



# **CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU**

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
**MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE**

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 24/07/2023 par

**Djérambété Aristide NADJINGAR (2018 0178)**

**Directeur de mémoire : Dr. Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR),  
Maitre de Conférences CAMES**

**Encadrante 2iE : Ing. Ouo Adeline OUATTARA, Doctorante au LabEREE**

Structures d'accueil du stage : Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique  
(LabEREE) du 2iE

Jury d'évaluation du mémoire :

Présidente : Dr Marie TIEMTORÉ/SAWADOGO

Membres et correcteurs : Dr Sayon Dit Sadio SIDIBÉ  
M. Madieumbe GAYE

**Promotion [2022-2023]**

CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À  
ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

## DÉDICACES

---

*Je dédie ce mémoire*

*À mes parents Titdjebaye NADJINGAR et  
Gratadji SOU ainsi qu'à mes six frères et sœurs  
pour leur encouragement et leur soutien durant  
toutes ces années d'études.*

*À ma famille, amis et proches et à ceux qui me  
donnent de l'amour et de l'encouragement.*

*À tous ceux que j'aime.*

**CITATION**

---

*« Le plus difficile est de se décider à agir,  
le reste n'est que de la ténacité. »*

*Amelia Earhart*

*« Ose savoir ! »*

*Emmanuel Kant*

## REMERCIEMENTS

---

Avant de commencer, je tiens à remercier l'Éternel Dieu sans qui rien n'est possible. Je lui suis reconnaissant pour sa bonté, sa bénédiction et sa protection, lui qui guide mes pas depuis toujours et qui écoute même mes silences.

J'adresse mes remerciements à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) ainsi qu'à l'ensemble de son personnel pour m'avoir offert un cadre de formation et de développement professionnel de haute qualité.

Je dis un grand merci au Département Génie Électrique et Énergétique à travers son premier responsable, Dr. Yrèbégnan Moussa SORO, pour tout le soutien qu'il m'a apporté tout au long de mon parcours à l'Institut 2iE et particulièrement dans la réalisation de ce mémoire.

Je profite de l'occasion pour exprimer ma reconnaissance au Dr. Marie SAWADOGO, responsable du LabEREE, pour avoir compris ma motivation en me permettant de faire ce stage de recherche au sein de son laboratoire.

J'adresse un merci particulier au Dr. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE, mon directeur de mémoire. Je le remercie pour son soutien, ses recommandations, sa disponibilité et de m'avoir permis de profiter de sa haute qualité d'encadrement.

J'adresse également un grand merci à Dr GOMNA ABOUBAKAR, pour son précieux temps qu'il m'a accordé et pour les conseils essentiels qu'il m'a prodigués pendant le déroulement de mon stage.

Je tiens à témoigner mon immense gratitude à mon encadrante, Ing. Ouou Adeline OUATTARA, pour ses remarques sincères, son influence, son intérêt à l'égard de mon travail et pour le temps précieux qu'elle m'a accordé.

Je tiens également à remercier l'équipe du LabEREE, les doctorants et mes camarades stagiaires de m'avoir accepté, intégré et permis de réaliser ce document.

Pour finir, j'adresse ici un sincère merci à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu et ont contribué à la réalisation de ce travail.

## RÉSUMÉ

---

La demande d'énergie liée aux systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation n'a cessé de croître, surtout dans les régions à climat chaud telles que le Burkina Faso. L'objectif principal de ce projet est de mettre en place une unité de 16,7 kW<sub>f</sub> de puissance de refroidissement, utilisant la technologie de l'adsorption solaire, avec un champ de 44,64 m<sup>2</sup> de capteurs solaires sous-vide. Cette installation vient en association à un système de production de froid par compression de vapeur de 56,24 kW<sub>f</sub>. Ces deux systèmes sont utilisés pour la climatisation de l'amphithéâtre 2 (12°27'34" N ; 1°33'28" O) de l'Institut 2iE, d'une superficie de 233,39 m<sup>2</sup> et pouvant accueillir jusqu'à 252 personnes.

Le fonctionnement du système de refroidissement solaire utilisant le mélange de gel de silice et d'eau a été testé. Les résultats obtenus montrent que le circuit d'eau chaude permet d'atteindre une variation de température de 16 °C par rapport à la température de l'air ambiant en 95 min avec des pics de températures des capteurs allant à 95 °C en saison pluvieuse. Malheureusement une pompe intégrée dans la structure interne de la machine ne fonctionne pas et selon les premiers diagnostics, cet état est dû à un niveau de pression trop faible dans la machine. Toutefois, les autres circuits fonctionnent conformément aux attentes établies lors de l'étude préliminaire, à l'exception de la pompe du circuit de refroidissement qui présente des signes de vétusté. Grâce à ces travaux, outre un dysfonctionnement passager d'un composant interne de la machine à adsorption, l'Afrique Noire plus précisément l'Institut 2iE dispose d'un système de climatisation solaire par adsorption offrant une solution durable en énergie pour le confort des occupants de l'amphithéâtre 2 de Kamboinsin.

Mots clés : climatisation solaire, capteur solaire à tubes sous vide, machine à adsorption solaire, production de froid par compression, puissance de refroidissement.

## ABSTRACT

---

The demand for energy related to heating, ventilation, and air conditioning systems has been continuously increasing, especially in regions with hot climates such as Burkina Faso. The main objective of this project is to implement a 16.7 kW<sub>f</sub> cooling power unit using solar adsorption technology, with a field of 44.64 m<sup>2</sup> of vacuum tube solar collectors. This installation is combined with a 56.24 kW<sub>f</sub> vapor compression refrigeration system. Both systems are used for air conditioning the Amphitheatre 2 (12°27'34" N; 1°33'28" W) at the 2iE Institute, covering an area of 233.39 m<sup>2</sup> and accommodating up to 252 people.

The operation of the solar cooling system using the silica gel and water mixture has been tested. The results show that the hot water circuit achieves a temperature variation of 16 °C compared to the ambient air temperature in 95 minutes, with sensor temperatures peaking at 95 °C during the rainy season. Unfortunately, a pump integrated into the internal structure of the machine is not functioning, and initial diagnoses suggest that this is due to low pressure levels in the machine. However, the other circuits are functioning as expected based on the preliminary study, except for the cooling circuit pump, which shows signs of aging. Despite this temporary malfunction of an internal component of the adsorption machine, the 2iE Institute in Black Africa now has a solar adsorption air conditioning system that offers a sustainable energy solution for the comfort of the occupants of the Kamboinsin Amphitheatre 2.

Keywords: solar air conditioning, vacuum tube solar collectors, solar adsorption machine, vapor compression refrigeration, cooling power.

CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À  
ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

**SOMMAIRE**

---

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Dédicaces .....                                                                                      | ii  |
| Citation .....                                                                                       | iii |
| Remerciements .....                                                                                  | iv  |
| Résumé .....                                                                                         | v   |
| Abstract .....                                                                                       | vi  |
| Sommaire .....                                                                                       | 1   |
| Liste des tableaux .....                                                                             | 3   |
| Liste des figures .....                                                                              | 4   |
| Nomenclature .....                                                                                   | 5   |
| I. Introduction.....                                                                                 | 7   |
| I.1 Contexte et justification.....                                                                   | 7   |
| I.2 Objectifs de l'étude.....                                                                        | 7   |
| I.3 Démarche et organisation du travail .....                                                        | 8   |
| I.4 Cadre d'accueil et de travail .....                                                              | 8   |
| II. Revue documentaire sur la production de froid par compression de vapeur/adsorption<br>solaire 10 |     |
| II.1 Principe de fonctionnement de l'adsorption solaire continue .....                               | 10  |
| II.2 État de l'art sur la production de froid par adsorption.....                                    | 11  |
| III. Description du système mis en place .....                                                       | 15  |
| III.1 Machine à adsorption.....                                                                      | 15  |
| III.2 Champ de capteurs solaires thermiques.....                                                     | 16  |
| III.3 Tour de refroidissement.....                                                                   | 17  |
| III.4 Réservoirs .....                                                                               | 18  |
| III.5 Évaporateurs .....                                                                             | 19  |
| III.6 Séparateur de circuit .....                                                                    | 19  |
| III.7 Instrumentation .....                                                                          | 20  |



# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

|         |                                                                           |    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| III.7.1 | Mesure de température .....                                               | 21 |
| III.7.2 | Mesure de débit .....                                                     | 22 |
| III.7.3 | Mesure d'irradiance solaire .....                                         | 23 |
| III.7.4 | Centrale d'acquisition de données.....                                    | 23 |
| IV.     | Méthodologie de l'étude préliminaire .....                                | 24 |
| IV.1    | Étude préliminaire de l'installation .....                                | 24 |
| IV.1.1  | Configuration du champ solaire et charge à supporter par la toiture ..... | 24 |
| IV.1.2  | Circulateurs .....                                                        | 25 |
| IV.1.3  | Section des câbles et calibre des dispositifs de protection .....         | 27 |
| IV.1.4  | Épaisseur d'isolation .....                                               | 28 |
| IV.2    | Installation du système .....                                             | 29 |
| IV.3    | Tests de fonctionnement.....                                              | 30 |
| V.      | Résultats et discussions .....                                            | 31 |
| V.1     | Résultats et discussions de l'étude préliminaire .....                    | 31 |
| V.1.1   | Configuration du champ solaire .....                                      | 31 |
| V.1.2   | Circulateurs .....                                                        | 33 |
| V.1.3   | Section des câbles et calibre des dispositifs de protection .....         | 36 |
| V.1.4   | Épaisseur d'isolation .....                                               | 37 |
| V.2     | Aperçu de l'installation .....                                            | 39 |
| V.3     | Résultats et discussions du premier test de fonctionnement.....           | 40 |
| VI.     | Conclusion.....                                                           | 43 |
| VII.    | Perspectives.....                                                         | 44 |
| VIII.   | Bibliographie .....                                                       | 45 |
| IX.     | Annexes.....                                                              | 47 |

CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À  
ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

**LISTE DES TABLEAUX**

---

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Grandeurs mesurées et instruments de mesure. ....                | 20 |
| Tableau 2 : Affectation des tâches aux entités de réalisation. ....          | 29 |
| Tableau 3 : Charge de l'installation sur la toiture de l'amphithéâtre. ....  | 33 |
| Tableau 4 : Résultat dimensionnement des circulateurs. ....                  | 34 |
| Tableau 5 : Pompes retenues pour les différents circuits. ....               | 35 |
| Tableau 6 : Section des câbles électriques et calibre des disjoncteurs. .... | 37 |
| Tableau 7 : Conditions initiales de test .....                               | 40 |

## LISTE DES FIGURES

---

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Machine continue à adsorption [6].                                                                                                                | 10 |
| Figure 2 : Schéma du système à adsorption comprenant toute l'instrumentation.                                                                                | 15 |
| Figure 3 : Machine à adsorption. [Source : Fahrenheit].                                                                                                      | 16 |
| Figure 4 : Champ de capteurs solaires sous-vide.                                                                                                             | 16 |
| Figure 5 : Tour de refroidissement                                                                                                                           | 17 |
| Figure 6 : (a) Réservoir d'eau chaude ; (b) Réservoir d'eau glacée.                                                                                          | 18 |
| Figure 7 : Évaporateur Sharp de 3 ch.                                                                                                                        | 19 |
| Figure 8 : Séparateur de circuit ST-10.                                                                                                                      | 20 |
| Figure 9 : Résistance de platine Pt100.                                                                                                                      | 21 |
| Figure 10 : Débitmètre Khrono H250 M40.                                                                                                                      | 22 |
| Figure 11 : Pyranomètre Apogée CS301.                                                                                                                        | 23 |
| Figure 12 : Centrale d'acquisition de données Agilent 34972A.                                                                                                | 23 |
| Figure 13 : Vue de dessus du site présentant les obstacles.                                                                                                  | 25 |
| Figure 14 : Configuration et emplacement du champ solaire.                                                                                                   | 31 |
| Figure 15 : Modèle 3D de l'amphithéâtre et des obstacles environnants.                                                                                       | 32 |
| Figure 16 : Pertes d'irradiation mensuelles du système.                                                                                                      | 32 |
| Figure 17 : Points de fonctionnement des circulateurs dimensionnés. (a) circulateur du circuit d'eau glacée ; (b) circulateur du circuit de refroidissement. | 34 |
| Figure 18 : Point de fonctionnement des pompes retenues. (a) pompe du circuit d'eau glacée ; (b) pompe du circuit de refroidissement.                        | 36 |
| Figure 19 : Schéma électrique de l'installation.                                                                                                             | 37 |
| Figure 20 : Courbes de réduction des échanges thermiques.                                                                                                    | 38 |
| Figure 21 : Chauffage du réservoir d'eau chaude                                                                                                              | 40 |
| Figure 22 : Chauffage de la machine à adsorption                                                                                                             | 41 |
| Figure 23 : Alarme d'erreur dans la machine à adsorption                                                                                                     | 41 |
| Figure 24 : Évolution de la température d'eau glacée                                                                                                         | 42 |

# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

## NOMENCLATURE

| Général |                                                                    |                                                   |
|---------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| COP     | coefficient de performance                                         | -                                                 |
| f       | coefficient de correction                                          | -                                                 |
| G       | irradiation journalière                                            | $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jr}^{-1}$ |
| g       | Pesanteur                                                          | $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$                      |
| HMT     | hauteur manométrique totale                                        | m                                                 |
| I       | intensité du courant                                               | A                                                 |
| j       | perte de charge linéique                                           | $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$                      |
| k       | conductivité thermique                                             | $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$    |
| h       | coefficient de convection                                          | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$    |
| L       | Longueur                                                           | m                                                 |
| Q       | Chaleur                                                            | J                                                 |
| SCP     | capacité de refroidissement spécifique                             | $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$                     |
| t       | Temps                                                              | s                                                 |
| T       | Température                                                        | °C                                                |
| v       | Vitesse                                                            | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$                      |
| Cp      | capacité thermique massique                                        | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$   |
| 2iE     | Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement | -                                                 |
| LabEREE | Laboratoire Énergie Renouvelable et Efficacité Énergétique         | -                                                 |
| Indice  |                                                                    |                                                   |
| adm     | Admissible                                                         |                                                   |
| con     | Conduite                                                           |                                                   |
| e       | Entrée                                                             |                                                   |
| ext     | Extérieur                                                          |                                                   |
| int     | Intérieur                                                          |                                                   |
| iso     | Isolant                                                            |                                                   |
| th      | Thermique                                                          |                                                   |
| s       | Sortie                                                             |                                                   |

# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

## Lettres grecques

|         |                                     |                                |
|---------|-------------------------------------|--------------------------------|
| $\beta$ | coefficient de dilatation thermique | $K^{-1}$                       |
| $\rho$  | masse volumique                     | $kg \cdot m^{-3}$              |
| $\mu$   | viscosité dynamique                 | $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ |

## **I. INTRODUCTION**

---

### **I.1 Contexte et justification**

La recherche de l'équilibre entre le développement durable et la protection de l'environnement suscite de plus en plus un regard particulier sur la consommation de l'énergie électrique. En Afrique, plus précisément dans les pays membres de l'Union Économique et Monétaire Ouest-Africaine (UEMOA), la consommation énergétique résidentielle représente 62 % de la consommation totale de la société en 2019 et continue de croître [1]. 60 % de cette consommation est consacrée à la climatisation à Ouagadougou au Burkina Faso [2]. Cette production de froid est assurée essentiellement par des systèmes à compression de vapeur alimentés par l'énergie électrique. L'utilisation de l'énergie électrique, qui dépend essentiellement des sources fossiles [3], croît donc rapidement et pose plusieurs problèmes, parmi lesquels l'épuisement des sources et la pollution de l'environnement. L'énergie solaire, renouvelable et propre dans une certaine mesure, se présente donc comme une alternative aux sources fossiles. De plus elle a différentes utilisations, dont le solaire thermique [4], qui est utilisé dans les applications des systèmes de réfrigération par sorption [2]. Le refroidissement solaire par sorption est donc une solution envisageable pour réduire la consommation d'électricité dans les bâtiments, en substituant ou en associant les machines à compression, notamment dans les pays à fort potentiel solaire, en particulier en Afrique de l'Ouest, alors qu'il existe très peu d'installation de climatisation solaire photovoltaïque et pratiquement pas d'installation de climatisation solaire par sorption [2], [4].

En vue de tester cette faisabilité, l'Institut 2iE a entrepris la mise en place d'une installation de production de froid par adsorption solaire. Cette dernière vient en complément au système de climatisation conventionnel déjà en place dans l'un de ses amphithéâtres. Ce mémoire porte sur l'installation de ce système qui s'inscrit, d'une part dans le cadre de l'amélioration du confort thermique, de la réduction de la facture électrique du bâtiment, et d'autre part, permettra ultérieurement de réaliser une étude expérimentale des performances de l'association de deux technologies distinctes de production de froid mis en place en vue de définir les conditions d'émergence de cette association dans le contexte ouest-africain.

### **I.2 Objectifs de l'étude**

Ce stage vise à contribuer à l'évaluation expérimentale du concept de froid combiné adsorption/compression de vapeur dans le contexte ouest-africain à travers sa mise en place,

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

l'instrumentation et l'analyse des données expérimentales d'une telle installation. Il s'agit donc spécifiquement de réaliser les études préliminaires nécessaires à la mise en place de la machine à adsorption, de mener les travaux d'installation de la machine à adsorption ainsi que la mise en place de l'instrumentation, et enfin d'effectuer des tests de fonctionnement.

### I.3 Démarche et organisation du travail

Nous avons suivi une approche méthodique pour mener notre travail. Voici les différentes étapes que nous avons suivies :

- ✚ Recherche documentaire : Nous avons effectué une recherche approfondie dans la littérature existante pour nous informer sur l'état de l'art et nous familiariser avec les travaux similaires déjà réalisés.
- ✚ Étude préliminaire et installation du système : Nous avons commencé par nous imprégner du système conçu, en planifiant tous les aspects nécessaires. Ensuite, nous avons procédé à l'installation du système sur site conformément à la conception.
- ✚ Test de fonctionnement : Nous avons testé le fonctionnement du système mis en place dans un premier temps et nous avons analysé les données en fin.
- ✚ Présentation des résultats et discussion : Nous avons présenté les résultats obtenus à partir des données issues des tests. Nous avons engagé une discussion poussée sur ces résultats.

Cette démarche séquentielle nous a permis de mener notre travail à bien et à obtenir des résultats significatifs.

### I.4 Cadre d'accueil et de travail

Le Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) est l'un des trois laboratoires de recherche de l'Institut 2iE. Son objectif est de fournir des réponses coordonnées aux problèmes d'accès aux services énergétiques dans les pays en développement, notamment en Afrique subsaharienne, en intégrant diverses sources d'énergie. Il vise principalement le développement de solutions innovantes adaptées aux besoins énergétiques des pays africains, en mettant l'accent sur les énergies renouvelables, l'optimisation des systèmes de production d'énergie et la recherche de solutions optimales en matière d'intégration énergétique pour une valorisation efficace des ressources locales. Le LabEREE se concentre sur deux axes de recherche :

- ✚ Énergies renouvelables et Matériaux pour systèmes énergétiques (ERMaSE) ;

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

 Systèmes Multi-sources et Efficacité Énergétique (SMEE).

Les activités du LabEREE sont principalement menées dans le cadre de projets de recherche et de développement. À ce jour, le LabEREE est composé de trois professeurs associés, sept enseignants-chercheurs, trois enseignants, deux techniciens de laboratoire et d'un assistant de recherche. Il compte des partenaires scientifiques tels que le Cirad, l'UCL, etc., des partenaires industriels tels que TOTAL, SONABEL, etc., et des partenaires financiers tels que la DAAD et des ONG [5].



## II. REVUE DOCUMENTAIRE SUR LA PRODUCTION DE FROID PAR COMPRESSION DE VAPEUR/ADSORPTION SOLAIRE

### II.1 Principe de fonctionnement de l'adsorption solaire continue

Le principe de production de froid par adsorption repose sur l'utilisation d'un matériau absorbant, tel que le gel de silice, qui est capable d'adsorber (piéger) les molécules d'un fluide frigorigène, généralement de l'eau. Lorsque le matériau adsorbant est chauffé, il libère le fluide frigorigène adsorbé, qui se condense ensuite pour former un liquide. En refroidissant ce liquide, il s'évapore à nouveau, absorbant ainsi la chaleur de l'environnement et produisant ainsi du froid. Ce processus de chauffage et de refroidissement est continuellement répété pour maintenir la production de froid. L'un des avantages de ce système est qu'il peut être alimenté par des sources de chaleur basse qualité, comme l'énergie solaire par exemple.

De manière plus détaillée afin d'observer le fonctionnement interne mettant en valeur les composants de la machine à adsorption, le fonctionnement global d'un système de production de froid continu par adsorption implique différentes phases thermodynamiques subies par le couple de travail (adsorbat + adsorbant) pour la production de froid. Le système nécessite, à tout moment, une source chaude et une source froide pour ses différentes phases thermodynamiques qui sont le chauffage, la désorption, le refroidissement et l'adsorption du fluide de travail. Un champ de capteurs solaires thermiques joue le rôle de source chaude alors que le rôle de la source froide est joué par une tour de refroidissement.

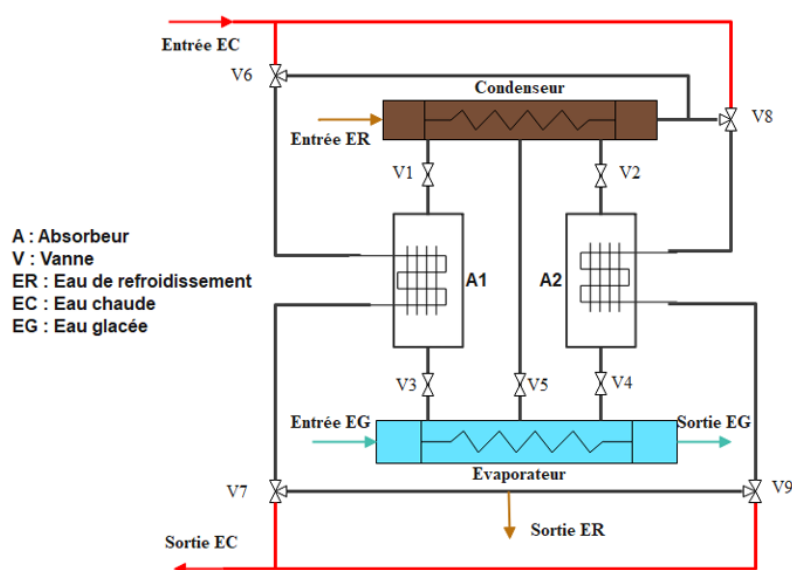


Figure 1 : Machine continue à adsorption [6].

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

Le système de refroidissement par adsorption (Figure 1) est composé de deux adsorbents (A1 et A2), d'un condenseur et d'un évaporateur. Des vannes à deux voies et trois voies sont utilisées pour contrôler les circuits de réfrigérant d'une part et pour commuter les circuits d'eau chaude et d'eau de refroidissement lors des phases d'adsorption et de désorption d'autre part. Le cycle d'adsorption continue se déroule en deux modes de fonctionnement alternatifs : le mode A1 adsorption/A2 désorption et le mode A1 désorption/A2 adsorption.

Dans le mode de refroidissement de A1 ou le mode A1 adsorption/A2 désorption, le processus commence par un pré-refroidissement de A1 et un préchauffage de A2. Cela implique la circulation de l'eau de refroidissement dans A1 (via V6 et V7) pour abaisser sa température et sa pression afin de la préparer à l'adsorption, tandis que l'eau chaude circule dans A2 (via V8 et V9) pour augmenter sa température et sa pression en vue de la désorption. Pendant cette phase, les vannes V1 à V4 sont fermées. Lorsque les températures et les pressions de A1 et A2 sont favorables aux réactions d'adsorption et de désorption respectivement, les vannes V2 et V3 s'ouvrent. La vapeur de réfrigérant se désorbe du gel de silice présent dans A2 et est entraînée vers le condenseur grâce à la différence de pression (via V2), où elle se condense tandis que la chaleur de condensation est absorbée par l'eau de refroidissement. Le réfrigérant liquide coule alors dans l'évaporateur en passant par V5. Pendant ce temps, A1 est refroidi et le gel de silice qu'il contient adsorbe la vapeur de réfrigérant de l'évaporateur, contribuant ainsi à l'évaporation du liquide réfrigérant dans l'évaporateur. Par conséquent, la chaleur est transférée de l'eau réfrigérée au réfrigérant, créant ainsi une production de froid.

Dans le mode de refroidissement de A2, le fonctionnement est similaire à celui décrit précédemment, à la différence que cette fois-ci A1 est en mode désorption et A2 est en mode adsorption. Les vannes changent de voies pour s'adapter à ce nouveau mode.

Une fois le refroidissement de A2 terminé, le cycle se termine et il recommence avec le refroidissement de A1, et ainsi de suite.

### **II.2 État de l'art sur la production de froid par adsorption**

Le cycle à sorption a été mis au point en 1777 faisant de lui le procédé de production de froid artificiel le plus ancien de l'histoire. En 1810, John Leslie construit alors la toute première machine à sorption fonctionnant à l'eau/ammoniac [7]. Il faut attendre 1859 pour voir la première machine à sorption continue fonctionnant à l'eau/ammoniac découvert par le chercheur Ferdinand CARRÉ dans sa conquête du froid [8]. Durant ces vingt dernières années,

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

de nombreuses études, aussi bien théoriques qu'expérimentales, ont été menées dans le domaine des refroidisseurs solaires par sorption. En effet, des chercheurs du monde entier sont engagés dans le domaine du froid par adsorption et travaillent à améliorer ce système de refroidissement en apportant des solutions aux problèmes qui y sont liés. La plupart des travaux de recherche de la dernière décennie sont orientés vers l'évaluation des propriétés physicochimiques des fluides de travail, le développement de modèles prédictifs de leur comportement et l'étude des différents types de cycles [9]. Peu d'études traitent de l'évaluation des performances des refroidisseurs à adsorption solaire et encore moins une association du système solaire de production de froid par sorption au système de compression de vapeur pour la climatisation d'un local. Un bref aperçu de certaines d'entre elles est présenté ci-dessous.

Wang et al. [10] ont travaillé à l'Université du Froid et de la Cryogénie en Chine sur l'étude expérimentale d'un refroidisseur à adsorption utilisant le gel de silice et l'eau comme fluide de travail. Leurs travaux sont principalement orientés vers la conception et la fabrication d'un nouveau système de production de froid par adsorption, alimenté par une source de chaleur de faible qualité. Ils ont conclu que le refroidisseur à adsorption était une machine frigorifique efficace, avec un COP de 0,38, lorsque les températures de l'eau chaude, de l'eau froide et du refroidissement étaient respectivement de 84,88, 11,78 et 30,68 °C.

Dans le même domaine, Pan et al. [11] ont également travaillé, en Chine, sur la conception et le test d'un refroidisseur à adsorption avec un absorbeur modulaire, utilisant le même fluide de travail. Ils affirment que ce refroidisseur à adsorption avec absorbeur modulaire est un système efficace pour une production industrielle à faible coût, avec un COP de 0,51.

Pan et al. [12] ont réalisé une autre étude à l'Institut du Froid et de la Cryogénie en Chine. Cette fois elle portait sur l'utilisation de la chaleur résiduelle à très basse température (60 °C) dans un refroidisseur à adsorption utilisant le gel de silice/eau. Le système de production de froid continu bi-étagé mis en place permet de refroidir un supercalculateur avec des températures d'eau chaude allant de 51,4 à 61,3 °C, donnant lieux à des COP allant de 0,285 à 0,477 et des capacités de refroidissement spécifiques (SCP) allant de 71,2 à 108,4 W·kg<sup>-1</sup>.

En utilisant également le gel de silice/eau comme fluide de travail, Elshehiti et al. [13] de la Faculté d'Ingénierie de l'Université d'Alexandrie en Égypte ont travaillé sur la conception, la fabrication et l'expérimentation en laboratoire d'un refroidisseur à adsorption à deux lits. Les résultats des tests ont montré que la SCP était d'environ 75 W·kg<sup>-1</sup> tandis que le COP était de 0,42 lorsque la température d'entrée de l'eau chaude variait de 75 à 80 °C.

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

Dans l'optique d'étudier les performances d'un refroidisseur à adsorption utilisant un autre fluide de travail en vue d'une comparaison avec le système au gel de silice/eau, Gong et al. [14] ont travaillé sur la conception et fabrication d'un système de production de froid utilisant du chlorure de lithium dans du gel de silice et de méthanol à l'Université du Froid et de la Cryogénie en Chine. Leurs travaux ont permis d'observer une amélioration des performances de ce nouveau model de 24,2 % par rapport au système utilisant uniquement du gel de silice/eau.

Dans le même ordre d'idée, Edin Hamrahi et al. [15] ont menés à l'Université de Yassoudj en Iran, une étude sur la conception et la réalisation d'un système solaire de production de froid à deux étages utilisant du charbon actif/méthanol comme fluide de travail. Les résultats de leurs travaux leurs ont permis de conclure que l'ajout de charbon nano-activé avec différentes fractions massiques augmente la capacité d'adsorption et améliore les performances du refroidisseur jusqu'à environ 33 %.

Les travaux de Zhai et al. [16] ont donné un COP quotidien moyen de 0,35, avec des températures internes variant entre 25 et 27 °C, lors d'un fonctionnement continu entre 9 h et 17 h de juin à août 2005. Leur objectif était de climatiser le bâtiment écologique de l'Institut de recherche en sciences de Shanghai en utilisant une machine à adsorption alimentée par l'énergie solaire, et d'étudier ses performances. À cette fin, un champ de 150 m<sup>2</sup> de capteurs solaires tubulaire sous vide de type U et deux machines à adsorption d'une puissance de 8,5 kW ont été installé avec un stockage thermique (réservoir d'eau chaude) de 2,5 m<sup>3</sup>. Ils ont également conclu que l'intensité du rayonnement solaire avait la plus grande influence sur les performances du système.

Ilie et al. [17] ont travaillé à la Faculté des sciences du bâtiment de l'Université technique de génie civil de Bucarest sur la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Leurs travaux portaient, entre autres, sur la substitution des systèmes de climatisation à détente directe par un système hybride de production de froid par absorption solaire pour la climatisation d'un immeuble de bureau, de 15 étages, d'une surface au sol de 6750 m<sup>2</sup> et occupé par 600 personnes travaillant 8 h par jour tout au long de l'année. Les résultats de leurs travaux ont permis d'observer une économie mensuelle d'énergie d'environ 61 % (5431,78 €·an<sup>-1</sup>) par rapport au système conventionnel de référence, avec un temps de retour sur investissement de 14 ans pour une durée de vie de 15 ans.

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

Les travaux menés au Centre de Cryogénie de l'Université de Hangzhou en Chine par Pan et al. [18] portaient sur la conception et l'étude expérimentale d'un refroidisseur à adsorption à petite échelle avec un système de récupération de chaleur et de masse pour l'utilisation de l'énergie solaire. Les résultats de leurs travaux leur ont permis de conclure que l'augmentation de la température d'entrée de l'eau de refroidissement a un effet négatif sur les performances du système, car on observe une baisse du COP et du SCP de 11,2 % et 28,9 % respectivement, lorsque la température d'entrée de l'eau de refroidissement passe de 26 à 32 °C. En revanche, l'augmentation de la température d'entrée de l'eau glacée a un effet positif sur les performances du système, avec des augmentations du COP et du SCP de 61,1 % et 114,1 % respectivement, lorsque la température d'entrée de l'eau glacée passe de 12 à 25 °C.

En somme il faut retenir que les travaux de recherche cités présentent des études expérimentales sur différents types de refroidisseurs à adsorption utilisant divers fluides de travail tels que le gel de silice et l'eau, le chlorure de lithium, le charbon actif/méthanol, et autres. Les chercheurs ont étudié la conception, la fabrication et les performances de ces systèmes de production de froid, avec une attention particulière portée sur le COP et le SCP.

Par exemple, concernant le type d'adsorbent, Pan et al. ont obtenu un COP de 0,51 pour leur système avec un absorbeur modulaire tandis que Elshehiti et al. ont obtenu un COP de 0,42 pour leur refroidisseur à adsorption à deux lits.

En termes de fluides de travail, Gong et al. ont expérimenté avec du chlorure de lithium dans du gel de silice et du méthanol, obtenant une amélioration des performances de 24,2 % par rapport au système utilisant uniquement du gel de silice et de l'eau.

Concernant les applications pratiques, certaines études se sont concentrées sur la climatisation de bâtiments en utilisant des systèmes de production de froid par adsorption alimentés par l'énergie solaire. Zhai et al. ont conçu un système avec un COP quotidien moyen de 0,35, tandis que Pan et al. ont étudié un refroidisseur à adsorption à petite échelle observant une diminution du COP et du SCP avec une augmentation de la température d'entrée de l'eau de refroidissement, mais une amélioration significative avec une augmentation de la température d'entrée de l'eau glacée.

Enfin, d'autres recherches se sont penchées sur la réduction de la consommation énergétique des bâtiments en remplaçant les systèmes de climatisation conventionnels par des systèmes hybrides de production de froid par absorption solaire, ce qui a permis de réaliser des économies d'énergie significatives.

### III. DESCRIPTION DU SYSTÈME MIS EN PLACE

Le système de production de froid par adsorption solaire conçu en vue d'une association avec le système de production de froid par compression de vapeur est constitué de plusieurs organes, les uns plus importants que les autres. Ces organes sont entre autres la machine à adsorption, le champ de capteurs solaires, la tour de refroidissement, les réservoirs, les évaporateurs, le séparateur de circuit et la machine à compression de vapeur (Figure 2).

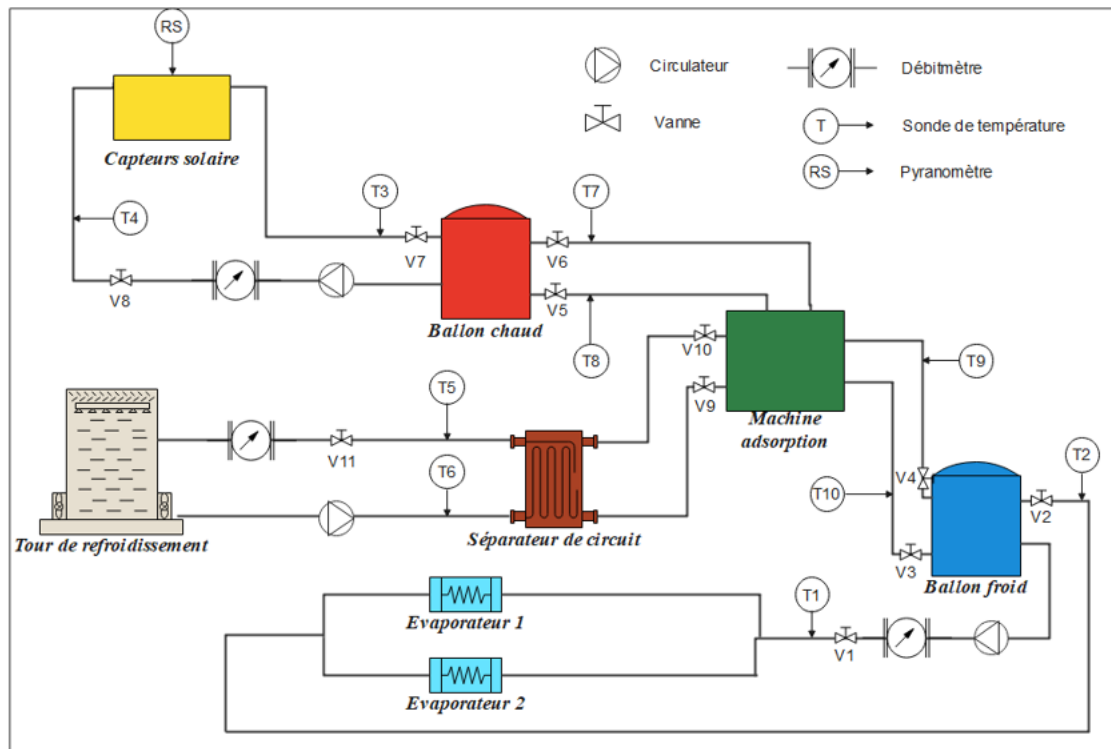


Figure 2 : Schéma du système à adsorption comprenant toute l'instrumentation.

#### III.1 Machine à adsorption

Une machine à adsorption est un dispositif utilisé pour produire du froid ou de la chaleur en exploitant les principes thermodynamiques de l'adsorption. Son fonctionnement repose sur le phénomène d'adsorption, qui est la capacité d'un matériau à retenir des fluides à sa surface. Dans le cas de la production de froid, un gaz réfrigérant (appelé adsorbat) est capturé par le matériau adsorbant (appelé adsorbant) à basse pression et basse température. Lorsque la température augmente, l'adsorbat est libéré de l'adsorbant, créant ainsi un effet de refroidissement. La machine à adsorption utilisée dans notre système pour la production de froid, de modèle eCoo 10 (Figure 3) fabriqué par Fahrenheit (Annexe A), offre une capacité de refroidissement de 16,7 kW avec un  $COP_{th}$  de 0,65.



Figure 3 : Machine à adsorption. [Source : Fahrenheit].

### III.2 Champ de capteurs solaires thermiques

Un champ de capteurs solaires thermiques forme un système qui capte et enferme l'énergie solaire thermique. Ces dispositifs sont positionnés de manière à recevoir une exposition maximale au soleil. Ils sont reliés à des conduites pour transférer l'énergie thermique captée vers un point d'utilisation ou un réservoir de stockage. Dans notre configuration, nous utilisons un ensemble de 9 capteurs à tubes sous vide OEM Varior 3000-30 hp, couvrant une surface totale de 44,64 m<sup>2</sup> (Figure 4). Les spécifications techniques détaillées de ces capteurs sont disponibles en Annexe A.



Figure 4 : Champ de capteurs solaires sous-vide.

### III.3 Tour de refroidissement

Une tour de refroidissement est un dispositif essentiel pour dissiper la chaleur d'un process. Il existe deux technologies de tours de refroidissement notamment les tours ouvertes et les tours fermées. La principale différence entre les deux technologies réside dans la manière dont le fluide de refroidissement (généralement de l'eau) est exposé à l'environnement ambiant

À la différence des tours ouvertes où l'eau de refroidissement est isolée de l'environnement ambiant par un échangeur de chaleur, pour une tour ouverte, cette eau est directement exposée à l'air ambiant car elle est pulvérisée sur une surface d'échange en contact avec l'air atmosphérique. L'évaporation partielle de cette eau en contact de la surface d'échange baisse sa température. Les tours ouvertes ont une grande puissance thermique comparé aux tours fermées car en plus de l'énergie sensible mise en jeu dans les tours fermées, elles mettent en jeu l'énergie latente qui est largement supérieur à l'énergie sensible pour une même masse.

La tour de refroidissement utilisée est de type ouvert de référence RAX 064/600 (Figure 5). L'Annexe A contient ses détails techniques.



**Figure 5 : Tour de refroidissement**



### III.4 Réservoirs

- ✚ Le réservoir d'eau chaude (Figure 6.a), fabriqué en acier noir, présente une excellente résistance à la corrosion, ce qui garantit sa durabilité. Il est spécialement conçu pour minimiser les pertes de chaleur grâce à son isolation thermique en molleton de polyester (épaisseur de 11 cm), assurant ainsi le maintien de l'eau chaude à une température constante. Avec ses 14 entrées et sorties, il permet une grande flexibilité d'utilisation, notamment pour le remplissage et la vidange de l'eau, la connexion à d'autres systèmes et l'intégration d'instruments de mesure. Il joue un premier rôle de tampon qui consiste à stabiliser la température de l'eau chaude à l'entrée de la machine pour empêcher que les variations d'ensoleillement n'affectent directement le fonctionnement de la machine. Son second rôle est celui de stockage. En effet grâce à sa capacité de  $5 \text{ m}^3$ , ce réservoir permet à la machine de fonctionner pendant les périodes de faible ensoleillement ou la nuit par exemple.
- ✚ Le réservoir d'eau glacée (Figure 6.b) a une capacité de  $0,5 \text{ m}^3$  et est, lui aussi, fabriqué en acier noir, ce qui lui confère une grande résistance à la corrosion. Il est également équipé d'une isolation thermique en armaflex HT (épaisseur de 2 cm) pour prévenir les pertes de froid et maintenir la température de l'eau glacée. Ce réservoir est doté de 8 orifices qui permettent le remplissage et la vidange de l'eau, la connexion à d'autres systèmes ainsi que l'intégration d'instruments de mesure.



Figure 6 : (a) Réservoir d'eau chaude ; (b) Réservoir d'eau glacée.

### III.5 Évaporateurs

L'évaporateur est un échangeur de chaleur qui joue un rôle crucial dans les systèmes de production de froid en permettant le transfert de chaleur entre le fluide réfrigérant à basse température et un autre fluide, ce qui entraîne un effet de refroidissement. Il existe différentes conceptions d'évaporateurs, et celui utilisé dans cette installation est de type « ailettes » (Figure 7). Ce type d'évaporateur se caractérise par de nombreuses ailettes minces et plates fixées à des tubes ou à des plaques, ce qui augmente considérablement la surface d'échange thermique. Les ailettes sont agencées de manière à favoriser un écoulement turbulent des fluides, améliorant ainsi l'efficacité du transfert de chaleur. Dans cette installation, l'unité intérieure des systèmes à compression de vapeur (split) est utilisée comme évaporateur.



Figure 7 : Évaporateur Sharp de 3 ch.

### III.6 Séparateur de circuit

Le séparateur de circuit est un échangeur de chaleur qui est utilisé pour fragmenter un circuit en 2 sous-circuits véhiculant 2 fluides distincts. Nous utilisons un échangeur à plaque ST-10 (Figure 8) de 7,66 m<sup>2</sup> de surface d'échange, isolé grâce à l'armaflex (épaisseur de 2 cm) et connecté en contrecourant entre la machine à adsorption et la tour de refroidissement. Il empêche donc le fluide provenant de la tour de refroidissement ouverte, fluide qui peut contenir des impuretés, de passer dans la machine à adsorption limitant ainsi le risque d'obstruction et de corrosion de ladite machine. L'Annexe A présente plus de détails sur les spécifications de cet échangeur à plaque.

# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU



**Figure 8 : Séparateur de circuit ST-10.**

## III.7 Instrumentation

L'instrumentation d'un système implique la disposition stratégique des instruments de mesure pour surveiller, contrôler et recueillir des données sur les paramètres physiques essentiels. Dans le cadre de notre système, l'instrumentation vise à mesurer les températures, les débits et l'irradiance solaire (Tableau 1) à des positions stratégiques du système (Figure 2). Ces données précieuses sont ensuite utilisées pour analyser les performances du système.

**Tableau 1 : Grandeurs mesurées et instruments de mesure.**

| Grandeur physique                                                                                   | Repère | Unité                           | Références                                           | Principales caractéristiques                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Température aux entrées et sorties des réservoirs, machines à adsorption et tour de refroidissement | T1-T10 | °C                              | Sonde à résistance platine Pt100 de 4 fils TC Direct | -Plage : -50 à +250 °C<br>-Incertitude : 0,05 %<br>-Auto chauffage : 0,5 °C/mW                            |
| Débit des circuits d'eau chaude, d'eau glacée et d'eau de refroidissement                           | Q1-Q3  | m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> | Débitmètre Khrono H250/M40                           | -Plage : 0 à 4 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup><br>-Incertitude : 2,5 %<br>-Fonctionnement : -196 à 300 °C |
| Irradiance solaire                                                                                  | RS     | W·m <sup>-2</sup>               | Pyranomètre silicium Apogée CS301                    | -Incertitude : 5 %<br>-Fonctionnement : -40 à 70 °C<br>-Temps de reponse : <1ms                           |
| Centrale d'acquisition de données                                                                   | -      | -                               | Agilent 34972                                        | -Précision : 0,004 %<br>-Nombre de voies :120                                                             |

### III.7.1 Mesure de température

Dans les process industriels instrumentés, la mesure et le contrôle de température se fait par le biais des thermocouples et/ou des sondes à résistance de platine selon le domaine d'application. Nous suivons alors la démarche qui suit en vue de choisir le capteur de température le plus adapté pour notre besoin.

- ✚ Sonde à résistance de Platine (Pt) VS thermocouple : les Pt offrent une mesure précise et stable pour des températures  $< 600^{\circ}\text{C}$  tandis que les thermocouples mesurent une large gamme ( $-200$  à  $2000^{\circ}\text{C}$ ) mais avec une précision réduite. La plage de température de l'eau étant  $< 100^{\circ}\text{C}$ , nous choisissons donc les Pt pour l'instrumentation du système.
- ✚ Pt1000 VS Pt100 : le Pt1000 a une résistance de 1000 ohms à  $0^{\circ}\text{C}$ , il détecte les variations de température plus petites avec précision tandis que le Pt100 a une résistance de 100 ohms à  $0^{\circ}\text{C}$ , et offrent une faible résolution. Pour notre application, un chiffre après la virgule est suffisant alors on choisit le Pt100.
- ✚ Pt100 4 fils VS Pt100 2 fils : les Pt100 4 fils sont plus précis car l'alimentation électrique et la mesure de la résistance de la sonde se font avec des fils distincts ce qui permet d'éliminer la résistance des fils qui perturbent les mesures dans le cas des Pt100 2 fils. Nous choisissons alors des Pt100 4 fils pour notre application.

En fin la température est surveillée à différents points clés du système à l'aide de thermomètres à résistance de platine Pt100 (Figure 9) positionnés le long du flux du fluide. Ces thermomètres utilisent le principe de variation de résistance électrique en fonction de la température. Lorsque la chaleur est détectée, le capteur Pt100 convertit cette information en une valeur de résistance correspondante, qui est ensuite convertie en une lecture de température.



**Figure 9 : Résistance de platine Pt100.**

### III.7.2 Mesure de débit

La mesure du débit se fait à l'aide d'un débitmètre. Étudions les 3 technologies de débitmètres volumiques les plus couramment utilisés en vue d'opérer un choix :

- ✚ Débitmètre à flotteur : un flotteur se déplace en fonction du débit et permet de mesurer visuellement et électroniquement la valeur du débit. Il est précis, simple d'utilisation et limité pour des applications à faible débit.
- ✚ Débitmètre à ultrason : il émet des signaux ultrasonores et mesure le temps mis par les signaux pour se déplacer dans le sens du fluide et dans le sens contraire. La différence de temps est utilisée pour mesurer le débit. Il est précis, non intrusif et mesure une large gamme de débit. De façon standard, il n'offre pas de mesure directe toutefois une association avec certains composants permet d'avoir une valeur numérique du débit.
- ✚ Débitmètre à vortex : détecte la fréquence des tourbillons que crée un fluide en passant autour d'un obstacle pour mesurer le débit. Il est précis, robuste et adapté aux fluides propres et légèrement sals. Il n'offre pas de mesure directe.

La plage de débit d'eau dans les circuits hydrauliques étant inférieure à  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , pour des raisons de cout, de facilité de contrôle de fonctionnement (mesure visuelle directe) et de maintenance, nous choisissons les débitmètres à flotteurs.

La mesure du débit volumique dans les conduites est donc réalisée à l'aide des débitmètres à flotteurs Khrono H250 M40 installés dans chaque circuit du système (Figure 10). Il est un dispositif spécialement conçu pour évaluer la quantité de fluide qui traverse une conduite. Le débitmètre est installé sur la conduite et est un débitmètre à flotteur. Son principe de fonctionnement repose sur la force d'écoulement exercée par le fluide sur un flotteur à l'intérieur d'un tube de mesure pour déterminer avec précision le débit du fluide.

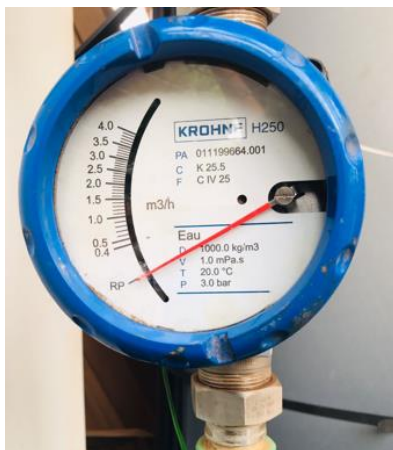


Figure 10 : Débitmètre Khrono H250 M40.



### III.7.3 Mesure d'irradiance solaire

La mesure de l'intensité du rayonnement solaire incident sur une surface donnée, également appelée irradiance solaire, permet d'évaluer la puissance solaire reçue par unité de surface. Pour obtenir cette quantification, un dispositif de mesure tel qu'un pyranomètre est utilisé. Dans notre système, nous utilisons spécifiquement un pyranomètre au silicium de marque Apogée CS301 (Figure 11). Ce type de pyranomètre fonctionne en convertissant l'énergie lumineuse en un signal électrique proportionnel à l'intensité du rayonnement solaire reçu. Ainsi, il nous permet de mesurer avec précision l'irradiance solaire captée par nos capteurs solaires.



Figure 11 : Pyranomètre Apogée CS301.

### III.7.4 Centrale d'acquisition de données

Dans le but de recueillir et d'enregistrer les informations provenant des divers instruments de mesure, une centrale d'acquisition de données disponible à l'Institut 2iE est utilisée. Il s'agit de la centrale d'acquisition Agilent 34972A (Figure 12). Cette centrale est équipée d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) qui transforme les signaux analogiques en données numériques exploitables par l'ordinateur. Ainsi, les informations recueillies peuvent être traitées et analysées par la suite.



Figure 12 : Centrale d'acquisition de données Agilent 34972A.

## **IV. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE PRÉLIMINAIRE**

---

Dans cette section du document, nous allons décrire l'ensemble des procédures adoptées pour obtenir les résultats escomptés. Nous présenterons les formules utilisées et les protocoles appliqués.

### **IV.1 Étude préliminaire de l'installation**

Une étude préliminaire marque la phase initiale de recherche effectuée avant le début d'un projet. Son but est de donner une vision globale du projet, de saisir les défis éventuels et d'explorer différentes technologies, méthodes de conception ou approches de réalisation. C'est une étape essentielle qui assure la disponibilité de tous les équipements nécessaires pour la mise en œuvre du projet. Dans le cadre de cette étude, il est requis de déterminer l'architecture du système qui consiste à définir l'ensemble des éléments constitutifs du système tels que la machine à adsorption, les réservoirs, le champ solaire, les circulateurs, la tour de refroidissement, ainsi que les autres composants associés. Antérieurement à notre travail, une partie de cette étude a déjà été effectuée et un ensemble d'équipements a été commandé et livré. Parmi eux se trouvent la machine à adsorption, le réservoir d'eau chaude, le réservoir d'eau glacée, la tour de refroidissement, les capteurs solaires sous vide, un circulateur pour le circuit d'eau chaude et divers éléments connexes. Des extraits des spécifications techniques de certains de ces composants sont présentés en Annexe A.

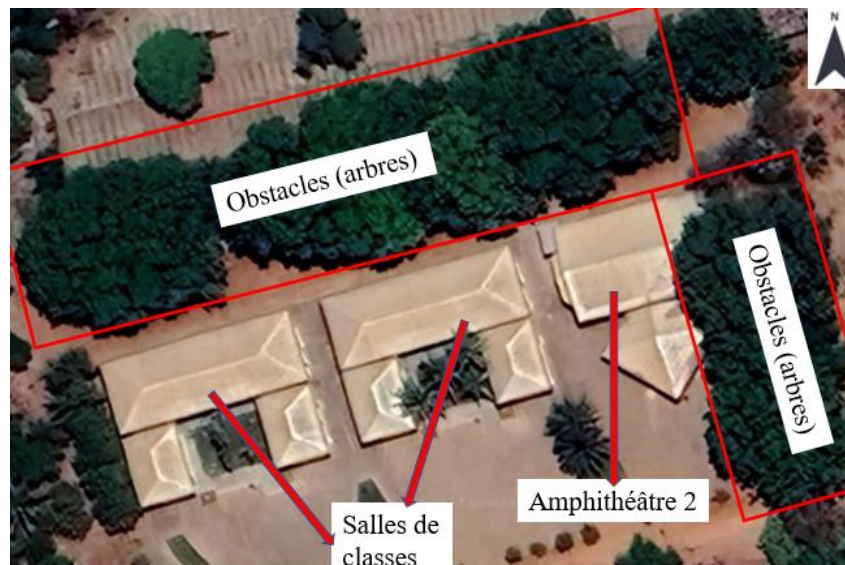
L'étude préliminaire réalisée lors de ce mémoire consiste principalement à réaliser le plan de l'installation, à définir la configuration du champ solaire, à renforcer la structure du toit, et à identifier et dimensionner les équipements qui n'ont pas été livrés lors de l'acquisition de la machine. Parmi ces équipements, on retrouve notamment les circulateurs du circuit d'eau glacée et du circuit de refroidissement, les câbles d'alimentation des éléments électriques, ainsi que l'isolation nécessaire pour les circuits d'eau chaude et d'eau glacée. L'objectif est de garantir la disponibilité de tous les composants requis et leur adaptabilité aux besoins de l'installation, afin d'assurer un bon fonctionnement et une performance optimale.

#### **IV.1.1 Configuration du champ solaire et charge à supporter par la toiture**

La détermination de la configuration optimale du champ solaire implique plusieurs étapes. Tout d'abord, il faut définir l'orientation et l'inclinaison des capteurs solaires, ensuite calculer l'espacement entre les rangées de capteurs solaires afin d'éviter tout ombrage mutuel entre les capteurs des rangées adjacentes et enfin vérifier que le champ n'est pas ombragé par

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

d'éventuelles obstacles périphériques. Cet espacement doit également permettre une circulation aisée lors des opérations de maintenance. Dans notre cas, la toiture de l'amphithéâtre présente une inclinaison de  $14^\circ$  (Annexe B), ce qui nous permet d'installer les capteurs dans le plan de la toiture et d'éviter les effets d'ombrage mutuel des capteurs. Ainsi, le seul facteur à considérer pour l'espacement des rangées est la circulation nécessaire pour les opérations de maintenance. Nous utiliserons donc la largeur moyenne d'une personne pour définir l'espacement approprié [19].



**Figure 13 : Vue de dessus du site présentant les obstacles.**

En ce qui concerne l'ombrage causé par les obstacles périphériques (Figure 13), nous avons réalisé une simulation sur le logiciel PVSyst à l'aide d'une modélisation 3D de l'amphithéâtre. Grâce à des simulations, nous pourrions alors déterminer la position optimale du champ de capteurs qui offre la plus faible perte d'irradiation dues aux effets d'ombrage.

Une fois la structure et la position du champ solaire définies, on calcule la charge supplémentaire que les capteurs et accessoires vont apporter sur la toiture de l'amphithéâtre et par la suite faire des calculs de taux de charges de la structure de la charpente afin de s'assurer de la capacité du toit à supporter les capteurs. Cette opération consiste à recenser l'ensemble des équipements qui seront installés sur la toiture de l'amphithéâtre et à estimer leurs poids grâce aux spécifications techniques ou à la facture de livraison.

### **IV.1.2 Circulateurs**

Un circulateur est une pompe utilisée dans un circuit fermé, c'est-à-dire un circuit sans hauteur géométrique. Dans ce type de fonctionnement, le dimensionnement consiste à



## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

sélectionner une pompe capable de véhiculer un volume de liquide donné tout en surmontant les pertes de charge totales (pertes linéaires et singulières) du réseau de tuyauterie. Pour un réseau de tuyauterie transportant en charge de l'eau, la vitesse maximale de l'eau est limitée à de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [20]. Les pertes de charge linéaire sont calculées à l'aide de la formule de Darcy-Weisbach (équation 2) qui est une équation empirique s'appliquant à l'écoulement des fluides en régime laminaire et turbulent.

$$\text{HMT}_{\text{pompe}} = \Delta P_l + \Delta P_s \quad (1)$$

$$\Delta P_l = f \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{L}{D} \quad (2)$$

$$\Delta P_s = \sum k_i \cdot \frac{V_i^2}{2g} \quad (3)$$

Dans ces équations :

- $D$  (m) est le diamètre intérieur de la conduite ;
- $k_i$  est le coefficient de perte de charge singulière [21] ;
- $V$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) est la vitesse du fluide ;
- $L$  (m) est la longueur de la conduite ;
- $g$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) est l'intensité de la pesanteur.
- $f$  est le coefficient de frottement de Darcy et dépend du régime d'écoulement du fluide. Pour un régime turbulent, il se calcule en résolvant itérativement l'équation de Colebrook-White (équation 4) tandis que pour un écoulement laminaire son expression est donnée par la loi de Poiseuille (équation 5).

$$f = \left[ -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right) \right]^{-2} \text{ avec } (\text{Re} > 2000) \quad (4)$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \text{ avec } (\text{Re} < 2000) \quad (5)$$

- $\text{Re}$  : nombre de Reynolds (équation 6) et
- $\varepsilon$  : rugosité absolue de la conduite. Les valeurs utilisées dans ce mémoire sont obtenues à partir de la référence [22].

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (6)$$

Où

- $\mu$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) est la viscosité dynamique du fluide ;

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

- $\rho$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) est la masse volumique du fluide.

### IV.1.3 Section des câbles et calibre des dispositifs de protection

Plusieurs composants du système de production de froid par adsorption nécessitent une alimentation en énergie électrique. Dans notre cas, cette énergie est prélevée depuis le coffret d'alimentation de l'amphithéâtre. Nous devons alors déterminer la section des câbles d'alimentation pour chacun de ces composants, ainsi que la section du câble principal permettant d'installer un mini-coffret pour le système. De plus, il est essentiel de déterminer le calibre du dispositif de protection pour chaque élément.

Pour transporter l'énergie électrique depuis le coffret d'alimentation de l'amphithéâtre jusqu'aux points de consommation, nous utilisons des câbles conducteurs d'électricité. Le choix de la section adéquate des conducteurs est crucial car il permet non seulement de transporter la puissance maximale en toute sécurité, sans risque d'incendie, mais aussi de limiter la chute de tension en ligne, conformément à l'amendement A5 de la norme NFC 15-100. Le calcul du courant admissible du conducteur suit l'équation (7).

La protection des circuits électriques et des équipements contre les surintensités et les surcharges est assurée par des disjoncteurs magnétothermiques. Le calibre du dispositif de protection, exprimé en ampères, définit l'intensité de déclenchement (ouverture du circuit) du disjoncteur. Le choix du disjoncteur consiste à sélectionner, à partir du catalogue des disjoncteurs, un disjoncteur dont le calibre normalisé est immédiatement supérieur au courant de service du circuit considéré.

$$I_{\text{adm}} = \frac{I}{\prod f_i} \quad (7)$$

Avec :

- $I_{\text{adm}}$  (A) le courant admissible dans la conduite ;
- $I$  (A) le courant de service du circuit et
- $f_i$  les coefficients de corrections.

Le choix de la section s'opère donc en faisant correspondre, pour la nature de l'âme conductrice et du mode de pose souhaitée, la valeur de courant admissible à celle de section de câble (Annexe C).

#### IV.1.4 Épaisseur d'isolation

L'isolation ou le calorifugeage des conduites consiste à envelopper la conduite avec un matériau naturel ou synthétique ayant un faible coefficient de transfert thermique. Cette action permet, d'une part de limiter les échanges d'énergies et d'optimiser les performances du réseau, et d'autre part d'éviter la condensation naturelle à la surface des conduites froides.

Le calcul de l'épaisseur de l'isolant se base sur les principes des transferts thermiques (équation 8 et 9). Elle est obtenue grâce à la courbe de réduction des échanges thermiques en fonction de l'épaisseur (équation 10). En effet cette épaisseur correspond à la valeur qui, en plus de la question de disponibilité locale et du cout, occasionne la plus grande réduction des échanges thermiques.

$$\varphi_{si} = \frac{T_a - T_f}{\frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi L \times k_{con}} + \frac{1}{2\pi L \times R_2 \times h_{ext}} + \frac{1}{2\pi L \times R_1 \times h_{int}}} \quad (8)$$

$$\varphi_{ai} = \frac{T_a - T_f}{\frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi L \times k_{con}} + \frac{\ln\left(\frac{R_2 + e}{R_2}\right)}{2\pi L \times k_{iso}} + \frac{1}{2\pi L \times (R_2 + e) \times h_{ext}} + \frac{1}{2\pi L \times R_1 \times h_{int}}} \quad (9)$$

$$R = \frac{\varphi_{si} - \varphi_{ai}}{\varphi_{si}} \cdot 100 \quad (10)$$

Avec :

- $\varphi_{si}$  (W) le flux échangé sans isolation ;
- $\varphi_{ai}$  (W) le flux échangé avec isolation ;
- $T_a$  (°C) la température ambiante ;
- $T_f$  (°C) la température du fluide ;
- $R_1$  (m) le rayon intérieur de la conduite ;
- $R_2$  (m) le rayon extérieur de la conduite ;
- $e$  (m) l'épaisseur d'isolation ;
- $L$  (m) la longueur de la conduite ;
- $h_{int}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) le coefficient de convection intérieure (Annexe E) ;
- $h_{ext}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) le coefficient de convection extérieure (Annexe F) ;
- $k_{con}$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) la conductivité de la conduite ;
- $k_{iso}$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) la conductivité de l'isolant.

## IV.2 Installation du système

Les travaux d'installation suivent un planning d'exécution qui est la description des différentes des tâches à réaliser et de l'affectation de chaque tâche à une entité responsable. Les principales tâches à accomplir pour l'installation complète du système comprennent le renforcement de la structure du toit, la création et la fixation d'une allée sur la toiture, le positionnement des équipements à leurs emplacements respectifs, l'installation des conduites et des câbles d'alimentation, l'instrumentation et enfin le montage des capteurs solaires.

Pour nous assister dans la réalisation de ces travaux, nous avons fait appel à l'entreprise Plomberie et Spécialiste Irrigation (PSI). Nous avons conduit et contrôlé l'exécution des travaux dès le lancement du chantier le vendredi 12 mai 2023 jusqu'à la toute fin le samedi 17 juin 2023. La répartition des tâches en fonction des entités responsables est présentée dans le Tableau 2.

**Tableau 2 : Affectation des tâches aux entités de réalisation.**

| Entité de réalisation | Tâches                                                   |
|-----------------------|----------------------------------------------------------|
| PSI                   | Fixation des évaporateurs                                |
|                       | Pose des canalisations                                   |
|                       | Pose des câbles d'alimentation                           |
|                       | Renforcement de la toiture                               |
|                       | Fabrication et fixation de l'Allée sur toiture           |
|                       | Fabrication et pose des plaques de fixation des capteurs |
| Équipe de 2iE         | Disposition des équipements                              |
|                       | Instrumentation du système                               |
|                       | Suivi et contrôle des travaux de PSI                     |

- ✚ La disposition des équipements à leurs places respectifs s'est faite en 4 jours grâce à un charriot, 2 échelles et 6 personnes. La tour de refroidissement, le réservoir d'eau chaude, les pompes des circuits d'eau chaude et d'eau de refroidissement sont disposés dans un hangar aménagé à l'extrême nord-ouest de l'amphithéâtre. La machine à adsorption, le réservoir d'eau glacée, le séparateur de circuit, la centrale d'acquisition, la pompe du circuit d'eau glacée et les évaporateurs sont disposés à l'intérieur de l'amphithéâtre. En fin, le champ de capteur solaire est installé sur le pan sud de la toiture de l'amphithéâtre.
- ✚ La fixation des évaporateurs s'est déroulée en 1 jour grâce à une échelle et 2 frigoristes. Ils sont fixés au centre des faces nord et sud de l'amphithéâtre à 2,1 m du sol.

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

- ✚ La pose des câbles d'alimentation s'est faite en 1 jour grâce à 2 échelles, une perceuse et 2 électriciens. Il consiste à la mise en place d'un coffret électrique et réaliser une connexion électrique entre les différents équipements électriques et leurs disjoncteurs d'alimentation (dans le coffret).
- ✚ Le renforcement de la toiture, la pose des plaques de fixation et de l'allée de circulation s'est faite en 6 jours grâce à 2 échelles, un échafaudage, 2 maçons et 4 soudeurs.
- ✚ La pose des canalisations s'est faite en 13 jours grâce à 2 échelles, un échafaudage et 3 plombiers. Elle consiste à réaliser les connexions hydrauliques conformément à schéma hydraulique du système.
- ✚ L'instrumentation du système s'est faite en 2 jours grâce à une clé à molète, 2 tournevis et une personne. Elle consiste à mettre en place l'ensemble des capteurs d'instrumentation à leurs emplacements précis, les relier à la centrale d'acquisition et en fin configurer la centrale.

### IV.3 Tests de fonctionnement

Dans cette section, nous présentons comment le premier test de fonctionnement du système a été effectué. En effet, le système est mis en marche en séquence comme suit :

- ✚ Ouverture de l'ensemble des vannes du système ;
- ✚ Mise en marche le circuit d'eau chaude : il s'agit ici de mettre sous tension la pompe du circuit liant le réservoir d'eau chaude aux capteurs solaires afin d'emmagasinier la chaleur nécessaire au fonctionnement de la machine ;
- ✚ Mise en marche du circuit de refroidissement : cette étape consiste à mettre sous tension la tour de refroidissement et son circulateur ;
- ✚ Mise en marche de la machine à adsorption : lorsque la température du réservoir d'eau chaude excède la température minimale de démarrage de la machine à adsorption, la machine est mise sous tension et les étapes de configuration du contrôleur suivis rigoureusement.
- ✚ Mise en marche du circuit d'eau glacée : cette étape consiste à mettre sous tension les évaporateurs et la pompe dudit circuit pour la climatisation de l'amphithéâtre.

Les paramètres de débits, températures et le rayonnement solaire sont mesurés à l'aide des instruments de mesure dédié comme décrit dans la [Section III](#). Initialement, chaque capteur est associé à une entrée du data logger et calibré à l'aide de son interface. Il convient de noter que les capteurs de température sont connectés aux entrées tension du data logger, tandis que les débitmètres et le solarimètre sont connectés aux entrées d'intensité du data logger.

## V. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### V.1 Résultats et discussions de l'étude préliminaire

#### V.1.1 Configuration du champ solaire

Le Burkina Faso, situé dans l'hémisphère Nord de l'Afrique subsaharienne, bénéficie d'un fort potentiel solaire avec une irradiation solaire moyenne d'environ  $5,9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jr}^{-1}$ . Par conséquent, le champ de capteurs solaires est installé dans la direction sud afin de maximiser l'exposition au soleil. Pour déterminer l'inclinaison optimale des capteurs, nous prenons en compte plusieurs facteurs tels que la situation géographique, la facilitation au ruissèlement des eaux de pluie, la réduction de l'accumulation de poussière et l'ensoleillement reçu. En utilisant le logiciel RETScreen, nous obtenons pour la ville de Ouagadougou une inclinaison fixe de  $11$  à  $15^\circ$  pour une irradiation solaire annuelle maximale de  $2199 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jr}^{-1}$ . On montre que l'irradiation solaire recueillie ne varie d'ailleurs pas significativement par rapport à ce maximum ( $<1\%$ ) pour une inclinaison entre  $5$  et  $25^\circ$  [23]. La Figure 14 illustre donc la configuration des capteurs et leur emplacement sur la toiture. Nous arrêtons un espacement de  $0,5 \text{ m}$  entre les rangées afin de permettre à un homme moyen, large de  $0,45 \text{ m}$  [19], de circuler.

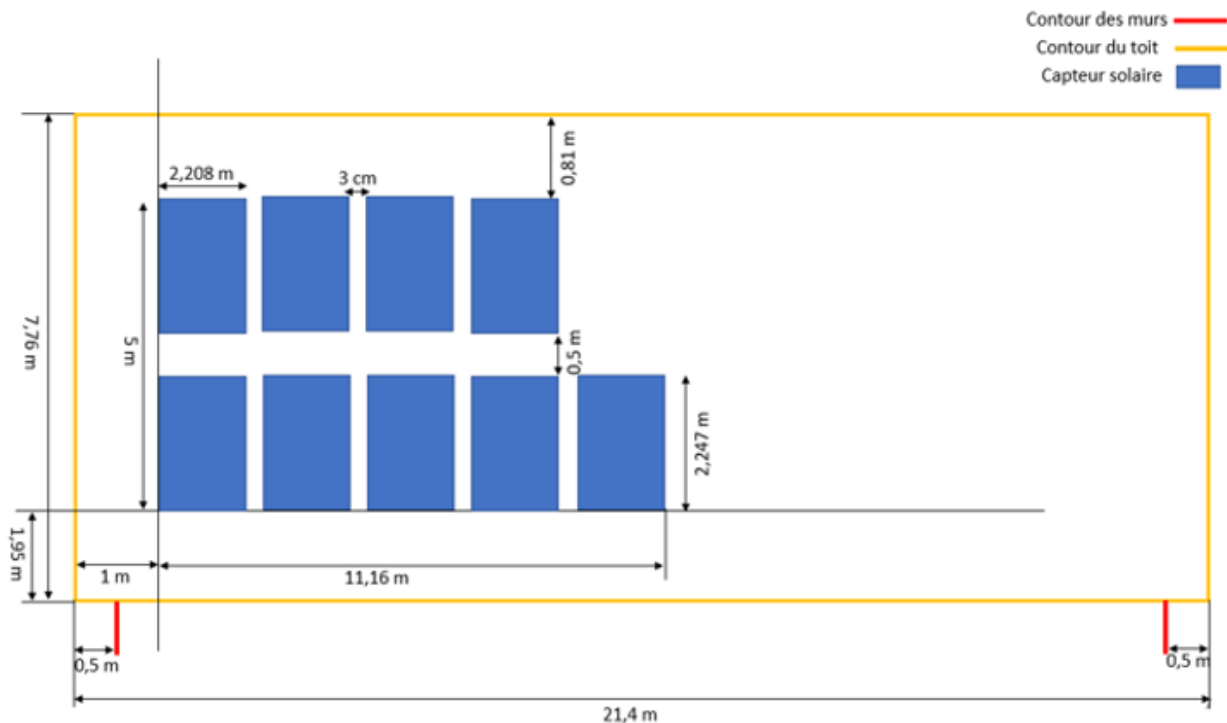
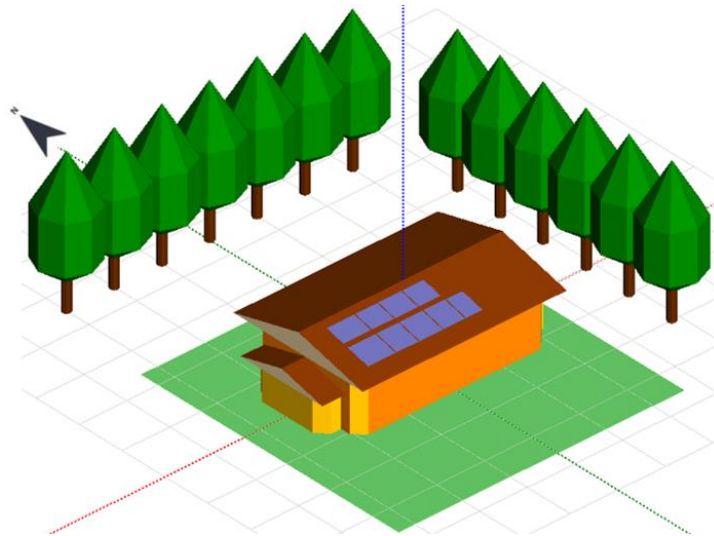


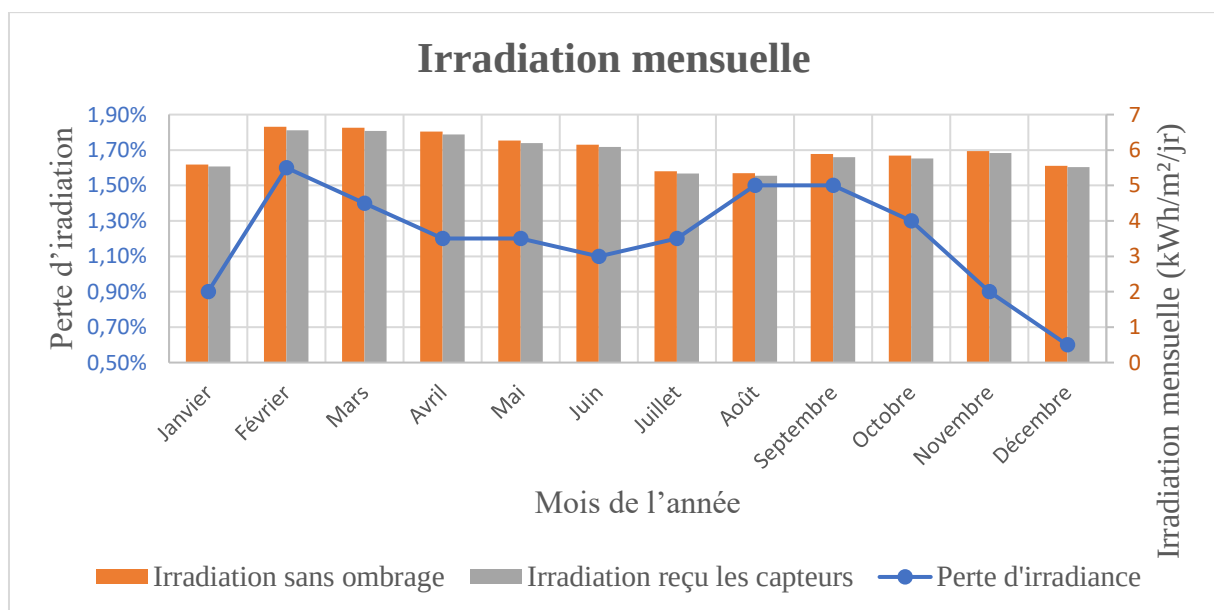
Figure 14 : Configuration et emplacement du champ solaire.

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU



**Figure 15 : Modèle 3D de l'amphithéâtre et des obstacles environnants.**

En utilisant un modèle 3D de l'amphithéâtre, tel qu'illustré à la Figure 15, nous effectuons une simulation des scènes d'ombrage proche à l'aide du logiciel PVSyst. Cette simulation nous permet d'observer (Figure 16) une perte d'irradiation moyenne annuelle de 1,2 %, avec des valeurs minimales en décembre (0,6 %) et maximales en février (1,6 %), en raison des ombres projetées par les obstacles environnants. Toutefois, ces pertes restent globalement négligeables et en plus les plus grandes pertes correspondent à des périodes de faible demande (février, août et septembre). Les histogrammes de l'irradiation sans ombrage et celle reçue réellement par les capteurs sont presque équivalents, ce qui indique que la configuration et la position du champ solaire thermique sont acceptables.



**Figure 16 : Pertes d'irradiation mensuelles du système.**

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

En vue de renforcer la structure du toit de l'amphithéâtre, nous avons calculé le poids (Tableau 3) des différents équipements qui y seront installés. Ces équipements sont entre autres les capteurs solaires, les supports de fixation des capteurs, un ballon tampon de 5 l, une vase d'expansion de 25 l, le fluide caloporteur et les tuyauteries.

**Tableau 3 : Charge de l'installation sur la toiture de l'amphithéâtre.**

|                          | Quantité | Poids unitaire (kg) | Poids total (kg) |
|--------------------------|----------|---------------------|------------------|
| Capteur solaire          | 9        | 72                  | 648              |
| Support de fixation      | 1        | 224                 | 224              |
| Vase d'expansion de 25 l |          |                     |                  |
| Ballon tampon de 5 l     |          |                     |                  |
| Fluide caloporteur       |          |                     |                  |
| Tuyauteries              | -        | -                   | -                |
| Coefficient de sécurité  | 10 %     |                     | 87,2             |
| Total                    |          |                     | 959,2            |

Après les calculs de charge engendrée par l'installation sur la toiture de l'amphithéâtre, un rapport a été envoyé au Laboratoire Génie Civil de l'Institut 2iE en vue d'une proposition de solution quant à la stratégie de renforcement de la toiture. Les résultats de leurs calculs ont montré que la surcharge amènerait les pannes actuelles à un taux de travail de 160 %, qui est bien supérieur au plafond de 100 % admissible. Deux solutions se dégagent alors pour pallier à ce problème :

- ✚ Mise en place des pannes jumelées sur le versant devant accueillir les panneaux :
- ✚ Mise en place d'une structure portante indépendante pour la surcharge.

Pour des raisons économiques, de complexité technique de la méthode et du temps d'exécution (Annexe G), nous retenons la solution une, qui est de doubler les pannes actuelles par des IPE de même nature.

### V.1.2 Circulateurs

Lors du dimensionnement des circulateurs, les principales valeurs à déterminer sont le débit, la hauteur manométrique totale (HMT) et le diamètre nominal des conduites. Le choix du circulateur prend en compte ces paramètres, ainsi que des considérations telles que la fiabilité et la disponibilité sur le marché local, afin de permettre une acquisition rapide.

Dans le cadre du dimensionnement des circulateurs pour les différents circuits du système, les valeurs de diamètre nominal et de débit pour chaque circuit sont déterminées en se basant sur la fiche technique de la machine à adsorption et le schéma hydraulique de

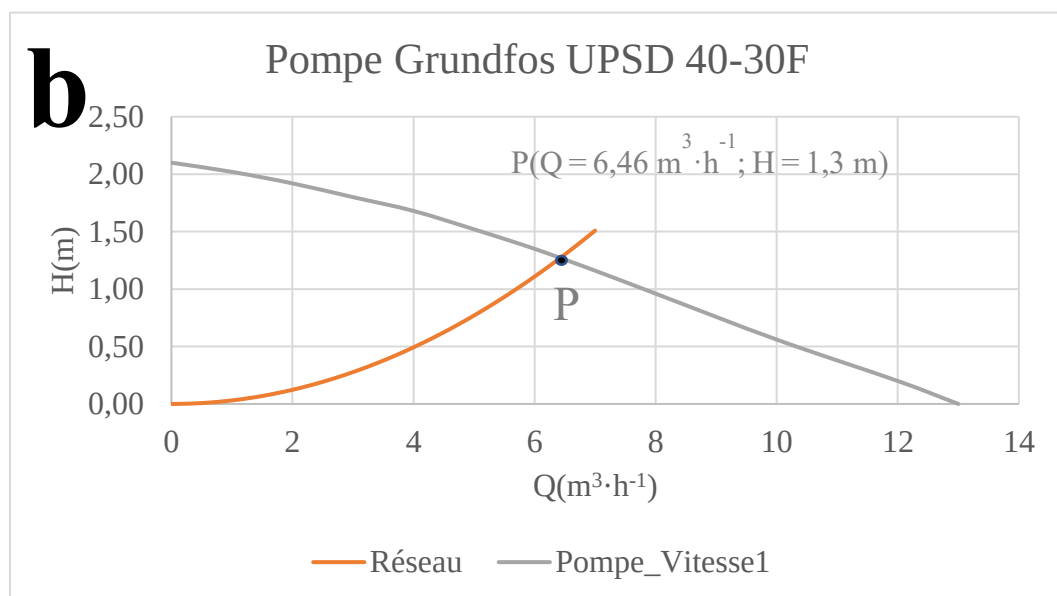
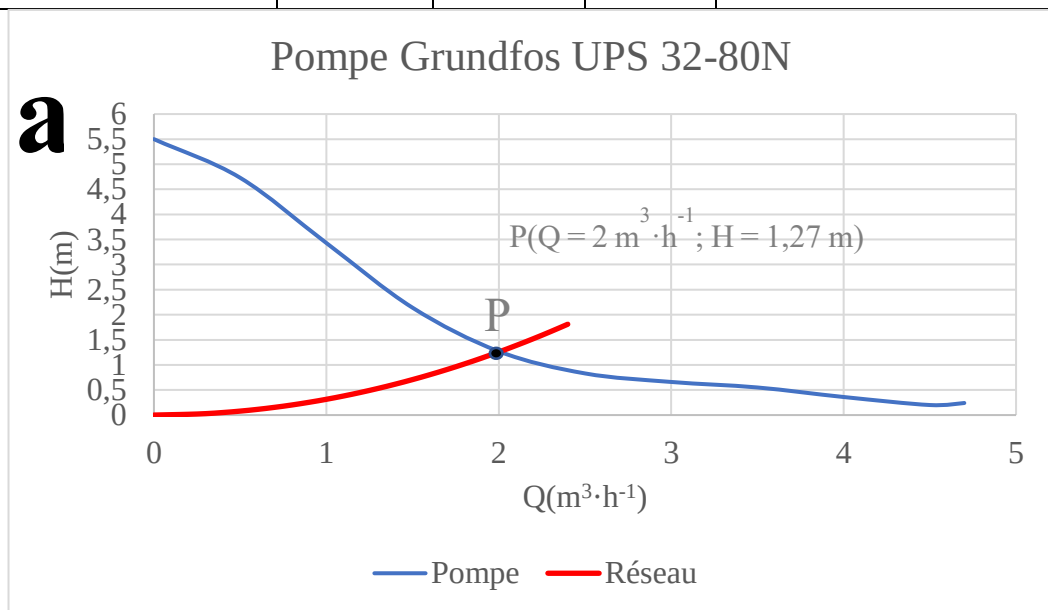


## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

d'installation fournie par le fabricant de la machine à adsorption. Le Tableau 4 présente les circulateurs initialement choisies pour les différents circuits à l'issu du dimensionnement (Annexe H) et la Figure 17 leurs points de fonctionnement.

**Tableau 4 : Résultat dimensionnement des circulateurs.**

|                            | Diamètre<br>(mm) | Débit<br>(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | HMT<br>(m) | Circulateur choisie                       |
|----------------------------|------------------|---------------------------------------------|------------|-------------------------------------------|
| Circuit d'eau glacée       | 32               | 2                                           | 1,6        | GRUNDFOS UPS 32-80N                       |
| Circuit de refroidissement | 40               | 5,9                                         | 0,97       | GRUNDFOS UPSD 40-30F<br>(1*230V/80W/0,9A) |



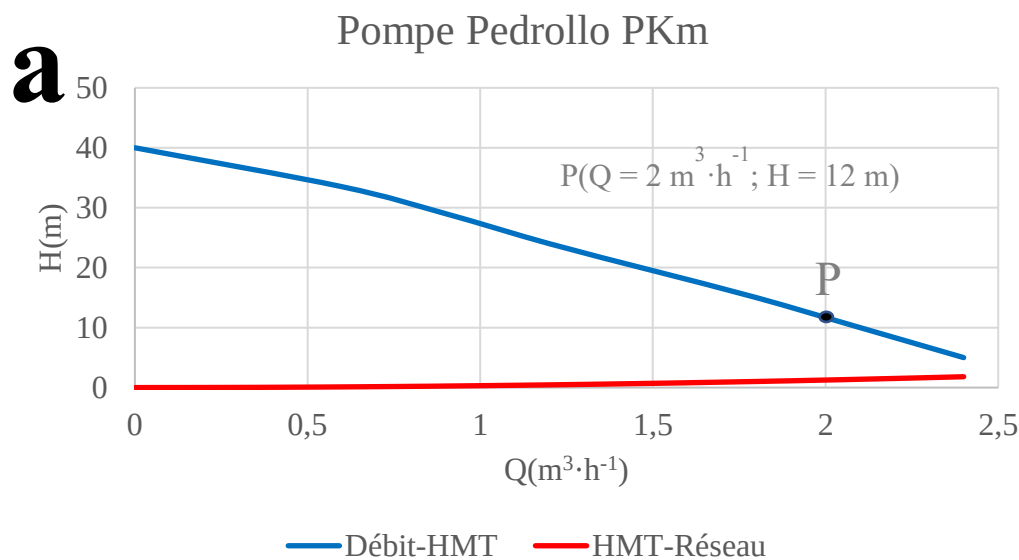
**Figure 17 : Points de fonctionnement des circulateurs dimensionnées. (a) circulateur du circuit d'eau glacée ; (b) circulateur du circuit de refroidissement.**

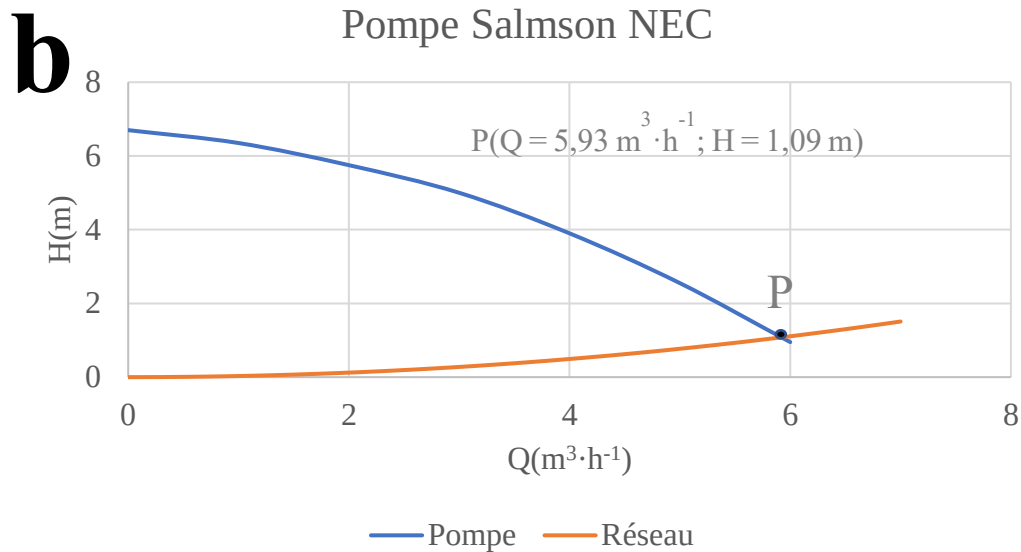
## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

Cependant, en raison de la disponibilité limitée sur le marché local, et de l'optimisation de la consommation des équipements à 2iE, il n'a pas été possible d'acquérir les circulateurs des circuits d'eau glacée et de refroidissement initialement dimensionnés. Ils ont été abandonnés aux profits d'autres pompes. En effet, un inventaire et une analyse ont été réalisés sur l'ensemble des pompes disponibles et utilisables à 2iE. Le Tableau 5 présente les pompes sélectionnées pour ces circuits, bien que certaines ne soient pas utilisées de façon optimale. Nous avons procédé à la vérification du fonctionnement de ces différentes pompes dans leurs circuits respectifs (Figure 18). L'utilisation de ces pompes de manière peu efficace en faisant des ajustements et des compromis peut impacter les performances globales du système plus précisément pour la pompe du circuit d'eau glacée qui nécessite une création de perte de charge importantes pour fonctionner au point P. L'Annexe H présente l'ensemble des fiches techniques desdites pompes ainsi que les détails du dimensionnement.

**Tableau 5 : Pompes retenues pour les différents circuits.**

|                                  | <b>Circulateur choisie</b>            |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Pompe circuit eau glacée         | PEDROLLO PKm 60 (1*230V/370W/1,62A)   |
| Pompe circuit de refroidissement | SALMSON NEC-2-M-25 (1*230V/180W/1,15) |





**Figure 18 : Point de fonctionnement des pompes retenues. (a) pompe du circuit d'eau glacée ; (b) pompe du circuit de refroidissement.**

### V.1.3 Section des câbles et calibre des dispositifs de protection

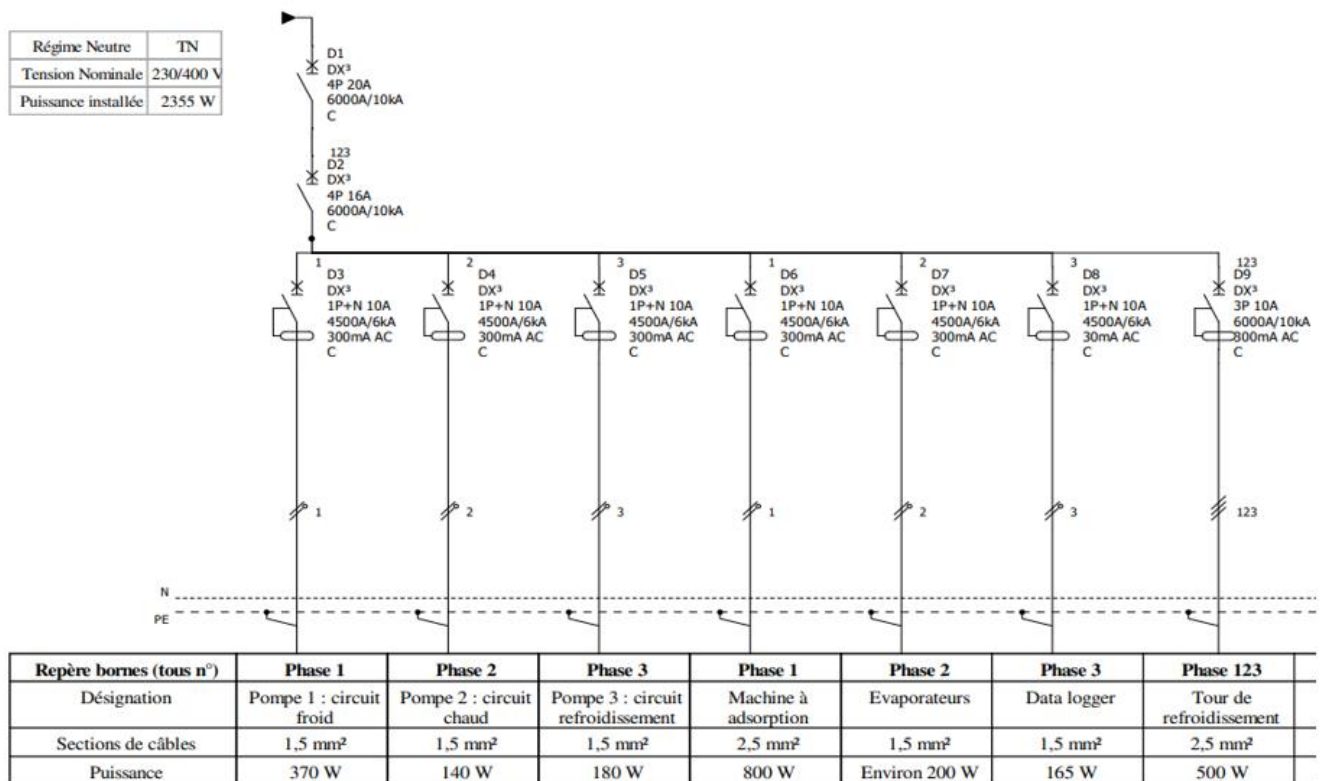
Le Tableau 6 présente les sections des différents câbles ainsi que les calibres des disjoncteurs pour la protection des équipements et des personnes. Les courants nominaux et de démarrage des composants motorisés sont obtenus à partir de leurs fiches techniques. Les détails du dimensionnement sont disponibles en Annexe C.

Étant donné que tous les récepteurs sont des éléments à faible puissance, le courant maximal admissible dans les circuits secondaires ne dépasse pas 5 A. Cela nous conduit à choisir des conducteurs de section  $1,5 \text{ mm}^2$  conformément à la Norme NFC 15-100, à l'exception des circuits alimentant la machine à adsorption et la tour de refroidissement, pour lesquels leurs fiches techniques imposent une section de  $2,5 \text{ mm}^2$ . Bien que le courant admissible du circuit principal nous permette de choisir une section de  $1,5 \text{ mm}^2$ , la section du câble d'alimentation principal est choisie égale à  $2,5 \text{ mm}^2$  en raison de la machine à adsorption et de la tour de refroidissement. De plus, le calibre du disjoncteur principal et de départ (piquage sur le coffret principal) retenu permet de respecter la question de sélectivité de l'installation électrique. Le schéma électrique de l'installation (Figure 19), réalisé sur le logiciel XLPRO 3 donne une vue d'ensemble de l'alimentation électrique du système.

# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

**Tableau 6 : Section des câbles électriques et calibre des disjoncteurs.**

| Éléments                 | Courant de service (A) | Courant admissible (A) | Section choisie (mm <sup>2</sup> ) | Calibre du disjoncteur (A) |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Machine à adsorption     | 3,48                   | 5,48                   | 2*2,5                              | 10                         |
| Tour de refroidissement  | 1,31                   | 2,07                   | 3*2,5                              | 10                         |
| Pompe eau glacée         | 1,62                   | 2,55                   | 2*1,5                              | 10                         |
| Circulateur eau chaude   | 1,2                    | 1,89                   | 2*1,5                              | 10                         |
| Pompe de refroidissement | 1,15                   | 1,81                   | 2*1,5                              | 10                         |
| Évaporateurs             | 0,87                   | 1,37                   | 2*1,5                              | 10                         |
| Centrale d'acquisition   | 0,68                   | 1,08                   | 2*1,5                              | 10                         |
| Câble principal          | 10,31                  | 11,93                  | 4*2,5                              | 16                         |
| Disjoncteur de piquage   |                        | -                      |                                    | 20                         |



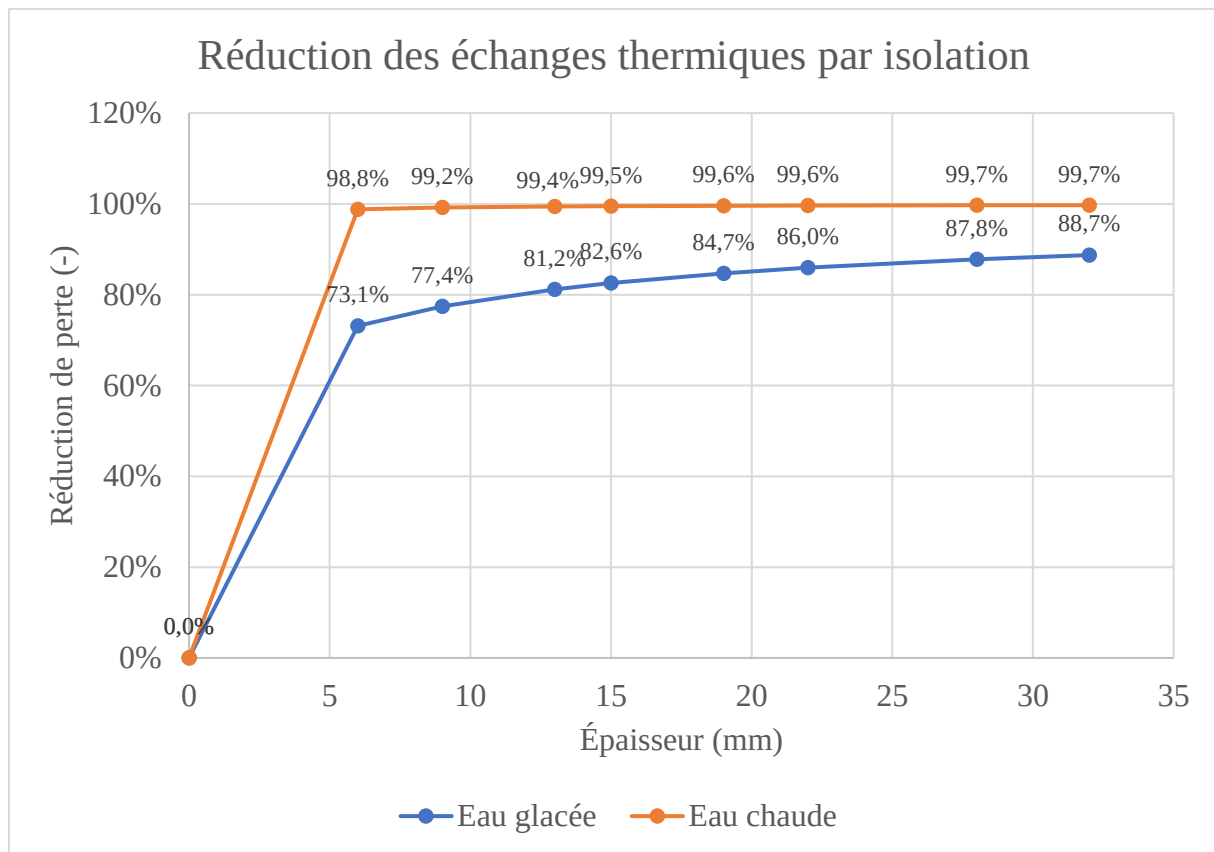
**Figure 19 : Schéma électrique de l'installation.**

## V.1.4 Épaisseur d'isolation

L'isolation thermique des conduites est vraiment importante car elle permet de garder la chaleur ou le froid là où on en a besoin. Son but principal est de réduire les pertes de chaleur ou de froid le long des tuyaux et de maintenir la température du fluide qui circule à l'intérieur.

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

Dans notre cas, nous nous orientons vers les isolants synthétiques au détriment des isolants en laine minérale. Cette préférence est due au fait que les isolants synthétiques sont plus adaptés à l'isolation des conduites de section circulaire grâce à leur forme préfabriquée alors que laines minérales sont davantage pour des parois planes et quelconques. Plus spécifiquement, nous choisissons l'isolant synthétique appelé armaflex, également connu sous le nom de mousse élastomère. En effet les trois meilleurs et populaires isolants synthétiques offrant un coût relativement bas sont le polystyrène, le polyuréthane et la mousse élastomère. Parmi eux seul mousse élastomère, bien que sa conductivité thermique ( $0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) soit légèrement supérieure au polyuréthane ( $0,028 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), est étanche à l'eau, à la vapeur et offre une meilleure durée de vie comparé aux deux autres qui sont perméable à la vapeur d'eau, sensible à la corrosion et aux rongeurs [24]. Les spécifications techniques de l'armaflex sont fournies par le fabricant [25] et les résultats des calculs sont présentés en Annexe D.



**Figure 20 : Courbes de réduction des échanges thermiques.**

La Figure 20 présente la réduction des échanges thermiques des circuits d'eau glacée et d'eau chaude en fonction de l'épaisseur de l'isolant. Pour l'épaisseur standard maximal du type d'isolant choisie (32 mm), les réductions maximales correspondantes sont de 99,6 % et 84,7 % respectivement pour les circuits d'eau chaude et d'eau glacée comparé aux mêmes circuits sans

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

isolation. Nous choisissons donc les épaisseurs, disponibles sur le marché local, adaptés aux diamètres des conduites et qui occasionnent le plus de réduction des échanges thermiques. Il s'agit donc de l'épaisseur de 19 mm pour les 2 circuits en place.

### V.2 Aperçu de l'installation



Les travaux réalisés à l'amphithéâtre 2 de l'Institut 2iE, entre le 12 mai et le 17 juin 2023, ont abouti à la mise en place d'un système de climatisation solaire basé sur une machine à adsorption. Les composants clés de cette installation comprennent des capteurs solaires sous-vide, une tour de refroidissement, des évaporateurs et la machine à adsorption elle-même. Pour assurer leur bon fonctionnement, tous ces éléments sont reliés à l'élément central, la machine à adsorption, par des conduites d'eau spécifiques.

Les capteurs solaires sont connectés à l'élément central en passant par un réservoir d'eau chaude, tandis que la tour de refroidissement est reliée à l'élément central via un séparateur de circuit. De plus, les évaporateurs sont connectés à l'élément central à travers un réservoir d'eau glacée. Chacun de ces circuits dispose d'un circulateur dédié pour garantir la circulation optimale du fluide et maintenir le débit de l'écoulement.

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

En outre, l'installation est équipée d'un système complet d'instrumentation pour assurer une surveillance globale et minutieuse de l'ensemble du système. Cela permet de collecter des données précises sur les différents paramètres et de garantir un fonctionnement efficace de l'installation.

Grâce à ces travaux, l'amphithéâtre 2 de l'Institut 2iE bénéficie désormais d'un système de climatisation solaire innovant, offrant une solution durable et économe en énergie pour le confort des occupants.

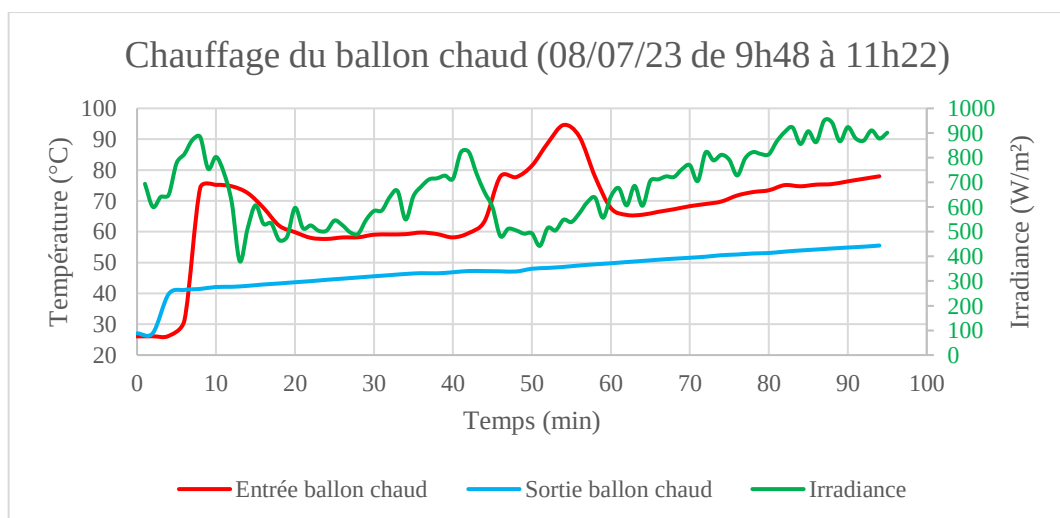
### V.3 Résultats et discussions du premier test de fonctionnement

Le test de fonctionnement du système de production de froid par adsorption solaire en grandeur nature est effectué. Les conditions initiales de test sont présentées au Tableau 7.

**Tableau 7 : Conditions initiales de test**

| Paramètres                     | Unité                            | Valeurs |
|--------------------------------|----------------------------------|---------|
| Débit d'eau chaude             | $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 0,80    |
| Débit d'eau glacée             | $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 0,85    |
| Débit d'eau de refroidissement | $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 1,5     |
| Température d'eau chaude       | °C                               | 40      |
| Température d'eau glacée       | °C                               | 30,4    |
| Température ambiante           | °C                               | 29      |

Le premier test du système affiche un bilan peu favorable. En effet, le circuit d'eau chaude fonctionne correctement avec un débit constant de  $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et on assiste à un chauffage du ballon d'eau chaude de 40 à 56 °C en 1 heures 30 minutes (Figure 21).

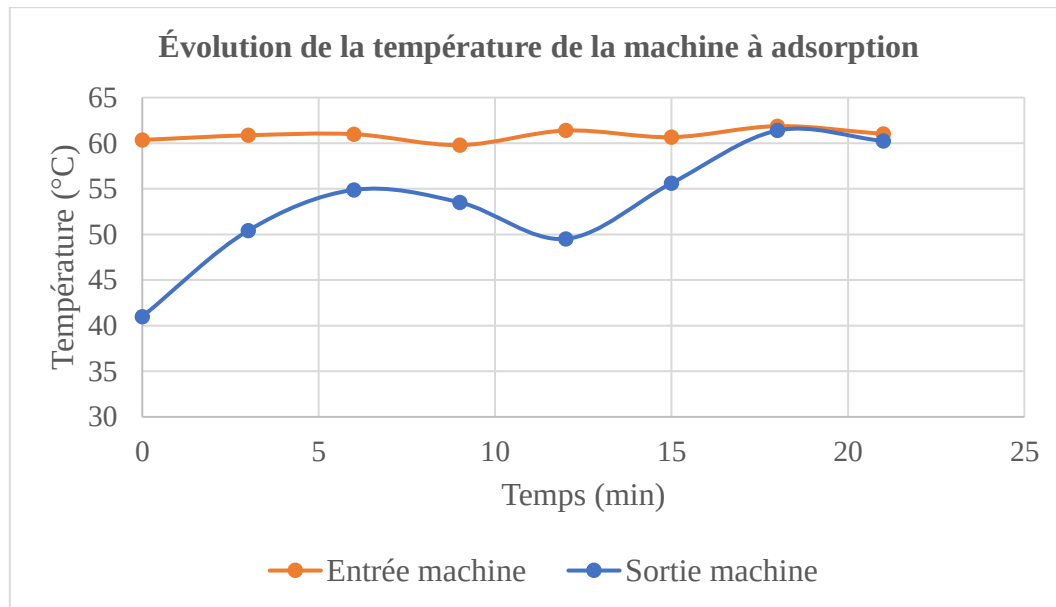


**Figure 21 : Chauffage du réservoir d'eau chaude**



## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

En ce qui concerne la machine à adsorption, elle tourne mais ne fonctionne pas. Le fluide caloporteur, circulant entre la machine et le ballon d'eau chaude grâce à un circulateur intégré dans la machine, chauffe rapidement les absorbeurs de la machine et voit son circulateur s'arrêter à l'approche de l'équilibre entre ses températures d'entrée et de sortie (Figure 22).



**Figure 22 : Chauffage de la machine à adsorption**

Quant au circuit reliant la machine au ballon d'eau glacée, bien que les conditions soient réunies (vannes ouvertes et présence d'eau), le circulateur dudit circuit, circulateur intégré à la machine, ne fonctionne pas, il n'y a donc pas de production de froid. Un message d'alarme (Figure 23) s'affiche à cet effet et la description de son code d'erreur stipule que soit le circuit en question est obstrué, ce qui n'est pas le cas, soit le circulateur est endommagé. Selon les premiers diagnostics, se défaut serait dû à un niveau de pression trop faible (0,8 bar) dans les absorbeurs de la machine. Nous travaillons avec le fournisseur pour trouver la cause de ce problème ainsi qu'une solution.

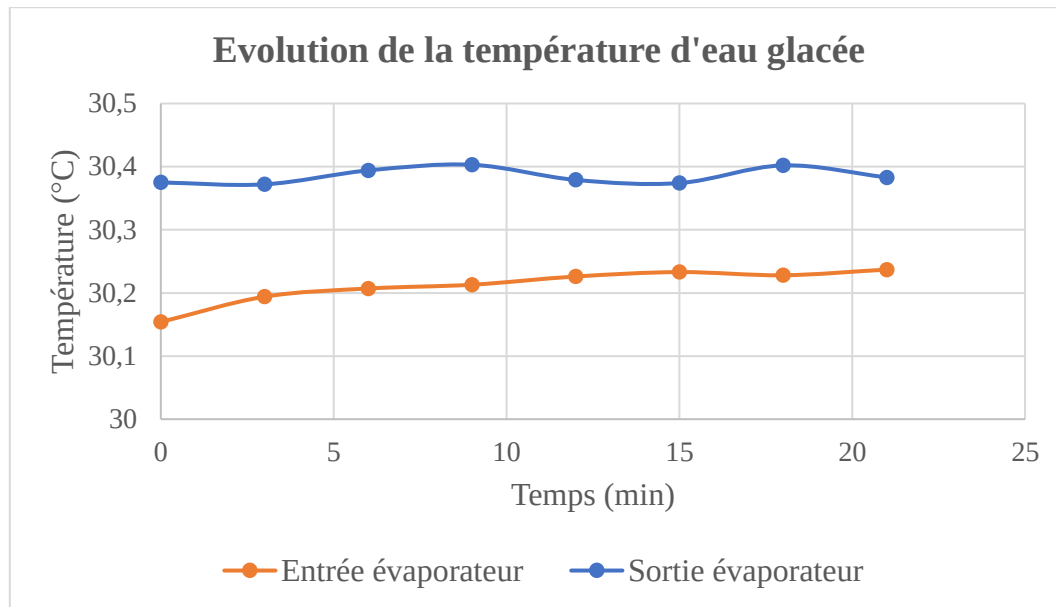


**Figure 23 : Alarme d'erreur dans la machine à adsorption**



## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

Pour le circuit d'eau glacée (entre le ballon d'eau glacée et les évaporateurs), sa pompe et ses évaporateurs fonctionnent avec un débit constant de  $0,85 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Les températures d'entrée et de sortie de l'eau sont quasi identiques du fait de la non production de froid par la machine (Figure 24).



**Figure 24 : Évolution de la température d'eau glacée**

Le circuit de refroidissement de la machine, composé d'une tour de refroidissement, d'un séparateur de circuit et d'un circulateur, fonctionne avec un débit maximal de  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et une température de l'ordre de  $25^\circ \text{C}$ . Cet ordre de température traduit le bon fonctionnement de la tour car en comparaison, la température ambiante est de  $29^\circ \text{C}$ . Cependant lors de l'étude préliminaire, un débit de fonctionnement de  $5,9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  est attendu. Cette incapacité de la pompe à fournir ce débit peut s'expliquer dans un premier temps par les pertes de charge engendrés par les singularités supplémentaires insérées dans le circuit, dans un second temps par le fait que la pompe étant vieille, n'a plus les caractéristiques de sa courbe de fonctionnement.

## VI. CONCLUSION

---

Ce document présente la mise en place d'un système associant un refroidisseur continue à adsorption solaire avec un groupe de production de froid par compression. Le système hybride résultant est spécifiquement utilisé pour la climatisation d'un amphithéâtre de 233,39 m<sup>2</sup>, pouvant accueillir 252 personnes, situé à Ouagadougou, au Burkina Faso. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les performances thermodynamiques de ce système dans un climat tropical similaire à celui du Faso.

En optimisant l'utilisation de l'énergie solaire abondante dans la région, cette association offre un potentiel considérable pour répondre aux besoins en climatisation. Le système de climatisation solaire par adsorption se compose principalement d'un champ de capteurs solaires d'une surface de 44,64 m<sup>2</sup>, d'un réservoir de stockage d'eau chaude, d'un réservoir de stockage d'eau glacée, d'une tour de refroidissement et de deux évaporateurs. Afin de mesurer et d'évaluer précisément les performances du système, une instrumentation complète a été mise en place. Des capteurs de température, de rayonnement solaire et de débit ont été installés à des emplacements stratégiques pour obtenir des données fiables et pertinentes qui permettront d'analyser le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement.

Bien qu'il y'ai un dysfonctionnement interne d'un composant de la machine, les résultats du premier test de fonctionnement sont prometteurs. Le champ solaire a permis de chauffer l'eau assez rapidement. Un gradient de température de 42 °C a été obtenu en seulement 2h15. Les autres circuits quant à eux offrent un fonctionnement similaire à celui escompté dans l'étude préliminaire à part la pompe du circuit de refroidissement du fait de sa vieillesse.

## VII. PERSPECTIVES

---

La technologie des machines à adsorption solaire peut améliorer les conditions de fonctionnement et l'efficacité des systèmes de climatisation. Voici quelques perspectives d'avenir et améliorations pour cette technologie :

- ✚ Installer un manomètre et une soupape de sécurité dans chaque portion du circuit afin de remplir les circuits à l'aide d'un propulseur afin de résoudre le problème de pression ;
- ✚ Intégration avec d'autres sources d'énergie renouvelables : l'intégration des machines d'adsorption solaire avec d'autres sources d'énergie renouvelables, telle que le solaire photovoltaïque, permet une utilisation plus efficace des ressources disponibles. Cette association contribuera à rendre le système strictement autonome et renouvelable.
- ✚ Intégration dans les bâtiments résidentiels : mener des réflexions sur la conception de systèmes de climatisation solaire adaptés aux exigences desdits bâtiments afin de s'orienter vers un ensemble plus compact minimisant ainsi l'espace occupé, espace qui devient de plus en plus chère de nos jours.
- ✚ Réalisation des tests de performances sur toute une année afin de mieux comprendre le fonctionnement global du système dans un climat chaud semblable à celui des pays d'Afrique de l'Ouest.

## VIII. BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] UEMOA et IFDD, « Chiffres clés sur l'énergie dans l'UEMOA ». 2019. Consulté le: 13 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ifdd.francophonie.org/wp-content/uploads/2021/09/Rapport-2019\\_SIE\\_UEMOA\\_Chiffres\\_Cles\\_UEMOA\\_web.pdf](https://www.ifdd.francophonie.org/wp-content/uploads/2021/09/Rapport-2019_SIE_UEMOA_Chiffres_Cles_UEMOA_web.pdf)
- [2] K. E. N'Tsoukpoe, D. Yamegueu, et J. Bassole, « Solar sorption refrigeration in Africa », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 35, p. 318-335, juill. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.030.
- [3] IEA, « Energy Statistics Data Browser – Data Tools », *IEA*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser> (consulté le 17 juin 2023).
- [4] K. E. N'tsoukpoe, S. C. Lekombo, F. Kemausuor, G. K. Ko, et E. H. B. Diaw, « Overview of solar thermal technology development and applications in West Africa: focus on hot water and its applications », *Sci. Afr.*, p. e01752, juin 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01752.
- [5] Institut 2iE, « Plaquelette LabEREE ». 2021. Consulté le: 18 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.2ie-edu.org/wp-content/uploads/2021/05/PLAQUETTE-LABEREE-2021\\_VERSION-FINALE.pdf](https://www.2ie-edu.org/wp-content/uploads/2021/05/PLAQUETTE-LABEREE-2021_VERSION-FINALE.pdf)
- [6] Q. W. Pan, R. Z. Wang, L. W. Wang, et D. Liu, « Design and experimental study of a silica gel-water adsorption chiller with modular adsorbers », *Int. J. Refrig.*, vol. 67, p. 336-344, juill. 2016, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.03.001.
- [7] H. Bjurström et W. Raldow, « the absorption process for heating, cooling and energy storage—an historical survey », *Int. J. Energy Res.*, vol. 5, n° 1, p. 43-59, 1981, doi: 10.1002/er.4440050105.
- [8] P. Srihirin, S. Aphornratana, et S. Chungpaibulpatana, « A review of absorption refrigeration technologies », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 5, n° 4, p. 343-372, déc. 2001, doi: 10.1016/S1364-0321(01)00003-X.
- [9] R. Z. Wang et R. G. Oliveira, « Adsorption refrigeration—An efficient way to make good use of waste heat and solar energy », *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 32, n° 4, p. 424-458, janv. 2006, doi: 10.1016/j.pecs.2006.01.002.
- [10] D. C. Wang, J. Y. Wu, Z. Z. Xia, H. Zhai, R. Z. Wang, et W. D. Dou, « Study of a novel silica gel–water adsorption chiller. Part II. Experimental study », *Int. J. Refrig.*, vol. 28, n° 7, p. 1084-1091, nov. 2005, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2005.03.002.
- [11] Q. W. Pan, R. Z. Wang, et L. W. Wang, « Comparison of different kinds of heat recoveries applied in adsorption refrigeration system », *Int. J. Refrig.*, vol. 55, p. 37-48, juill. 2015, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.03.022.
- [12] Q. Pan, J. Peng, et R. Wang, « Experimental study of an adsorption chiller for extra low temperature waste heat utilization », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 163, p. 114341, déc. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114341.
- [13] M. B. Elsheniti, A. T. Abd El-Hamid, O. A. El-Samni, S. M. Elsherbiny, et E. Elsayed, « Experimental evaluation of a solar two-bed lab-scale adsorption cooling system », *Alex. Eng. J.*, vol. 60, n° 3, p. 2747-2757, juin 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.01.024.
- [14] L. X. Gong, R. Z. Wang, Z. Z. Xia, et Z. S. Lu, « Experimental study on an adsorption chiller employing lithium chloride in silica gel and methanol », *Int. J. Refrig.*, vol. 35, n° 7, p. 1950-1957, nov. 2012, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.013.
- [15] S. Edin Hamrahi, K. Goudarzi, et M. Yaghoubi, « Experimental study of the performance of a continues solar adsorption chiller using Nano-activated carbon/methanol as working pair », *Sol. Energy*, vol. 173, p. 920-927, oct. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.08.030.

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

- [16] X. Q. Zhai, R. Z. Wang, J. Y. Wu, Y. J. Dai, et Q. Ma, « Design and performance of a solar-powered air-conditioning system in a green building », *Appl. Energy*, vol. 85, n° 5, p. 297-311, mai 2008, doi: 10.1016/j.apenergy.2007.07.016.
- [17] A. Ilie, R. Dumitrescu, A. Girip, et V. Cublesan, « Study on Technical and Economical Solutions for Improving Air-conditioning Efficiency in Building Sector », *Energy Procedia*, vol. 112, p. 537-544, mars 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1113.
- [18] Q. W. Pan, L. Liu, B. Wang, J. Xu, et T. S. Ge, « Design and experimental study on a small-scale silica gel/water adsorption chiller with heat and mass recovery scheme for solar energy use », *Sol. Energy*, vol. 252, p. 91-100, mars 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.01.052.
- [19] Ergonomics, « Proportion du corps humain », avril 2023. <http://villemin.gerard.free.fr/Biologie/CorpsPro.htm> (consulté le 18 mai 2023).
- [20] J.-P. BAUME, G. BELAUD, et P.-Y. VION, « Hydraulique pour le génie rural ». avril 2013. Consulté le: 17 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: [https://hydraulique.g-eau.fr/IMG/pdf/cours\\_hydraulique\\_g-eau2013.pdf](https://hydraulique.g-eau.fr/IMG/pdf/cours_hydraulique_g-eau2013.pdf)
- [21] K. E. N'Tsoukpoe, N. Le Pierrès, Y. M. Seshie, et Y. Coulibaly, « Technico-economic comparison of heat transfer fluids or thermal energy storage materials: A case study using *Jatropha curcas* oil », *Afr. J. Sci. Technol. Innov. Dev.*, vol. 13, n° 2, p. 193-211, févr. 2021, doi: 10.1080/20421338.2020.1838082.
- [22] Jacques Chaurette, « Fluide design ». avril 2003. Consulté le: 8 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.pumpfundamentals.com/download-free/pipe\\_rough\\_values-fr.pdf](https://www.pumpfundamentals.com/download-free/pipe_rough_values-fr.pdf)
- [23] K. E. N'Tsoukpoe, « Effect of orientation and tilt angles of solar collectors on their performance: Analysis of the relevance of general recommendations in the West and Central African context », *Sci. Afr.*, vol. 15, p. e01069, mars 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e01069.
- [24] « Tout savoir sur les isolants synthétiques », *Chauffage écologique et énergies vertes*, 9 août 2020. <https://www.chauffage-energie-ecologique.com/isolants-synthetiques-caracteristiques-performances/> (consulté le 28 juin 2023).
- [25] A. Xg, « L'isolant flexible universel avec la technologie Armaflex », 2018.
- [26] Prabhata, K, SWAMEE, Nimisha, et SWAMEE, « DESIGN OF SEDIMENT TRANSPORTING CANAL SECTIONS », *Étude Int. Sur Sédiments Version Anglaise*, vol. 19, n° 4, p. 312-318, 2004, Consulté le: 17 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.cqvip.com/qk/87646x/200404/11509461.html>
- [27] R. H. S. Winterton, « Where did the Dittus and Boelter equation come from? », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 41, n° 4-5, p. 809-810, févr. 1998, doi: 10.1016/S0017-9310(97)00177-4.
- [28] ThermExcel, « Paramètres physiques de l'eau », avril 2023. [https://www.thermexcel.com/french/tables/eau\\_atm.htm](https://www.thermexcel.com/french/tables/eau_atm.htm) (consulté le 11 avril 2023).
- [29] S. W. Churchill et H. H. S. Chu, « Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 18, n° 9, p. 1049-1053, sept. 1975, doi: 10.1016/0017-9310(75)90222-7.
- [30] E. Edge et E. E. LLC, « Paramètres physiques de l'air ». [https://www.engineersedge.com/physics/viscosity\\_of\\_air\\_dynamic\\_and\\_kinematic\\_14483.htm](https://www.engineersedge.com/physics/viscosity_of_air_dynamic_and_kinematic_14483.htm) (consulté le 16 avril 2023).

## IX. ANNEXES

---

|                                                                                                                        |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Annexe A : Fiches techniques des éléments dimensionnés préalablement à notre travail<br>[Source : Fahrenheit].....     | I    |
| Annexe B : Vue de profil de l'amphithéâtre [Source : Archives de l'Institut 2iE].....                                  | II   |
| Annexe C : Détails de dimensionnement des câbles et des dispositifs de protection [Source :<br>Norme NFC 15-100] ..... | III  |
| Annexe D : Épaisseur d'isolation.....                                                                                  | IV   |
| Annexe E : Calcul du coefficient de convection interne.....                                                            | V    |
| Annexe F : Calcul du coefficient de convection externe.....                                                            | VII  |
| Annexe G : Renforcement de la toiture.....                                                                             | VIII |
| Annexe H : Détails sur les circulateurs .....                                                                          | IX   |

# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

## Annexe A : Fiches techniques des éléments dimensionnés préalablement à notre travail [Source : Fahrenheit]

**a**

| MODEL                                |                      | PERFORMANCE             |               |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|
| eCoo 10                              |                      | Cooling capacity        | up to 16.7 kW |
|                                      |                      | COP <sub>h</sub>        | up to 0.65    |
| APPLICATION RANGE                    |                      | HOT WATER CIRCUIT       |               |
| Hot water temperature                | 50 - 95°C            | Volume flow rate        | 250 m³/h      |
| Re-cooling water temperature         | 22 - 40°C            | Available delivery head | 464 mbar      |
| Chilled water temperature            | 8 - 21°C             | Connection              | G 1 1/4" AG   |
| Max. operating pressure              | 4 bar                |                         |               |
| DIMENSIONS                           |                      | RE-COOLING CIRCUIT      |               |
| W x D x H                            | 875 x 765 x 2,003 mm | Volume flow rate        | 510 m³/h      |
| Footprint                            | 0.67 m²              | Available delivery head | 690 mbar      |
| Empty weight                         | ca. 370 kg           | Connection              | G 1 1/4" AG   |
| ELECTR. POWER CONSUMPTION AND SUPPLY |                      | CHILLED WATER CIRCUIT   |               |
| At typical pressure drop             | 260 W                | Volume flow rate        | 290 m³/h      |
| At max. delivery head                | 800 W                | Available delivery head | 630 mbar      |
| Power supply                         | 230 V, 50/60 Hz      | Connection              | G 1 1/4" AG   |

**b**

| Collector Type                      |         | OEM Vario 2400-30 hp | OEM Vario 3000-30 hp |
|-------------------------------------|---------|----------------------|----------------------|
| Absorber coating                    |         | one side             | both sides           |
| Amount of tubes                     |         | 30                   |                      |
| Measures                            | mm      | 2208 x 2247 x 115    |                      |
| Gross area                          | m²      | 4,96                 |                      |
| Weight                              | kg      | 72                   |                      |
| Annual collector yield              |         |                      |                      |
| Solar Keymark                       | kWh/m²a | 2309                 | 3180                 |
| (measured in Würzburg → 25 °C (Tm)) |         |                      |                      |
| Absorber                            |         |                      |                      |
| Absorption α / Emission ε           | %       | 96/4                 |                      |
| Absorber area                       | m²      | 2,74                 | 4,89                 |
| Aperture area                       | m²      | 3,05                 | 4,46                 |
| Coating                             |         | TiNOX                |                      |
| Hydraulics                          |         |                      |                      |
| Max. operating pressure             | bar     | 10                   |                      |
| Cut-off temperature                 | °C      | 120 – 160            |                      |
| Collector volume                    | L       | 1,41                 |                      |

**c**

| Technische Daten<br>Technical specification    |                      |
|------------------------------------------------|----------------------|
| Typ<br>Type                                    | RAX 064 / 600        |
| AB.-Nr.<br>Order No.                           | 48196                |
| Baujahr<br>Year of construction                | 2022                 |
| Wasservordruck<br>Water primary pressure       | 0,5 bar              |
| Wassertemperatur max.<br>Temperature aqua max. | 80 °C                |
| Ventilator Drehzahl max.<br>Fan speed max.     | 695 / 1400 min-1     |
| Ventilatorleistung<br>Fan motor                | 0,12 / 0,5 kW        |
| Stromaufnahme<br>Amperage                      | 0,49 / 1,31 A        |
| Spannung<br>Voltage                            | 400 V / 3 Ph / 50 Hz |

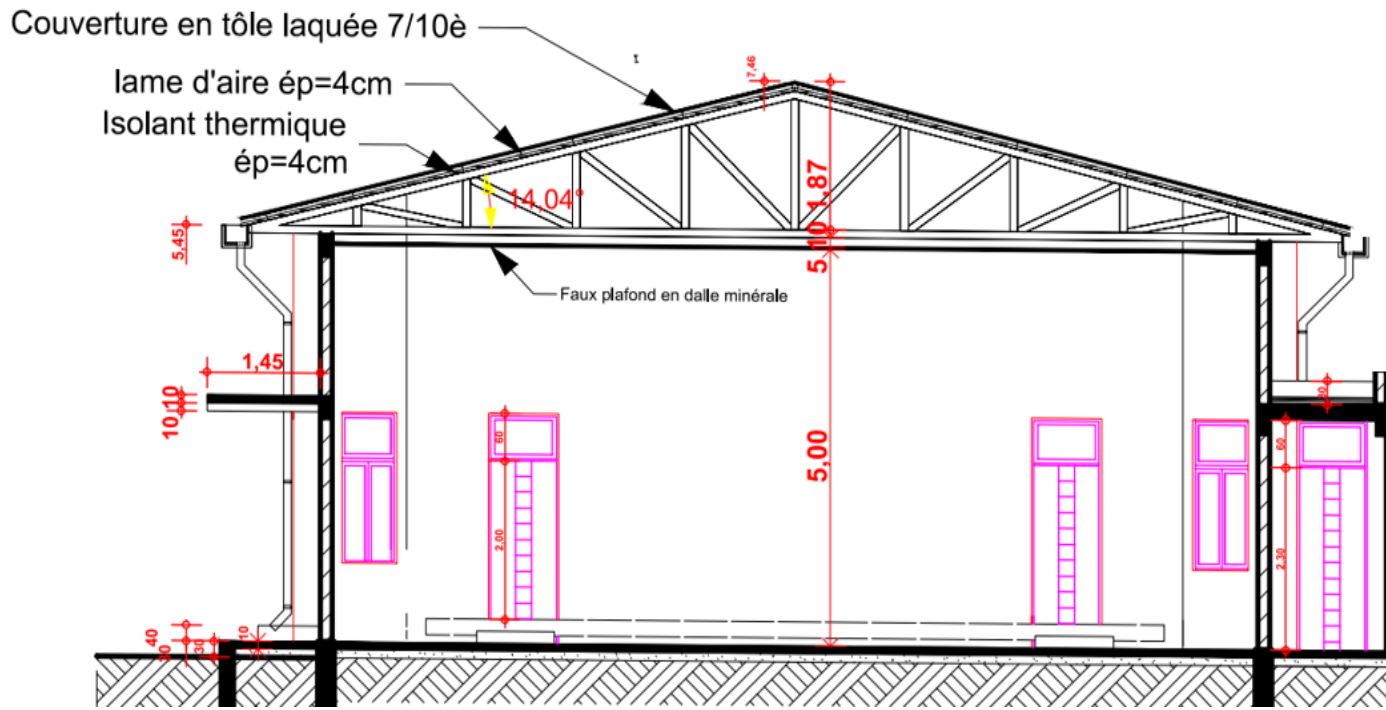
**d**

| Model                                | ST-10                         |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Article number                       | A600026                       |
| General data                         |                               |
| Capacity                             | 40 kW                         |
| Connections                          | 2" gland, soldering 42 mm     |
| Heat transfer medium (internal side) | Water                         |
| Heat transfer medium (external side) | Ethylene glycol - water (34%) |
| Heat exchanger surface               | 7.66 m²                       |
| Dimensions                           |                               |
| W x D x H                            | 243 x 151 x 525 mm            |
| Footprint                            | 0.037 m²                      |
| Weight                               |                               |
| Empty weight                         | 35.4 kg                       |
| Filled weight                        | 49.9 kg                       |
| Pressure drop                        |                               |
| Internal side                        | 56.4 mbar                     |
| External side                        | 89.7 mbar                     |
| Filling volume                       |                               |
| Internal side                        | 6.99 liter                    |
| External side                        | 7.23 liter                    |

Fig. 1 : (a) Machine à adsorption eCoo10 ; (b) Capteurs sous vide OEM Vario 3000 ; (c) Tour de refroidissement RAX064/600 ; (d) Séparateur de circuit ST-10.

CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À  
ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

**Annexe B : Vue de profil de l'amphithéâtre [Source : Archives de l'Institut  
2iE]**



**Fig. 2 : Plan d'aménagement (Vue en coupe AA) de l'amphithéâtre 2.**



# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

## Annexe C : Détails de dimensionnement des câbles et des dispositifs de protection [Source : Norme NFC 15-100]

**Tab. 1 : Résultat du dimensionnement des câbles électriques et disjoncteurs de protection.**

|                      | Machine à<br>adsorption | Tour de<br>refroidissement | Pompe<br>froid | Circulateur<br>chaud | Pompe<br>de ref | Évaporateurs | Centrale<br>d'acquisition | Câble<br>principal |
|----------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|----------------------|-----------------|--------------|---------------------------|--------------------|
| Mode de pose         | 11C                     | 11C                        | 11C            | 11C                  | 11C             | 11C          | 11C                       | 13E                |
| I (A)                | 3,48                    | 1,31                       | 1,62           | 1,2                  | 1,15            | 0,87         | 0,68                      | 10,31              |
| Mode de pose         | 1,21                    | 1,21                       | 1,21           | 1,21                 | 1,21            | 1,21         | 1,21                      | 0,95               |
| Neutre chargé        | 1                       | 1                          | 1              | 1                    | 1               | 1            | 1                         | 1                  |
| Température: 40°C    | 0,91                    | 0,91                       | 0,91           | 0,91                 | 0,91            | 0,91         | 0,91                      | 0,91               |
| Nombre circuit:6     | 0,72                    | 0,72                       | 0,72           | 0,72                 | 0,72            | 0,72         | 0,72                      | 1                  |
| Nombre couche:2      | 0,8                     | 0,8                        | 0,8            | 0,8                  | 0,8             | 0,8          | 0,8                       | 1                  |
| Total                | 0,63                    | 0,63                       | 0,63           | 0,63                 | 0,63            | 0,63         | 0,63                      | 0,86               |
| I <sub>adm</sub> (A) | 5,48                    | 2,07                       | 2,55           | 1,89                 | 1,81            | 1,37         | 1,08                      | 11,93              |
| S (mm <sup>2</sup> ) | 2*2,5                   | 3*2,5                      | 2*1,5          | 2*1,5                | 2*1,5           | 2*1,5        | 2*1,5                     | 4*2,5              |
| In (A)               | 10                      | 10                         | 10             | 10                   | 10              | 10           | 10                        | 16                 |

| Méthode de référence | ISOLANT ET NOMBRE DE CONDUCTEURS CHARGES |       |       |       |       |       |      |      |      |
|----------------------|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| B                    | PVC 3                                    | PVC 2 |       | PR 3  |       | PR 2  |      |      |      |
| C                    |                                          | PVC 3 |       | PVC 2 | PR 3  |       | PR 2 |      |      |
| E                    |                                          |       | PVC 3 |       | PVC 2 | PR 3  |      | PR 2 |      |
| F                    |                                          |       |       | PVC 3 |       | PVC 2 | PR 3 |      | PR 2 |
| S (mm <sup>2</sup> ) | 1                                        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8    | 9    |
| Cuivre               |                                          |       |       |       |       |       |      |      |      |
| 1,5                  | 15,5                                     | 17,5  | 18,5  | 19,5  | 22    | 23    | 24   | 26   |      |
| 2,5                  | 21                                       | 24    | 25    | 27    | 30    | 31    | 33   | 36   |      |
| 4                    | 28                                       | 32    | 34    | 36    | 40    | 42    | 45   | 49   |      |
| 6                    | 36                                       | 41    | 43    | 48    | 51    | 54    | 58   | 63   |      |
| 10                   | 50                                       | 57    | 60    | 63    | 70    | 75    | 80   | 86   |      |
| 16                   | 68                                       | 76    | 80    | 85    | 94    | 100   | 107  | 115  |      |
| 25                   | 89                                       | 96    | 101   | 112   | 119   | 127   | 138  | 149  | 161  |
| 35                   | 110                                      | 119   | 126   | 138   | 147   | 158   | 169  | 185  | 200  |
| 50                   | 134                                      | 144   | 153   | 168   | 179   | 192   | 207  | 225  | 242  |
| 70                   | 171                                      | 184   | 196   | 213   | 229   | 246   | 268  | 289  | 310  |
| 95                   | 207                                      | 223   | 238   | 258   | 278   | 298   | 328  | 352  | 377  |
| 120                  | 239                                      | 259   | 276   | 299   | 322   | 346   | 382  | 410  | 437  |
| 150                  |                                          | 299   | 319   | 344   | 371   | 395   | 441  | 473  | 504  |
| 185                  |                                          | 341   | 364   | 392   | 424   | 450   | 506  | 542  | 575  |
| 240                  |                                          | 403   | 430   | 461   | 500   | 538   | 599  | 641  | 679  |
| 300                  |                                          | 464   | 497   | 530   | 576   | 621   | 693  | 741  | 783  |
| 400                  |                                          |       |       |       | 656   | 754   | 825  | 940  |      |
| 500                  |                                          |       |       |       | 749   | 868   | 946  | 1083 |      |
| 630                  |                                          |       |       |       | 855   | 1005  | 1088 | 1254 |      |
| Aluminium            |                                          |       |       |       |       |       |      |      |      |
| 2,5                  | 16,5                                     | 18,5  | 19,5  | 21    | 23    | 24    | 26   | 28   |      |
| 4                    | 22                                       | 25    | 26    | 28    | 31    | 32    | 35   | 38   |      |
| 6                    | 28                                       | 32    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45   | 49   |      |
| 10                   | 39                                       | 44    | 46    | 49    | 54    | 58    | 62   | 67   |      |
| 16                   | 53                                       | 59    | 61    | 66    | 73    | 77    | 84   | 91   |      |
| 25                   | 70                                       | 73    | 78    | 83    | 90    | 97    | 101  | 108  | 121  |
| 35                   | 86                                       | 90    | 96    | 103   | 112   | 120   | 126  | 135  | 150  |
| 50                   | 104                                      | 110   | 117   | 125   | 136   | 146   | 154  | 164  | 184  |
| 70                   | 133                                      | 140   | 150   | 160   | 174   | 187   | 198  | 211  | 237  |
| 95                   | 161                                      | 170   | 183   | 195   | 211   | 227   | 241  | 257  | 289  |
| 120                  | 186                                      | 197   | 212   | 226   | 245   | 263   | 280  | 300  | 337  |
| 150                  |                                          | 227   | 245   | 261   | 283   | 304   | 324  | 346  | 389  |
| 185                  |                                          | 259   | 280   | 298   | 323   | 347   | 371  | 397  | 447  |
| 240                  |                                          | 305   | 330   | 352   | 382   | 409   | 439  | 470  | 530  |
| 300                  |                                          | 351   | 381   | 406   | 440   | 471   | 508  | 543  | 613  |
| 400                  |                                          |       |       |       | 526   | 600   | 663  | 740  |      |
| 500                  |                                          |       |       |       | 610   | 694   | 770  | 856  |      |
| 630                  |                                          |       |       |       | 711   | 808   | 899  | 996  |      |

| C60a, C60H : courbe C<br>C60N : courbes B et C |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| cal. (A)                                       | 20 °C | 25 °C | 30 °C | 35 °C | 40 °C | 45 °C | 50 °C | 55 °C | 60 °C |  |
| 1                                              | 1,05  | 1,02  | 1,00  | 0,98  | 0,95  | 0,93  | 0,90  | 0,88  | 0,85  |  |
| 2                                              | 2,08  | 2,04  | 2,00  | 1,96  | 1,92  | 1,88  | 1,84  | 1,80  | 1,74  |  |
| 3                                              | 3,18  | 3,09  | 3,00  | 2,91  | 2,82  | 2,70  | 2,61  | 2,49  | 2,37  |  |
| 4                                              | 4,24  | 4,12  | 4,00  | 3,88  | 3,76  | 3,64  | 3,52  | 3,36  | 3,24  |  |
| 6                                              | 6,24  | 6,12  | 6,00  | 5,88  | 5,76  | 5,64  | 5,52  | 5,40  | 5,30  |  |
| 10                                             | 10,6  | 10,3  | 10,0  | 9,70  | 9,30  | 9,00  | 8,60  | 8,20  | 7,80  |  |
| 16                                             | 16,8  | 16,5  | 16,0  | 15,5  | 15,2  | 14,7  | 14,2  | 13,8  | 13,3  |  |
| 20                                             | 21,0  | 20,6  | 20,0  | 19,4  | 19,0  | 18,4  | 17,8  | 17,4  | 16,8  |  |
| 25                                             | 26,2  | 25,7  | 25,0  | 24,2  | 23,7  | 23,0  | 22,2  | 21,5  | 20,7  |  |
| 32                                             | 33,5  | 32,9  | 32,0  | 31,4  | 30,4  | 29,8  | 28,4  | 28,2  | 27,5  |  |
| 40                                             | 42,0  | 41,2  | 40,0  | 38,8  | 38,0  | 36,8  | 35,6  | 34,4  | 33,2  |  |
| 50                                             | 52,5  | 51,5  | 50,0  | 48,5  | 47,4  | 45,5  | 44,0  | 42,5  | 40,5  |  |
| 63                                             | 66,2  | 64,9  | 63,0  | 61,1  | 58,0  | 56,7  | 54,2  | 51,7  | 49,2  |  |

**Fig. 3 : Tables du choix de la section des conducteurs et du calibre des disjoncteurs.**

CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À  
ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

**Annexe D : Épaisseur d'isolation**

**Tab. 2 : Réduction des échanges thermiques pour une épaisseur de 19 mm.**

|                                             | <b>Conduite chaud</b> | <b>Conduite froid</b> |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Épaisseur isolant (mm)                      | 19                    | 19                    |
| Température fluide (°C)                     | 95                    | 8                     |
| Température ambiante (°C)                   | 29                    | 29                    |
| $R_1$ (m)                                   | 0,0125                | 0,016                 |
| $R_2$ (m)                                   | 0,01685               | 0,0212                |
| $R_3$ (m)                                   | 0,02635               | 0,0307                |
| $k_{con}$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) | 50                    | 0,22                  |
| $k_{iso}$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) | 0,035                 | 0,035                 |
| L (m)                                       | 28                    | 88                    |
| $h_{ext}$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) | 1279,9                | 13,8                  |
| $h_{int}$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) | 27386,5               | 1503,8                |
| Flux sans isolation (W)                     | 210120                | 5332                  |
| Flux avec isolation (W)                     | 906                   | 814                   |
| Reduction                                   | 99,6 %                | 84,7 %                |

## **Annexe E : Calcul du coefficient de convection interne**

La convection interne traduit l'échange de chaleur entre la paroi interne de la conduite et le fluide (l'eau dans notre cas) en mouvement. Le calcul du coefficient de convection suit 4 étapes importantes qui sont :

- ✚ Le calcul du nombre de Reynolds et de Prandtl ;
- ✚ Le choix de la corrélation adéquate ;
- ✚ Le calcul du nombre de Nusselt ;
- ✚ Et en fin le calcul du coefficient de convection.

### **E.1 Nombres de Reynolds et de Prandtl**

Les nombres de Reynolds (Re) et de Prandtl (Pr) sont des nombres adimensionnels qui permettent de caractériser l'écoulement des fluides et sont traduits respectivement par les équations e.1 et e.2. Le nombre de Reynolds est généralement utilisé pour apprécier le facteur laminaire ou turbulent de l'écoulement du fluide dans une conduite. Pour une conduite cylindrique, il est inférieur à 2100 pour un écoulement laminaire et supérieur à 10000 pour un écoulement turbulent.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad (e.1)$$

$$Pr = \frac{C_p \times \mu}{k} \quad (e.2)$$

Avec :

D (m) le diamètre de la conduite, v (m·s<sup>-1</sup>) la vitesse du fluide dans la conduite, k (W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) la conductivité de la conduite, C<sub>p</sub> (J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) la capacité calorifique du fluide, ρ (kg·m<sup>-3</sup>) la masse volumique du fluide et μ (kg·m<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>) la viscosité dynamique du fluide (équation e.3) s'obtient par l'équation fournie par Swamee (2004) [26].

$$\mu = \rho \times \eta = 1,792 \cdot \rho \times 10^{-6} \times \left[ 1 + \left( \frac{T^{\circ C}}{25} \right)^{1,165} \right]^{-1} \quad (e.3)$$

### **E.2 Choix de la corrélation**

Il existe plusieurs corrélations prenant en compte le type d'écoulement, la nature de l'écoulement et la géométrie de la conduite. Pour notre cas, du fait que l'écoulement du fluide s'effectue à l'intérieur d'une conduite cylindrique que son mouvement est dû à l'action d'une turbomachine, la corrélation adéquate est : convection interne forcée. Le régime dépendra de la valeur du nombre de Reynolds.

### **E.3 Calcul du nombre de Nusselt**

## CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

Le nombre de Nusselt (Nu) est un nombre adimensionnel qui dépend d'une part du nombre de Reynolds et de Prandtl et d'autre part de la corrélation de l'écoulement. Ainsi pour notre corrélation, la formule de Dittius-Boelter [27] (équation e.4) convient le mieux pour le calcul de Nu.

$$Nu = 0,023 \times Re^{5/4} \times Pr^n \quad (e.4)$$

Avec :

$$0,6 \leq Pr \leq 160 ; Re \geq 10000 ; \frac{L}{D} \geq 10$$

$$n = 0,3 \text{ si } T_{\text{fluide}} > T_{\text{paroi}} ; n = 0,4 \text{ si } T_{\text{fluide}} < T_{\text{paroi}}$$

### **E.4 Calcul du coefficient de convection**

Le coefficient de convection thermique est le paramètre qui caractérise ce type de transfert de chaleur. Sa détermination passe par la relation qui le lie au nombre de Nusselt (équation e.5).

$$h = \frac{Nu \times k}{D} \quad (e.5)$$

NB : les paramètres physiques de l'eau ont été obtenus à la température moyenne entre le fluide et la paroi grâce à ThermExcel [28].

**Tab. 3 : Résultat du calcul des coefficients de convection interne.**

| <b>Eau</b>                                   | <b>Conduite froide (T<sub>m</sub> = 18,5 °C)</b> | <b>Conduite chaude (T<sub>m</sub> = 62 °C)</b> |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| $\rho$ (kg·m <sup>-3</sup> )                 | 998,49                                           | 982,07                                         |
| $C_p$ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 4182                                             | 4186                                           |
| $\mu$ (kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 0,00105                                          | 0,00193                                        |
| $\nu$ (m·s <sup>-1</sup> )                   | 0,69                                             | 0,85                                           |
| $k$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )    | 0,22                                             | 50                                             |
| $D$ (m)                                      | 0,032                                            | 0,025                                          |
| Re                                           | 21021                                            | 10792                                          |
| Pr                                           | 20,0                                             | 0,2                                            |
| Nu                                           | 219                                              | 14                                             |
| $h$ (W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )    | 1503,8                                           | 27386,5                                        |

## Annexe F : Calcul du coefficient de convection externe

L'échange de chaleur entre l'air ambiant, considéré comme un gaz parfait, et la conduite se fait de façon naturelle et l'écoulement de cet air s'étend tout autour de la conduite. Il s'agit donc d'un écoulement naturel de l'air atmosphérique autour d'une paroi cylindrique. Churchill et Chu [29] proposent une formule simplifiée pour le calcul du nombre de Nusselt (équation f.1) et par conséquent le coefficient de convection extérieur (équation e.5).

$$Nu = \left[ 0,60 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad \text{avec } Ra = Gr \cdot Pr \leq 10^{12} \quad (f.1)$$

Pr le nombre de Prandtl (équation e.2) et Gr le nombre de Grashof (équation f.2).

$$Gr = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times \rho^2 \times D^3}{\mu^2} \quad (f.2)$$

Avec :

$\beta$  ( $K^{-1}$ ) est le coefficient de dilatation thermique du fluide et vaut  $1/T$ ,  $g$  ( $m \cdot s^{-2}$ ) est la force de pesanteur et  $\Delta T$  l'écart de température entre l'air ambiant et la conduite.

NB : les paramètres physiques de l'air ont été obtenus à la température moyenne entre le fluide et la paroi grâce à Engineers Edge [30].

**Tab. 4 : Résultat du calcul des coefficients de convection externe.**

| Air                                      | Conduite froide ( $T_m = 18,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) | Conduite chaude ( $T_m = 62 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $\rho$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )             | 1,204                                                    | 1,059                                                  |
| $C_p$ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ) | 1007                                                     | 1007                                                   |
| $\mu$ ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ) | 0,00105                                                  | 0,00193                                                |
| $\Delta T$                               | 21                                                       | 66                                                     |
| $k$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )    | 0,22                                                     | 50                                                     |
| $D$ (m)                                  | 0,032                                                    | 0,025                                                  |
| $\beta$ ( $K^{-1}$ )                     | 0,0033                                                   | 0,0033                                                 |
| Pr                                       | 4,8                                                      | 0,04                                                   |
| Gr                                       | 29                                                       | 10                                                     |
| $Ra = Pr \cdot Gr$                       | 141                                                      | 0,39                                                   |
| Nu                                       | 2                                                        | 1                                                      |
| $h$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )    | 13,8                                                     | 1279,9                                                 |

CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À  
ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

**Annexe G : Renforcement de la toiture**

**Tab. 5 : Résultat de l'étude menée par le Laboratoire Génie Civil de l'Institut 2iE.**

|                                            | Solutions envisageables |                                 |
|--------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Désignation                                | Doubler les pannes      | Structure portante indépendante |
| Quantité d'acier IPE 80                    | 60 ml                   | 24 ml                           |
| Quantité d'acier IPE 100                   | 0 ml                    | 68 ml                           |
| Quantité d'acier IPE 120                   | 0 ml                    | 9,6 ml                          |
| Nécessité de dépose et/ou repose d'ouvrage | Oui                     | Non                             |
| Difficulté d'exécution                     | +                       | +++                             |
| Coût du matériel                           | 320 000 F CFA           | 1 020 000 F CFA                 |
| Coût prévisionnel de la main-d'œuvre       | +                       | ++                              |
| Délais d'exécution                         | 2 semaines              | 4 semaines                      |
| Complexité                                 | +                       | +++                             |
| Surcharge de la charpente en place         | ++                      | +++                             |

+ faible

++ moyen

+++ modéré

++++ élevé

IPE : profilé en I

# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

## Annexe H : Détails sur les circulateurs

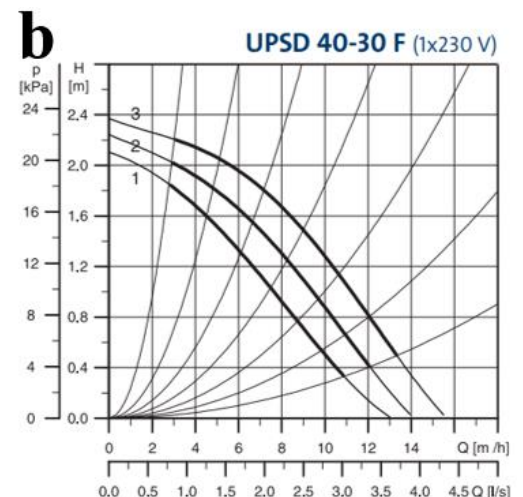
**Tab. 6 : Résultat du dimensionnement des circulateurs.**

|                                          | Eau glacée | Eau de refroidissement |
|------------------------------------------|------------|------------------------|
| Température du fluide (°C)               | 8          | 29                     |
| Nature conduite                          | PPR        | PPR                    |
| Rugosité absolue : $\varepsilon$ (m)     | 0,0000015  | 0,0000015              |
| Longueur (m)                             | 48         | 15                     |
| Coude                                    | 18         | 8                      |
| Té                                       | 4          | 2                      |
| Vanne                                    | 2          | 2                      |
| Coefficient de singularité               | 6,07       | 3,03                   |
| $Q$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )               | 2          | 5,9                    |
| Vitesse théorique ( $m \cdot s^{-1}$ )   | 1,5        | 1,5                    |
| Diamètre (m)                             | 0,022      | 0,037                  |
| DN (m)                                   | 0,032      | 0,04                   |
| $V$ ( $m \cdot s^{-1}$ )                 | 0,691      | 1,304                  |
| $\mu$ ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ) | 0,001365   | 0,000890               |
| $\rho$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )             | 999,8      | 997,0                  |
| Re                                       | 16190      | 58456                  |
| Régime                                   | Turbulent  | Turbulent              |
| $f$                                      | 0,0274     | 0,0203                 |
| $\Delta P_l$ (m)                         | 1,45       | 0,71                   |
| $\Delta P_s$ (m)                         | 0,15       | 0,26                   |
| HMT (m)                                  | 1,60       | 0,97                   |

a

| €           |         |         |      | Q = débit en m <sup>3</sup> /h |     |      |      |     |      |     |     |     |      |
|-------------|---------|---------|------|--------------------------------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|-----|------|
| Désignation | Code    | Prix HT | kW   |                                |     |      |      |     |      |     |     |     |      |
| PKm 60      | A1A0010 |         | 0.37 | H                              | 0   | 0.6  | 0.9  | 1.2 | 1.5  | 1.8 | 2.1 | 2.4 | 3.0  |
| PK 60       | A1A0020 |         |      |                                | 40  | 33.5 | 29   | 24  | 19.5 | 15  | 10  | 5   | Vers |
| PKm 65      | A1A0030 |         | 0.50 | M                              | 55  | 45.5 | 40.5 | 36  | 31   | 27  | 22  | 17  | 8    |
| PK 65       | A1A0040 |         |      |                                | 65  | 57   | 52   | 47  | 42   | 37  | 32  | 27  | 18   |
| PKm 70      | A1A0050 |         | 0.60 | T                              | 70  | 61   | 56   | 51  | 46   | 41  | 36  | 31  | 22   |
| PK 70       | A1A0060 |         |      |                                | 90  | 71   | 60   | 49  | 38   | 27  | 17  | 5   |      |
| PKm 80      | A1A0070 |         | 0.75 |                                | 85  | 75   | 70   | 65  | 60   | 55  | 50  | 45  | 35   |
| PK 80       | A1A0080 |         |      |                                | 90  | 81   | 76   | 71  | 65.5 | 60  | 55  | 50  | 40   |
| PKm 90      | A1A0090 |         | 0.75 |                                | 100 | 90   | 85   | 80  | 75   | 70  | 65  | 60  | 50   |
| PK 90       | A1A0100 |         |      |                                |     |      |      |     |      |     |     |     |      |
| PKm 100     | A1A0110 |         | 1.10 |                                |     |      |      |     |      |     |     |     |      |
| PK 100      | A1A0120 |         |      |                                |     |      |      |     |      |     |     |     |      |
| PKm 200     | A1A0130 |         | 1.50 |                                |     |      |      |     |      |     |     |     |      |
| PK 200      | A1A0140 |         |      |                                |     |      |      |     |      |     |     |     |      |
| PK 300      | A1A0150 |         | 2.20 |                                |     |      |      |     |      |     |     |     |      |

m = monophasé      H M T = Hauteur manométrique totale en m (10 m CE)



# CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE INSTALLATION DE MACHINE À ADSORPTION SOLAIRE À OUAGADOUGOU

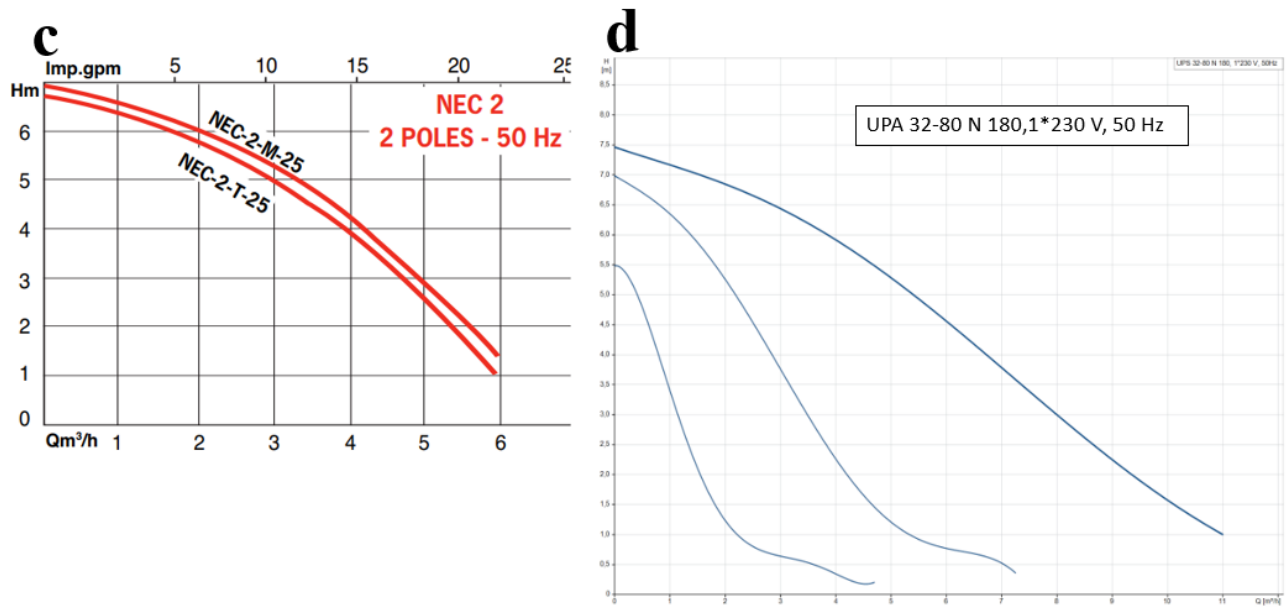


Fig. 4 : (a) Pompe Pedrollo PKm60 ; (b) Circulateur Grundfos UPSD 40-30F ; (c) Pompe Salmson NEC-2-M-25 ; (d) Pompe Grundfos UPA 32-80N .