement en eau potable oblige le monde entier à trouver des solutions alternatives. En plus des stratégies nationales de gestion des ressources hydriques disponibles, les efforts sont orientés vers l’obtention d’eau douce non conventionnelle. Le dessalement des eaux saumâtres et d’eau de mer est une option très convoitée, vu l’abondance de ces ressources naturelles. Toutefois, les installations à importante production journalière sont souvent hors de portée des pays en voie de développement. Ce qui a encouragé à développer les technologies plus simples et moins énergétivores, en particulier la distillation solaire. Le présent travail est axé sur l’étude et réalisation d’un distillateur solaire en cascade muni d’un appoint électrique, dans le but de contribuer à pallier à ce problème d’approvisionnement en eau potable. Les résultats montrent que la sollicitation de l’énergie d’appoint est fonction de la température de contrôle fixée et de la valeur du rayonnement solaire. L’analyse des résultats a montré une amélioration des caractéristiques de fonctionnement par rapport au témoin. Le chargement de 18000ml d’eau permettent de collecter 2650ml de distillat et 14990ml de saumure, dans les conditions climatique et géographique d’Antananarivo, lieu des expérimentations.

**Mots clés** – Eau saumâtre et eau de mer, dessalement, distillation solaire, énergie d’appoint, eau potable

**Abstract** – The increased problem of drinking water supply is forcing the world to find alternative solutions. In addition to national strategies for managing available water resources, efforts are being oriented on obtaining unconventional fresh water. Desalination of brackish water and seawater is a highly coveted option, given the abundance of these natural resources. However, large daily production facilities are often out of reach for developing countries. This has encouraged the development of simpler and less energy intensive technologies, in particular solar distillation. The present work is focused on the study and realization of a cascade solar still with an electrical extra energy, in order to contribute to solve the water supply problem. The results show that the demand on the extra energy is a function of the set control temperature and the solar radiation. The loading of 18000ml of saline water allows the collection of 2650ml of distillate and 1490 of brine in the climatic and geographical conditions of Antananarivo, the place of the experiment.

**Keywords** – Brackish and sea water, desalination, solar distillation, extra energy drinking water.

## I. INTRODUCTION

La pénurie d'eau est devenue une des préoccupations majeures de plusieurs pays, en voie de développement ou développés, et menace davantage ceux qui se croient épargnés actuellement. En général, 2,1 milliards de gens n'ont pas accès à une eau potable, salubre et propre [1]. La consommation mondiale de cette denrée ne cesse de croître et d'ici 2030, selon les estimations de l'Organisation des Nations Unies, la demande dépassera l'offre de 40% [2].

Madagascar n'est pas épargné par cette préoccupation mondiale. En effet, plusieurs localités de l'Ile font face à un grave problème d'approvisionnement en eau potable et plus particulièrement celles de l'Androy, Région australe de la grande Ile, où la majeure partie des réserves hydriques étant composée d'eau de mer et/ou d'eau saumâtre. Ce qui constitue un frein au développement économique de ladite Région.

Pour faire face à cette problématique d'approvisionnement en eau potable, plusieurs pays optent pour une politique ferme en matière de gestion rationnelle et durable des ressources hydriques disponibles, et sollicitent davantage d'autres ressources en eau comme les eaux saumâtres et de mer. Plusieurs procédés de dessalement ont été développés ces dernières années, mais la plupart d'eux sont énergétivores, et souvent hors de portée des pays à faibles revenus. De ce fait, le recours à la distillation solaire s'avère une solution alternative, pérenne et prometteuse, car souvent les pays concernés disposent d'énormes potentiels en énergie solaires et de ressources en eau saumâtre et de mer. Plusieurs travaux ont été réalisés à travers le monde dans le domaine du dessalement par la distillation solaire, ces dernières décennies, mais le handicap majeur reste la faible production journalière des modèles proposés.

Le présent travail vise à apporter une contribution dans l'amélioration de la distillation solaire en cascade à effet de serre par injection d'appoint électrique contrôlé au niveau du processus d'évaporation, directement dans l'eau d'un des bacs. En effet, certains auteurs mentionnent les difficultés rencontrées au niveau de l'échange de chaleur, si le préchauffage est effectué en dehors de l'enceinte [3].

## II. MATERIELS ET METHODES

Cette partie informe sur les matériels et appareils de mesure utilisés, ainsi que l'approche méthodologique adoptée, pour la réalisation des travaux de recherches.

Deux prototypes de distillateurs en cascade à 04 étages ont été confectionnés (Photos 1 et 2), le premier simple sans appoint sert de témoin et le second avec appoint fait objet de cette étude.

### 2.1 Modélisation du distillateur solaire

L'établissement du bilan des transferts thermiques et de masse se produisant dans le distillateur solaire repose, en général, sur des hypothèses simplificatrices visant à faciliter l'écriture des différentes équations, comme :

- Les pertes thermiques sur les côtés sont négligeables et les échanges avec l'extérieur ne se font que par la couverture verrière et le bas du bac absorbant,
- Les températures du bac absorbant, de la saumure, de la zone tampon et du couvercle sont supposées uniformes,
- Les échanges à l'intérieur du distillateur se font respectivement de la surface d'évaporation vers la zone tampon, puis de cette dernière vers la surface de condensation (R. Menina *et al.*).
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes

Il est à souligner que les échanges de chaleur ayant lieu dans les deux prototypes de distillateur solaire, l'un servant de témoin et l'autre en version avec appoint, sont pratiquement similaires, sauf que pour le second intervient la quantité de chaleur générée par la résistance électrique immergée dans l'un des bacs.

Il est à noter que l'étude du système s'effectue en régime transitoire par la méthode des analogies électriques qui conduisent à des bilans thermiques plus simples.

### 2.1.1. Méthode des analogies électriques

Cette méthode réside sur le fait que si deux systèmes sont régis par la même équation, ils admettent les mêmes types de solutions. La résolution du système le plus simple s'avère donc avantageux pour déduire la solution de l'autre plus difficile.

En général, le flux de chaleur échangé entre deux milieux de températures respectives  $T_1$  et  $T_2$  est de la forme :  $\Phi = h.S.(T_1 - T_2)$

L'identité formelle existant entre cette expression avec celle de la loi d'Ohm :

$I = 1/R_{elec} (V_1 - V_2)$ , permet d'utiliser la « méthode des analogies électriques » pour modéliser l'ensemble du système. D'où  $h = 1/R_{th} S$  ;  $R_{th}$  : Résistance thermique

En effet lorsque deux phénomènes physiques sont décrits par des équations ayant la même forme mathématique et que l'un d'entre eux est facilement accessible par l'expérience, on peut profiter de l'utilisation des équations de l'un pour décrire l'autre.

Avec cette méthode :

- les températures sont représentées par des potentiels électriques ;
- les flux de chaleur par des intensités de courant ;
- les inverses des coefficients d'échange par des résistances électriques ;
- les capacités thermiques par des capacités électriques ou condensateurs.

### 2.1.2. Démarche mathématique

Il suffit alors d'agencer les correspondances entre les grandeurs thermodynamiques et électriques et on établit ensuite le circuit. Une fois le circuit établi, on écrit la loi d'Ohm en chaque nœud, et on obtient autant d'équations que d'inconnues à déterminer.

Chaque élément d'une section du système (distillateur) à l'instant  $t$ , peut être représenté par un nœud placé en son centre, de température égale à la température moyenne de l'élément.

Ainsi, en écrivant le bilan thermique (ou la loi d'Ohm) pour chaque nœud, on aboutit à des équations de la forme :

$$M_i C_p i \frac{dT_i}{dt} = + \sum_{i=1}^n (q_i) + p_i \quad (1)$$

avec  $q_i$  : terme de sources

$p_i$  : terme de puits

### 2.1.3. Les différents échanges thermiques mis en jeu

Les différents échanges thermiques mis en jeu pour le distillateur avec appoint sont présentés sur la Figure 1 suivante.

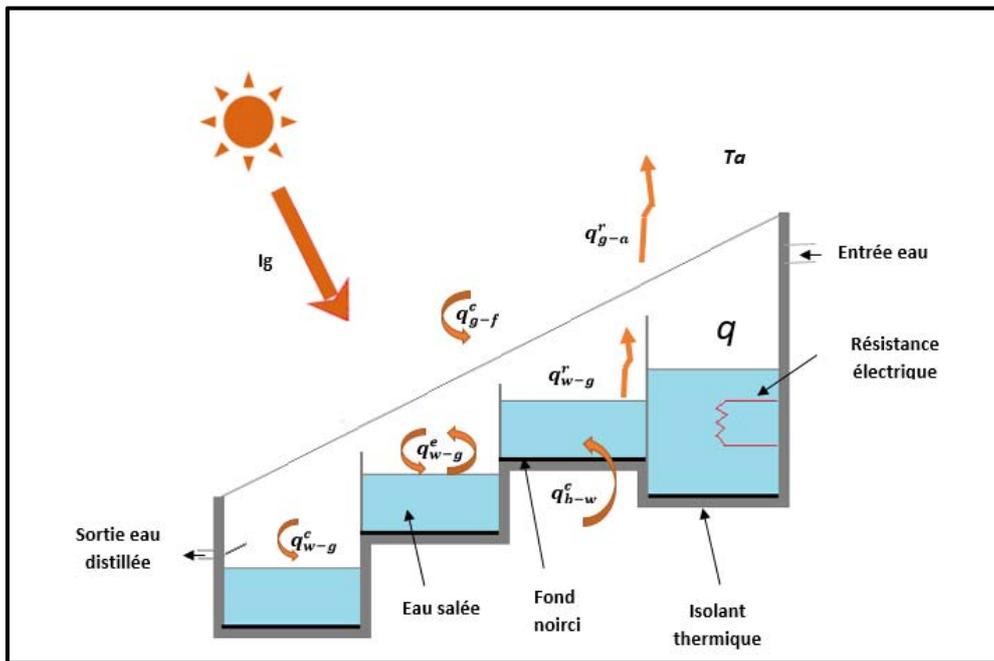


Figure 1 : Visualisation schématique des échanges thermiques pour le distillateur avec appoint

L'irradiation solaire  $I_g$ , qui constitue la source principale d'énergie pour le fonctionnement des distillateurs solaires à effet de serre est absorbée durant son parcours par la vitre du couvercle, par l'eau à dessaler et par le bac absorbant.

Les autres échanges de chaleur dans les différentes parties du distillateur sont les suivants.

#### Au niveau du couvercle en vitre

Le couvercle en vitre absorbe une partie du rayonnement solaire  $I_{gg}$  et reçoit de la masse d'eau un flux de chaleur par convection naturelle «  $q_{w-g}^c$  », par radiation «  $q_{w-g}^r$  » et par le phénomène de condensation «  $q_{w-g}^{cds}$  ». Il perd par contre un flux de chaleur par rayonnement  $q_{g-a}^r$  avec le milieu ambiant, et par convection  $q_{g-a}^c$  avec le milieu ambiant.

Les flux de chaleur reçus par le couvercle en vitre par convection et par radiation à partir de la masse d'eau sont les même que ceux cédés par la masse d'eau vers la vitre.

- Flux de chaleur cédé par rayonnement avec le milieu ambiant

$$q_{g-a}^r = h_{g-a}^r (T_g - T_a) \quad (2)$$

- Flux de chaleur cédé par convection avec le milieu ambiant

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c (T_g - T_a) \quad (3)$$

#### Au niveau de de la masse d'eau saline

La nappe d'eau des bacs absorbe une partie de l'énergie solaire incidente  $I_{gw}$ , cède un flux de chaleur par convection  $q_{w-g}^c$  et par radiation  $q_{w-g}^r$  à la vitre, et en même temps, perd un flux de chaleur grâce à l'évaporation (changement de phase liquide-vapeur)  $q_{w-g}^e$ .

- Energie solaire absorbée par l'eau

$$I_{gw} = \alpha_w \tau_g I_g \quad (4)$$

- Flux de chaleur transmise par le fond du bac

$$q_{b-w}^c = h_{b-w}^c (T_b - T_w) S_b \quad (5)$$

- Flux de chaleur cédé par convection vers la vitre

$$q_{w-g}^c = h_{w-g}^c (T_w - T_g) S_w \quad (6)$$

- Flux de chaleur cédé par radiation vers la vitre

$$q_{w-g}^r = h_{w-g}^r (T_w - T_g) S_w \quad (7)$$

- Flux de chaleur cédé par évaporation

$$q_{w-g}^{ev} = h_{w-g}^{ev} (T_w - T_g) = mL_v \quad (8)$$

### Au niveau du bac absorbeur

Le bac absorbeur, composé de quatre étages, absorbe une grande partie de l'énergie solaire incidente  $I_{gb}$ , échange de la chaleur avec l'eau saline dans les bacs par convection  $q_{b-w}^c$  et en même temps, cède de la chaleur par conduction  $q_{cdw-ins}$  vers l'enceinte isolante.

- Energie solaire absorbée par le bac

$$I_{gb} = \alpha_b \tau_w \tau_g I_g \quad (9)$$

Echange de chaleur par convection entre le bac et l'eau

$$q_{b-w}^c = h_{b-w}^c (T_b - T_w) S_b \quad (10)$$

- Echange par conduction entre le bac et l'isolant

$$q_{b-is}^{cd} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} (T_b - T_{is}) S_b \quad (11)$$

### 2.1.4. Equations de transfert

Les équations traduisant le bilan thermique dans une section du distillateur sont les suivantes :

#### Au niveau de la vitre

$$M_g C_{pg} \frac{dT_g}{dt} = I_{gg} + q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{cds} - q_{g-a}^c + q_{g-a}^r \quad (12)$$

#### Au niveau de la masse d'eau saline

Le bilan thermique de la nappe d'eau dans le distillateur avec appoint diffère de celui du distillateur témoin par l'ajout de l'énergie calorifique  $\dot{q}$  :

$$M_w C_{pw} \frac{dT_w}{dt} = I_{gw} + q_{b-w}^c + \dot{q} - q_{w-g}^c - q_{w-g}^r - q_{w-g}^{ev} \quad (13)$$

#### Au niveau du bac absorbeur

$$M_b C_{pb} \frac{dT_b}{dt} = I_{gb} - q_{b-w}^c - q_{b-is}^{cd} \quad (14)$$

Avec :

- $I_{gg}, I_{gw}, I_{gb}$ , respectivement les puissances solaires absorbées par la vitre, l'eau,

le bac absorbeur

- $M_g, M_w, M_b$  les masses respectives de la vitre, de l'eau, du bac absorbeur
- $C_{pg}, C_{pw}, C_{pb}$ , les capacités calorifiques massiques respectives de la vitre, de l'eau,

du bac absorbeur

- $T_g, T_w, T_b$ , les températures moyennes respectives de la vitre, de l'eau,

du bac absorbeur

- $\alpha_g, \alpha_w, \alpha_b$ , les absorptivités respectives de la vitre, de l'eau, du bac absorbeur
- $\tau_g, \tau_w, \tau_b$ , les transmissivités respectives de la vitre, de l'eau, du bac absorbeur

## 2.2 Les matériels utilisés

### 2.2.1. Les matériels d'expérimentation.

Les deux prototypes de distillateurs (Photos 1 et 2) se présentent sous une forme parallélépipédique dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Couverture transparente en verre ordinaire de 4 mm
- Absorbeur en tôle plane noire (TPN 8/10), peinte en noire ;
- Nombre d'étages : 04, chaque étage est constitué d'un bac ;
- Dimension des distillateurs : 1m x 0,50m x 0,20m (L x l x h)
- Isolation : polystyrène



Photo 1. Vue de face des deux prototypes



Photo 2. Vue postérieure des prototypes

### 2.2.2. Les instruments de mesure et de contrôle

Les instruments de mesure et de contrôle utilisés sont (Photo 3) :

- 01 Thermoplongeur de 250 W logé dans le bac supérieur du deuxième distillateur, utilisé pour l'appoint calorifique
- 01 Thermostat de contrôle 32 – 85°C avec sonde, assurant la régulation de la température
- 01 HTC-1–Clock/Humidity & Temperature Digital LCD meter, utilisé Pour mesurer la température ambiante et l'humidité de l'air,
- 06 Thermomètres digitaux avec sonde, pour relever les températures aux différents points de mesures lors des expérimentations
- 02 Eprouvettes graduées,



Photo 3. Distillateur avec les instruments de mesure et de contrôle

### 2.2.3. La matière première

L'eau à dessaler constitue la seule matière première.

### 2.3 La méthode utilisée

En vue de l'optimisation de la productivité du distillateur fabriqué, des essais d'expérimentations ont été élaborés avec trois températures de consigne du régulateur correspondant respectivement aux positions de coupure de l'alimentation du thermoplongeur suivantes (Tableau 1):

Tableau 1 : Températures de consigne et positions de coupure

Positions	Températures de consigne
Position 3	Coupure à 68°C
Position 3,5	Coupure à 75°C
Position 4	Coupure 82°C

Le choix de ces températures de consigne réside par le fait que les expériences acquises au sein d'un distillateur simple (sans appoint) ont révélé que la température enregistrée est de l'ordre de 60°C. Il importe de souligner que les études expérimentales se sont déroulées à Antananarivo, capitale de Madagascar, recevant une valeur moyenne d'ensoleillement de 4,68 KWh.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> (Tableau 2).

Tableau 2 : Rayonnement solaire du site

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Rayonnement [KWh.m <sup>-2</sup> .j <sup>-1</sup> ]	5,22	5,08	4,77	4,33	3,81	3,48	3,51	4,18	5,10	5,68	5,65	5,42

Source RETSCREEN

Le but des essais d'expérimentation étant de déterminer les paramètres optimaux de fonctionnement du distillateur, tels que :

- la température de consigne idéale à adopter
- la quantité de matière première à distiller
- l'emplacement du distillateur, où les distillateurs doivent être placés de façon à éviter les obstacles "l'effet de masque", qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

Durant la collecte des données, les bacs ont numérotés de 1 à 4 (de l'amont vers l'aval). Les résultats, jugés représentatifs des expériences effectuées pour chaque position du thermostat de contrôle, c'est-à-dire, pour chaque valeur de température de contrôle, sont donnés ci-après.

#### 3.1. Données obtenues avec réglage du thermostat en Position 4

La température de consigne de la coupure de l'alimentation de l'appoint a été réglée à 82°C. L'expérience s'est déroulée sous une température ambiante moyenne de 25 °C et avec un refroidissement intermittent du couvercle.

La Figure 1 suivante montre la variation temporelle des paramètres mesurés.

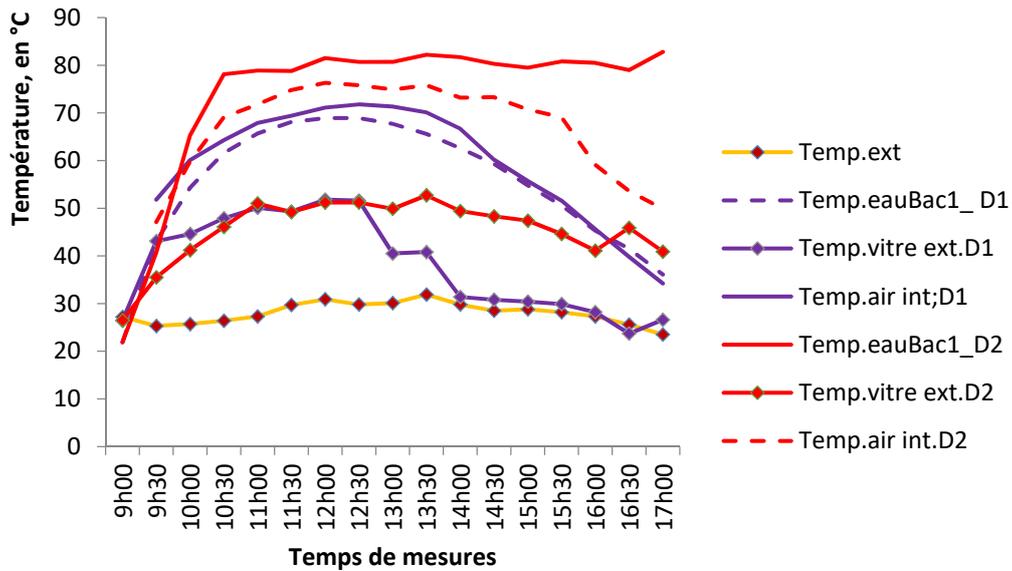


Figure 1. Variation temporelle de la température des paramètres mesurés

où : D1 Distillateur simple et D2 distillateur avec appoint ;

- Temp.ext      Température ambiante;
- Temp.eauBac1      Température de l'eau du premier bac;
- Temp.vitre ext.      Température extérieure de la vitre ;
- Temp.air int.      Température de la mixture air-vapeur.

Cette figure laisse apparaitre que l'eau du bac1 du distillateur avec appoint étudié D2, où est immergé le thermoplongeur, ainsi que la mixture air vapeur, sont maintenues à des niveaux de température largement supérieure à celles du distillateur témoin D1. Cette situation indique que le transfert de masse a été renforcé par le « boostage » effectué, et que probablement, la zone tampon qui se trouve habituellement dans la partie centrale de l'enceinte et qui freine l'évaporation [4] se trouve réduite.

Cette amélioration apporte un impact positif sur la production de distillat, comme le montre la Figure 2.

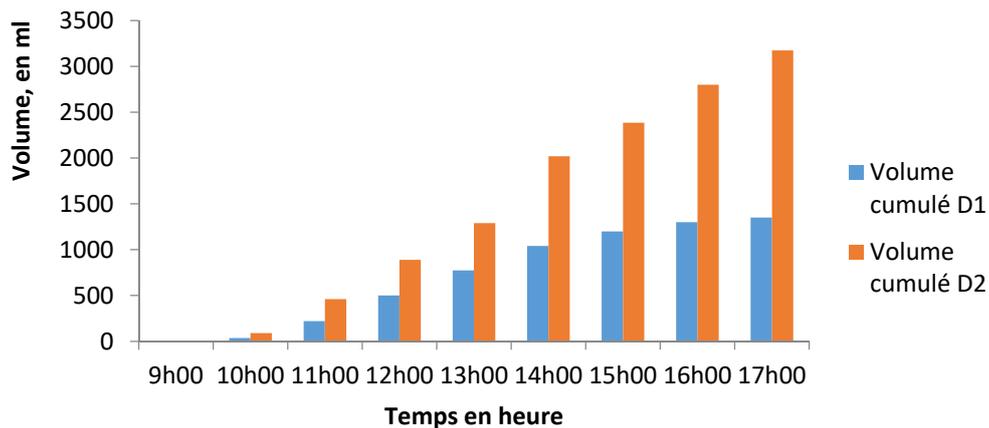


Figure 2. Volume cumulé de distillat

Quant à la durée de sollicitation de l'appoint, elle est très importante au début de l'expérience, décroît au milieu de la journée, puis remonte vers la fin de la journée (Figure 3).

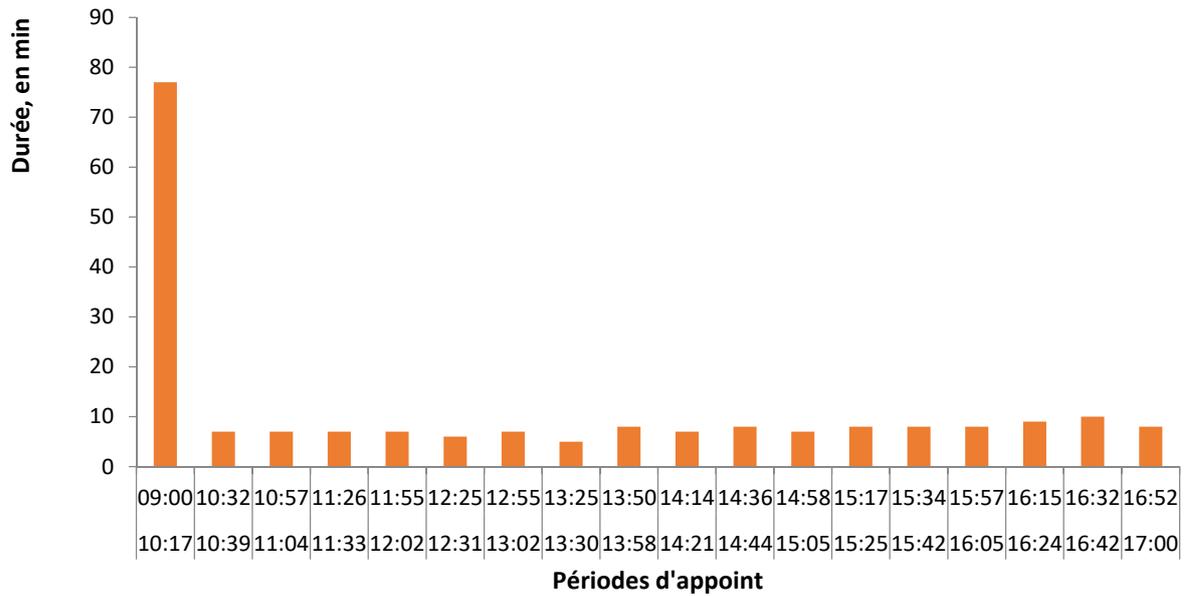


Figure 3. Variation temporelle de l'appoint.

### 3.2. Données obtenues avec réglage du thermostat en Position 3.5

La température de consigne de la coupure est à 75°C. L'expérience a été réalisée avec une température ambiante moyenne de 24°C et avec un refroidissement intermittent du couvercle.

La variation journalière des courbes relatives aux différents paramètres mesurés est illustrée sur la Figure 4 suivante.

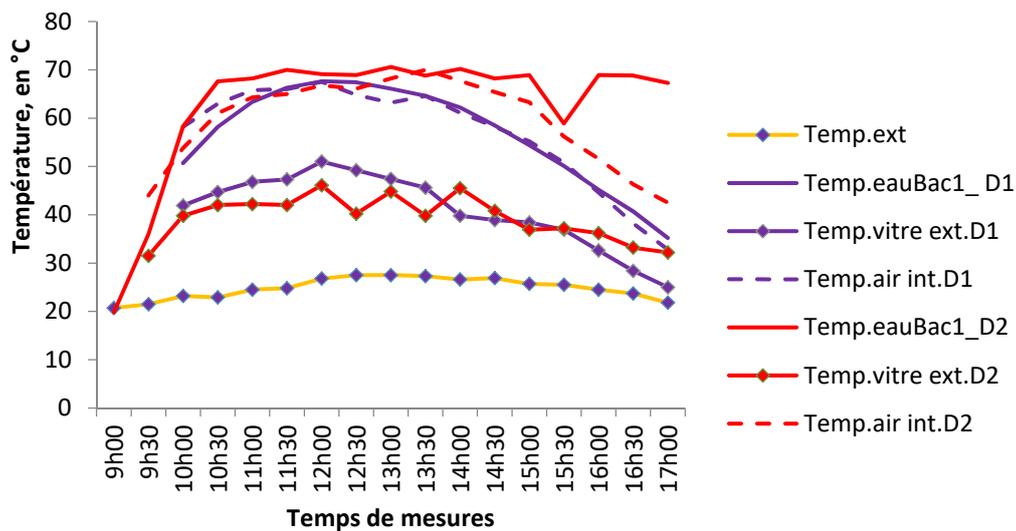


Figure 4. Variation temporelle des paramètres mesurés

Les courbes relatives au distillateur témoin (températures de l'eau du bac 1 et de la mixture air vapeur) se rapprochent à celles du distillateur avec appoint étudié. La faible valeur de la température ambiante a ralenti le fonctionnement du distillateur D2, qui a un surplus d'inertie thermique. Toutefois, l'effet de l'appoint a été observé et le distillateur étudié a dépassé de 70,5% le distillateur témoin en termes de production cumulée de distillat (Figure 5).

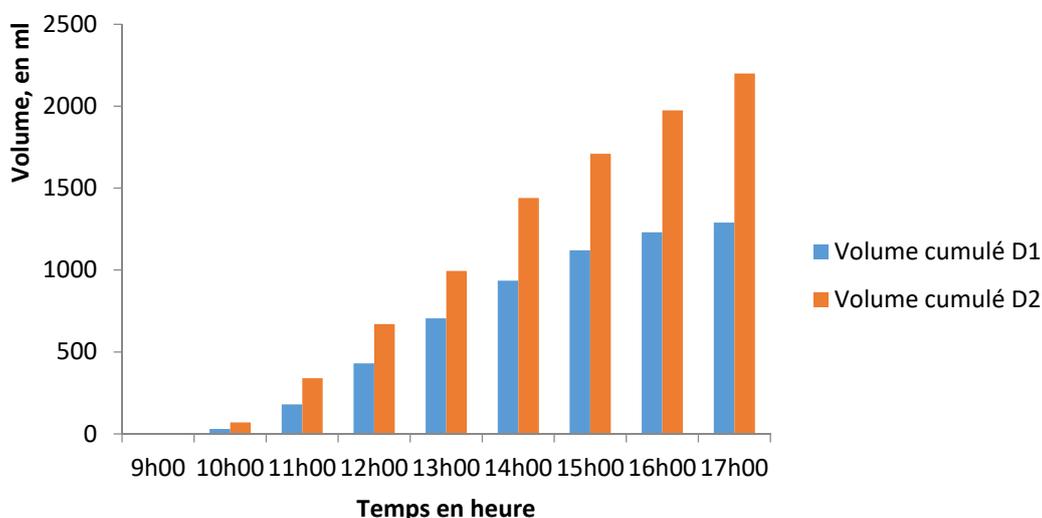


Figure 5. Production cumulé de distillat.

Le recours à l'appoint se fait plus espacé, à raison de deux seulement l'avant-midi (Figure 6).

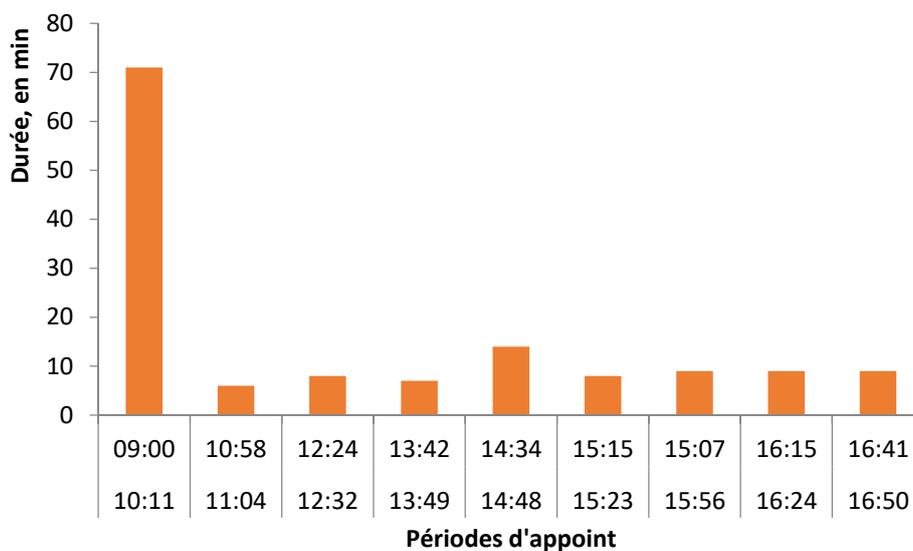


Figure 6. Variation temporelle de l'appoint

### 3.3. Données obtenues avec réglage du Thermostat en Position 3

La température de la coupure étant 68°C et l'expérience a été réalisée sous une ambiance moyenne de 25,5°C.

La Figure 7 suivante montre l'allure des courbes représentant la variation durant la journée des paramètres mesurés.

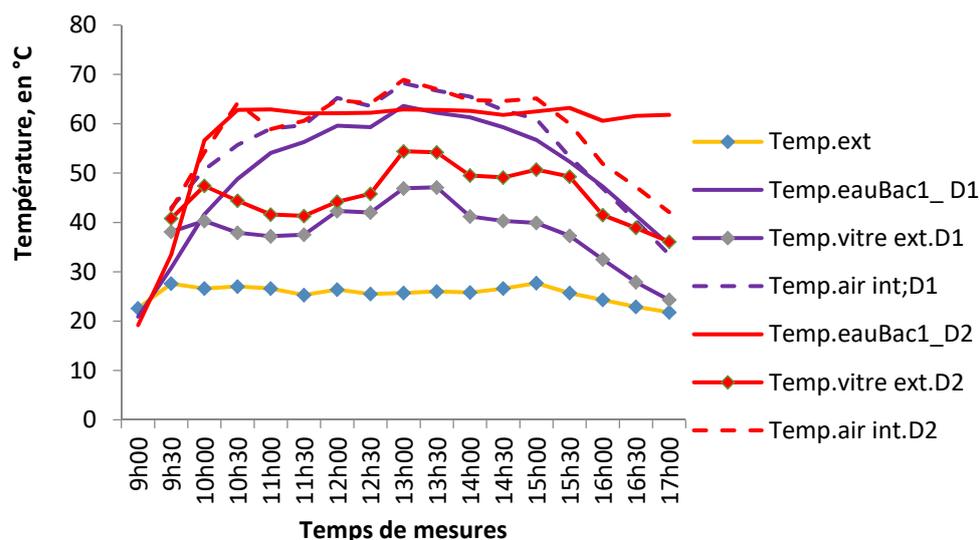


Figure 7. Variation temporelle des paramètres mesurés

La valeur maximale des sommets des courbes obtenues sur le fonctionnement des deux distillateurs est presque identique. L'effet de l'appoint se fait surtout ressentir sur les flancs, c'est-à-dire, en dehors de l'intervalle 12h – 14h. Ceci s'explique par le fait que la température de consigne de l'appoint sélectionné ici est voisine de celle générée par l'effet de serre seul.

Une amélioration de production de distillat de 52,22% a été obtenue pour le distillateur avec appoint étudié D2 vis-à-vis du témoin. La Figure 8 suivante montre la variation temporelle des volumes cumulés collectés.

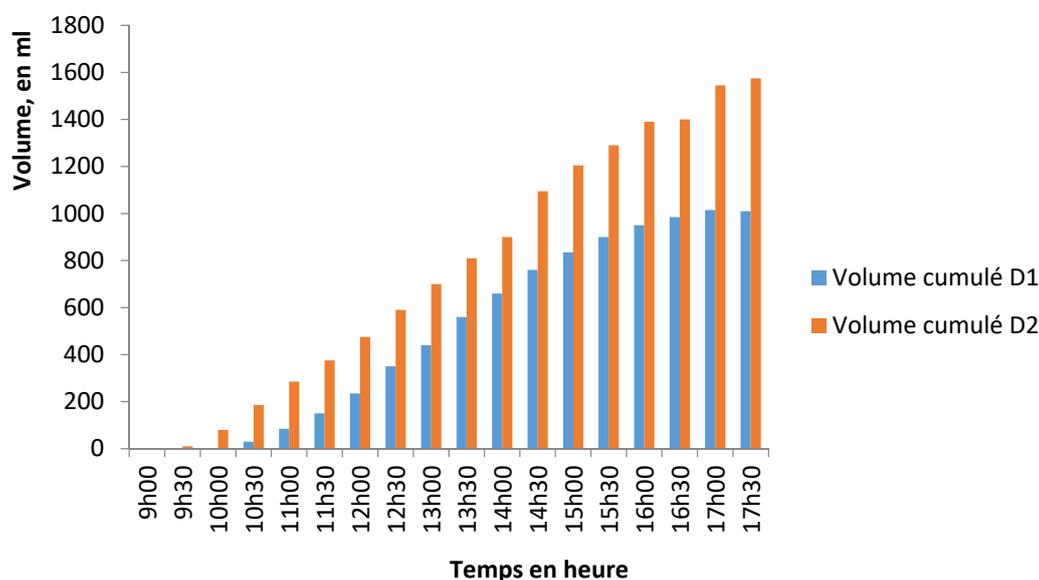


Figure 8. Variation temporelle des volumes cumulés

La fréquence et la durée de recours en énergie d'appoint sont illustrées par la Figure 9 ci-après. Il en est sorti que la sollicitation en énergie d'appoint est très limitée et se passe surtout durant la deuxième moitié de la journée.

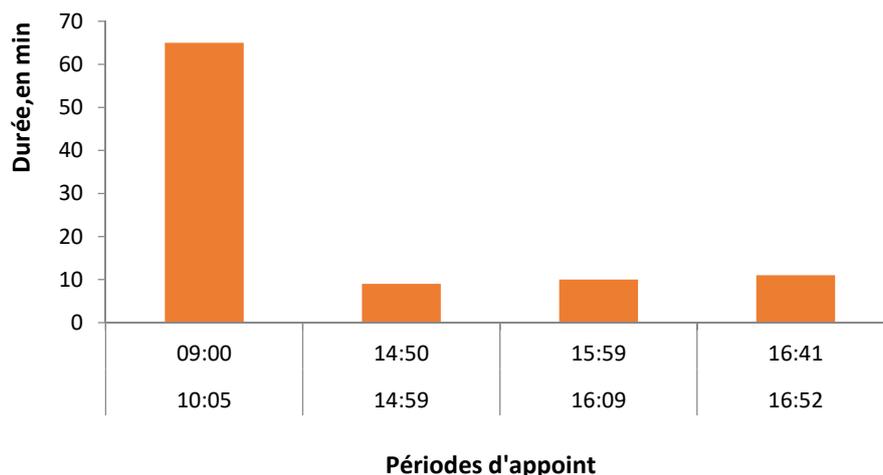


Figure 9.Variation temporelle de l'appoint

### 3.4. Résultat des essais de dessalement

Des essais de dessalement ont été effectués avec la condition de température optimale de consigne de 75°C.

L'analyse des résultats issus de ces essais ont révélé que le chargement de 18000ml d'eau salée permettant de collecter 2650 ml de distillat et 14990 ml de saumure s'avère la meilleure productivité.

Le temps de descente de la première goutte de distillat est entre 5 à 10mn

## IV. CONCLUSION

Bien que la ville d'Antananarivo se trouve au centre de l'île et est caractérisée par un climat d'altitude, avec une valeur d'irradiation solaire moindre par rapport aux zones littorales, les résultats obtenus ont permis d'avoir une idée générale sur l'application d'une source d'énergie directement immergée dans l'un des bacs du distillateur.

En premier lieu, elle permet de réduire efficacement la « période inerte », généralement de 8h-11h lors de préchauffage à l'extérieur de l'enceinte, améliorant ainsi le processus d'évaporation. En second lieu, le transfert thermique du bac muni de résistance vers les autres est favorisé à cause du fort gradient de température qui s'y forme. Ce qui accélère certainement l'évaporation.

Ainsi les conditions optimales d'utilisation du distillateur fabriqué seraient :

- Température de consigne de coupure de la résistance d'appoint : 75°C
- Quantité de saumure à traiter : 18000 ml, conduisant à l'obtention de 2650 ml de distillat

IL est à remarquer que l'utilisation d'un système photovoltaïque suffirait pour l'alimentation de la source calorifique de 250 W, vu que le pays bénéficie d'un ensoleillement favorable. En effet, le recours à l'appoint serait très espacé, surtout au milieu de la journée, permettant à la batterie solaire de se recharger suffisamment.

## REFERENCES

- [1] WHOlives (<https://wholives.org/our-mission/mission>)
- [2] Lignes directrices sur l'eau 2022-2025, Manual and guideline, Govt.Switzerland, (<https://reliefweb.int/eport/world/lignes-directrices-sur-leau-2022-2025>)
- [3] Cherrared L., Amélioration du rendement d'un distillateur solaire à effet de serre, Rev.Energ.Ren. : Valorisation (1999) 121-124.

- [4] Berge D. et Magdy A.R., Theoretical investigation on the performance prediction of solar still, Desalination, Volume : 128, Issue 2, 15 April 2000, Pages 139-145, ScienceDirect.
- [5] SELLAMI M.H. et al., Etude et amélioration de la performance d'un distillateur solaire simple par un système de couplage (chauffage - distillation), Annales des Sciences et Technologie Vol. 5, N° 2, 2013
- [6] Kerfah R. et al., Etude expérimentale d'un distillateur solaire couple à un capteur solaire plan. Le 5ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Oct. 2018.
- [7] Deliou A. et al., Etude expérimentale des caractéristiques d'un distillateur solaire à effet de serre, Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse (2008) 109 – 118