



**PRÉ-TEST, INSTALLATION ET MISE EN PLACE DE  
COMPOSANTS DE LA CENTRALE SOLAIRE À  
CONCENTRATION PILOTE CSP4AFRICA**

**MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE, ENERGETIQUE ET ENERGIE  
RENOUVELABLE**

**OPTION : GENIE ENERGETIQUE**

---

Présenté et soutenu publiquement le 26 Octobre 2015 par

**BAKHIR Amine Oumar**

**Travaux dirigés par :**

**Dr. Ing. K. Edem N'TSOUKPOE**

Enseignant chercheur

**Ing. Madieumbe GAYE**

Ingénieur de recherche

LABORATOIRE D'ENERGIE SOLAIRE ET ECONOMIES D'ENERGIE (LESEE),  
2iE, Ouagadougou, Burkina Faso

Jury d'évaluation du stage :

Président : Ing. Henri KOTTIN

Membres et correcteurs : Dr. Daniel YAMEGUEU  
Ing. Madieumbe GAYE

**Promotion [2014/2015]**

## **DÉDICACES**

*À Mon père Amine Oumar Paix à son âme*

*À Ma mère Zenab Maouloud et mes frères et sœurs*

*Que le tout puissant leurs accorde une longue vie.*

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier :

Dr. K. Edem N'TSOUKPOE et Ing. Madieumbe GAYE, mes directeurs de mémoire, pour avoir accepté ce rôle. Leurs disponibilités, conseils et observations ont été des éléments importants pour la réalisation de ce mémoire.

Dr Daniel YAMEGEU, responsable de Laboratoire Énergie Solaire et Économies d'Énergie (LESEE) pour m'avoir accepté au sein de son laboratoire et pour ses différents conseils et encouragements.

Ing. Moussa Kadri SANI, vos multiples aides et orientations ont été des éléments clés pour le déroulement de stage et la réalisation de ce document.

Le corps professoral du 2iE, pour nous avoir donné les enseignements nécessaires durant notre cursus.

L'équipe des enseignants, doctorants et ingénieurs chercheurs du LESEE pour leur collaboration et franchise.

Mes camarades de classe, ces deux années passées ensemble étés un moment inoubliable et promoteur pour ma vie professionnelle.

Ma famille et mes amis vos multiples aides et conseils ont été des éléments clés pour ma réussite.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribuées de loin ou de près pour l'accomplissement de ce cycle.

## **RÉSUMÉ**

---

La centrale solaire à tour est l'une des technologies valorisant les rayons solaires directs reçus sous forme de chaleur pour la production de l'énergie électrique. Cette technologie est installée dans le monde à l'ordre de centaines de mégawatts, pas adaptées au monde rural africain où les besoins se chiffrent à quelques centaines voire quelques dizaines de kilowatts. Le LESEE a conçu et développe un pilote de CSP à tour d'une puissance thermique de 100 kW<sub>th</sub>, rentable, modulaire et adapté aux mini-réseaux appelé CSP4Africa. Afin de tester la boucle thermodynamique, une plateforme d'essai est en cours de montage au laboratoire. L'objectif est donc de monter le banc de test et de caractériser l'ORC de la plateforme, puis participer à l'installation des équipements de la centrale.

En effet, l'installation du banc de test a été effectuée après avoir réglé des problèmes liés à l'étanchéité de l'ORC. Cependant, la caractérisation de l'ORC n'a pas eu lieu à cause des fuites d'eau constatées au niveau de la boucle chaude du banc.

S'agissant d'équipements de la centrale, des schémas d'implantation et de connexion ont été proposés. Ensuite, des circulateurs d'huile pour la boucle thermique ont été dimensionnés.

### **Mots Clés :**

---

**1 – Centrale solaire à tour**

**2 – CSP4Africa**

**3 – ORC**

**4 – Banc de test**

**5 – Boucle thermique**

## **ABSTRACT**

---

The solar-tower power plant is one of the technologies valuing the direct sunlight received as heat to produce electricity. This technology is installed worldwide in the order of hundreds of megawatts, not adapted to rural Africa where the needs amount to a few hundred or even a few tens of kilowatts. LESEE has designed and developed a CSP tower pilot with a thermal capacity of 100 kW, cost effective, modular and suitable for mini-networks called CSP4Africa. In order to test the thermodynamic loop, a test platform in laboratory is currently in assembly. The aim is to mount the test bench and characterize the ORC of the platform and participate in the installation of power plant equipment.

In fact, the installation of the test bench was carried out after fixing ORC sealing issues. However, the characterization of the ORC has not occurred because of water leakages in the hot water loop of the bench.

In the case of plant equipment, a layout and connection diagrams were proposed. Then, oil circulation pumps for the hot water loop were sized.

### **Key words :**

---

**1 - Solar-tower power plant**

**2 - CSP4Africa**

**3 - ORC**

**4 - Test bench**

**5 – Thermal Loop**

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

**2iE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

**LESEE** : Laboratoire d'Énergie Solaire et Économies d'Énergie

**ORC** : Organic Rankine Cycle

**IT10** : ORC Infinity Turbine IT10

**CSP** : Concentred Solar Power

**kW<sub>th</sub>** : kilowatt thermique<sup>2</sup>

**kW<sub>el</sub>** : kilowatt électrique

### Nomenclatures :

***J*** : Pertes de charges linéaires

***K*** : Pertes de charges singulières

***ε*** : Rugosité de la conduite

***Q*** : Débit du fluide

***g*** : Accélération de la pesanteur

***R*** : Nombre de Reynolds

***D*** : Diamètre nominale

***k*** : Coefficient des singularités

***f*** : Facteur des pertes de charges linéaires

## SOMMAIRE

<b>Résumé.....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>IV</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>I.1 Objectifs de l'étude.....</b>	<b>7</b>
<b>I.2 Présentation du LESEE.....</b>	<b>7</b>
<b>I.3 État de l'art sur le cycle organique de Rankine.....</b>	<b>8</b>
I.3.1 Définition.....	8
I.3.2 Performance.....	10
I.3.3 Avantages et inconvénients.....	11
<b>II. La centrale solaire à concentration CSP4Africa.....</b>	<b>13</b>
<b>II.1 Présentation de la centrale.....</b>	<b>13</b>
<b>II.2 Implantation et connexions des équipements.....</b>	<b>14</b>
<b>II.3 Le champ solaire.....</b>	<b>15</b>
<b>II.4 La boucle thermique.....</b>	<b>17</b>
II.4.1 Les pompes de circulation du fluide caloporteur.....	18
<b>III. La plateforme de tests des composants de CSP4Africa.....</b>	<b>22</b>
<b>III.1 Présentation de la plateforme.....</b>	<b>22</b>
<b>III.2 Le banc de test.....</b>	<b>22</b>
III.2.1 Description du banc d'essai.....	22
III.2.2 Installation du banc de test.....	29
III.2.3 Démarrage du banc de test.....	31
<b>III.3 Le prototype d'héliostats.....</b>	<b>31</b>
III.3.1 Diagnostic des problèmes du mécanisme.....	31
III.3.2 Solutions et modifications apportées au prototype.....	33
<b>IV. Conclusion.....</b>	<b>35</b>
<b>V. Recommandations - Perspectives.....</b>	<b>36</b>

<b>VI. Bibliographie .....</b>	<b>37</b>
<b>VII. Annexes.....</b>	<b>38</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Exemple des motorisations d'héliostats [8]. .....	16
Tableau 2 : Propriétés des conduites. ....	19
Tableau 3 : Propriétés des fluides[11]. ....	20
Tableau 4 : Pertes de charges des circuits ainsi que les puissances hydrauliques utiles. ....	20
Tableau 5 : Caractéristiques des pompes minimales à choisir. ....	21
Tableau 6 : Caractéristiques de la Chaudière. ....	41
Tableau 7 : Pertes de charge dues aux tuyauteries. ....	47

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Le fonctionnement du cycle organique de Rankine sur un diagramme PV. ....	9
Figure 2 : Le principe de fonctionnement d'un cycle organique de Rankine. ....	10
Figure 3 : Vue d'ensemble de la centrale CSP4Africa[7]. ....	13
Figure 4 : Vue en plan de l'implantation des équipements de la centrale CSPP4Africa. ....	14
Figure 5 : Réflexion des rayons solaires vers un récepteur à travers un héliostat.....	15
Figure 6 : Système de suivi solaire du pilote CSP4Africa. ....	17
Figure 7 : Connexion des équipements du cycle thermique.....	18
Figure 8 : Configuration des différents équipements du banc de test. ....	23
Figure 9 : Vue de l'ORC Infinity Turbine IT10. ....	23
Figure 10 : Quelques endroits des fuites trouvées.....	25
Figure 11 : Quelques pièces raccordées en utilisant du téflon. ....	26
Figure 12 : Chaudière GARIONI NAVAL de la plateforme. ....	27
Figure 13 : Image relative la tour de refroidissement de la plateforme. ....	28
Figure 14 : schéma synoptique du système d'acquisition des données.....	29
Figure 15 : Vue de l'affichage des données [12] .....	29
Figure 16 : Image prise lors de l'installation du banc de test.....	30
Figure 17 : Schéma du banc de test après installation.....	30
Figure 18 : Déformation des tubes supports du chariot .....	31
Figure 19 : Espace inutile entre la pièce mobile et le chariot, la pièce en forme de H ainsi l'effet de la poussière en contact avec la graisse. ....	32
Figure 20 : Perspective du système de suivi solaire des héliostats de la CSP4Africa [7]. ....	33
Figure 21 : a) Système de blocage de la tige filetée avec le palier à travers un circlips. ....	34
Figure 22 : Image relative au soufflet de fourche [13]. ....	34
Figure 23 : Connexion de l'ORC avec une pompe à vide[14]. ....	40

## **I. INTRODUCTION**

---

La demande énergétique mondiale croît sans cesse suivant l'évolution démographique et le développement économique mondial, tandis que les réserves d'énergie fossiles ont atteint leur seuil d'exploitation et tendent à décroître. L'Afrique, qui occupe le rang de plus faible taux de couverture en énergie électrique, 27% dans la sous-région [1], est le continent qui nécessite un développement beaucoup plus accéléré dans ce domaine. Afin de diminuer la consommation des combustibles fossiles, les pollutions atmosphériques et bien sûr les émissions de gaz à effet de serre, des nouvelles technologies de conversion d'énergie basées sur des sources renouvelables sont nécessaires. L'une de ces ressources, l'énergie solaire présente depuis des milliards d'années est disponible partout avec une irradiation variant en fonction des localités (très importante dans les régions d'Afrique sub-saharienne, le Moyen Orient...), et qui peut être utilisé dans divers domaines (chauffages, cuisson des aliments, alimentation électrique des sites isolés, pompage solaire, etc.) mais reste très peu exploitée.

Compte tenu du faible taux de couverture en énergie électrique dans la sous-région ouest-africaine notamment dans les zones rurales et périurbaines et l'abondance de l'énergie solaire dans la sous-région, 2iE à travers le LESEE, et ses partenaires mènent depuis mars 2012 un projet visant à promouvoir les technologies solaires à concentration. Il s'agit d'accompagner les objectifs ambitieux d'accès à l'énergie de la sous-région visant à porter le taux moyen d'électrification rurale à 60% en 2015 [1]. Ainsi, il développe un pilote de centrale solaire à concentration rentable et modulaire adapté aux mini réseaux dans le cadre d'un projet appelé CSP4Africa. Pour un système visant à valoriser les richesses de la sous-région et la réduction du coût d'investissement, des matériaux locaux et à coût soutenable sont recommandés pour l'installation et le test de ce pilote.

Le solaire thermique à concentration est l'une des technologies valorisant le rayonnement solaire direct. Ces rayons concentrés, permettent d'atteindre des températures élevées. Cette chaleur est transmise à un fluide caloporteur qui sera ensuite stocker pour des utilisations diverses, et formant ainsi une boucle thermique. On distingue plusieurs types de centrales solaires à concentration : la centrale à Tour solaire, la centrale à concentrateurs paraboliques, la centrale à concentrateurs linéaires de Fresnel, et la centrale à concentrateurs cylindro-paraboliques.

La technologie mise en place au LESEE est celle à Tour. Cette technologie est constituée essentiellement des concentrateurs appelés héliostats, et d'une tour sur laquelle une chaudière appelée récepteur est installée. Les rayons solaires reçus par les héliostats sont réfléchis vers le récepteur pour chauffer un fluide caloporteur. Ce dernier est stocké dans un ballon puis utilisé pour chauffer un fluide de travail. Ce fluide se vaporise et fait tourner un turbo-alternateur pour produire de l'énergie électrique.

Les héliostats présentent la charge la plus importante en termes de coût d'investissement, car il faut un système motorisation efficace permettant aux héliostats de suivre la course du soleil. Un système de motorisation commune développé au LESEE est par conséquent mis en place. Ce système comporte 20 héliostats de 9 réflecteurs chacun. Chaque réflecteur a une surface utile de 1 m<sup>2</sup> chacun.

La boucle thermodynamique de la centrale sera assurée par un module ORC, complétant ainsi les composants de la centrale.

Pour effectuer les tests d'expérimentation, une plateforme d'essai et de caractérisation des composants du pilote est mise en place. Sur cette plateforme, un module ORC d'environ 10 kW<sub>el</sub>, utilisant le Genetron (R245fa) comme fluide de travail a été acheté par le LESEE. Ce module sera connecté à une chaudière à eau chaude de 120 kW<sub>th</sub>, une tour humide de refroidissement et un système d'acquisition des données.

Sur la plateforme de tests des composants, on peut identifier un certain nombre de dysfonctionnements :

- Problème d'étanchéité sur le réseau thermodynamique de l'ORC ;
- Le prototype de l'héliostat présente des problèmes mécaniques qui l'empêchent de suivre le mouvement du soleil afin de capter et de projeter les rayons vers la cible de façon continue.

## **I.1 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE**

La présente étude vise deux objectifs essentiels :

- Installer le banc de test, tester et caractériser le module ORC de 10 kW<sub>el</sub> du laboratoire au niveau de la plateforme d'essai de Kamboinsé ; puis proposer des solutions aux dysfonctionnements notés sur le prototype de l'héliostat ;
- Participer à la mise en place de composants du pilote de la centrale solaire à concentration CSP4Africa.

Sur ce dernier, il est question de présenter des schémas d'implantation et de connexions des composants de la centrale, puis déterminer les caractéristiques des pompes nécessaires pour la circulation des fluides de la boucle thermique.

## **I.2 PRÉSENTATION DU LESEE**

Le Laboratoire Énergie Solaire et Économies d'Énergie (LESEE) est l'un des cinq laboratoires de 2iE. Le LESEE a pour objectif de contribuer à l'innovation industrielle dans le solaire pour la production et l'utilisation rationnelle et durable d'énergies en Afrique. Le LESEE est actuellement dirigé par Dr. Daniel YAMEGUEU. Son équipe est composée d'enseignants Chercheurs permanents, d'ingénieurs de recherche, des professeurs associés, et des doctorants.

Le LESEE mène ses activités à travers deux axes de recherche :

1. Conversion de l'énergie solaire dans les zones chaudes.

Cet axe se décompose en trois points de recherche :

- Centrales solaires à concentration (CSP) pour mini réseaux,
- Systèmes solaires photovoltaïques en milieu hostiles,
- Habitats solaires.

2. Gestion optimale de l'énergie durable : production, transport, distribution

Cet axe se décompose en deux parties de recherche :

- L'interaction sources/réseaux intelligents/utilisateurs ;
- L'hybridation des systèmes énergétiques.

### **I.3 ÉTAT DE L'ART SUR LE CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE**

La thermodynamique cherche depuis plus de 2 siècles des solutions pour transformer de manière la plus efficace possible l'énergie thermique (« la chaleur ») en énergie mécanique (puis dans certains cas, en fonction des besoins, en électricité). Cette transformation est réalisée grâce à des cycles thermodynamiques [2].

Un cycle thermodynamique est une suite de transformations successives du fluide par un système thermodynamique qui, partant d'un état donné, après plusieurs changements d'état, le ramène finalement à son état initial, de manière à pouvoir recommencer le cycle. Au cours de la transformation, les paramètres d'état (température, pression, enthalpie, etc.) du système varient suivant l'étape du cycle. Il échange donc du travail et de la chaleur avec d'autres systèmes.

Les cycles thermodynamiques interviennent dans la plupart de nos applications (transport, chauffage, refroidissement, production d'électricité, etc.). On distingue plusieurs types de cycles qui sont utilisés dans des domaines précis, entre autres :

- Le cycle de Rankine est utilisé dans la plupart des centrales à vapeur y compris les centrales nucléaires ;
- Le cycle organique de Rankine, utilisé dans des petits et moyens niveaux des températures notamment les sources renouvelables et les rejets thermiques ;
- Le cycle de Beau de Rochas/Otto utilisé dans les moteurs à quatre temps ;
- Le cycle de Brayton utilisé dans les turbines à gaz et les réacteurs d'avion et de fusée ;
- Le cycle de Stirling utilisé dans les moteurs Stirling.

#### **I.3.1 DÉFINITION**

Le Cycle Organique de Rankine ou Organic Rankine Cycle (ORC) en anglais est un cycle thermodynamique qui se distingue du cycle de Rankine classique par l'évolution d'un fluide organique de haute masse molaire à la place de l'eau dans le circuit thermodynamique. Ce cycle est appliqué dans des petites et moyennes gammes de puissances. Son principe de fonctionnement est presque identique à celui du cycle de Rankine classique. Néanmoins, à la différence du cycle de Rankine classique, il n'existe pas un séparateur liquide-vapeur dans une machine à ORC mais généralement un seul échangeur de chaleur utilisé pour toutes les phases du transfert thermique (préchauffe, vaporisation et, en cas de nécessité, la surchauffe).

Le cycle organique de Rankine ne fait pas l'objet de resurchauffe et de système de purge respectivement à l'entrée et à la sortie de la turbine ; par contre un régénérateur pour un transfert interne de chaleur au sein du cycle peut être envisagé. Le couplage du cycle avec la source chaude peut être direct ou via un fluide caloporteur dans une boucle de transfert intermédiaire. La représentation du cycle organique de Rankine sur un diagramme PV est donnée par la Figure 1, tandis que son principe de fonctionnement est donné par la Figure 2. L'énergie utile délivrée par ce cycle peut être mécanique ou électrique ou encore électrique et thermique dans le cas d'une cogénération [3]. Ce cycle est utilisé dans des applications à moyennes et basses températures jusqu'à une température minimale de 70 °C. Ces températures sont généralement obtenues à base des ressources renouvelables (biomasse, CSP, géothermie) et une partie des rejets des centrales thermiques dans le cas d'une cogénération.

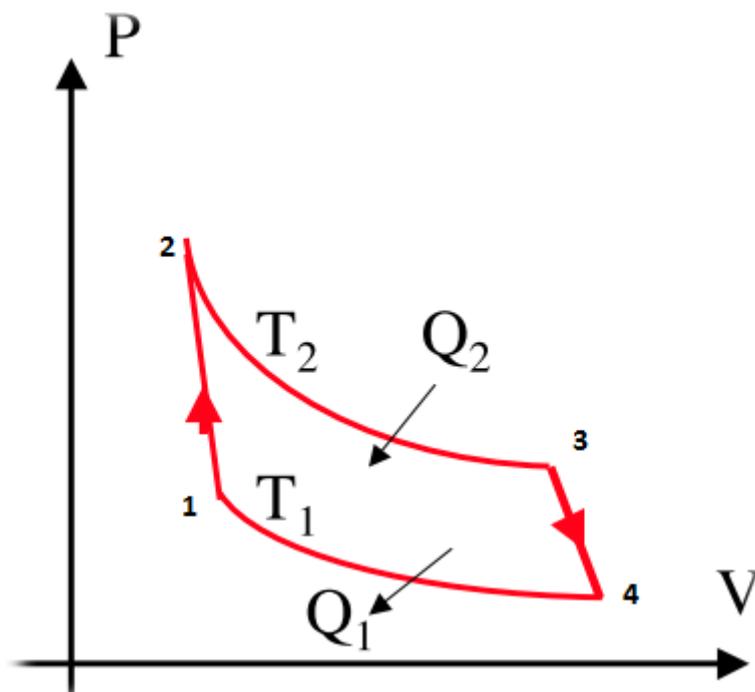


Figure 1 : Représentation du cycle organique de Rankine sur un diagramme PV.

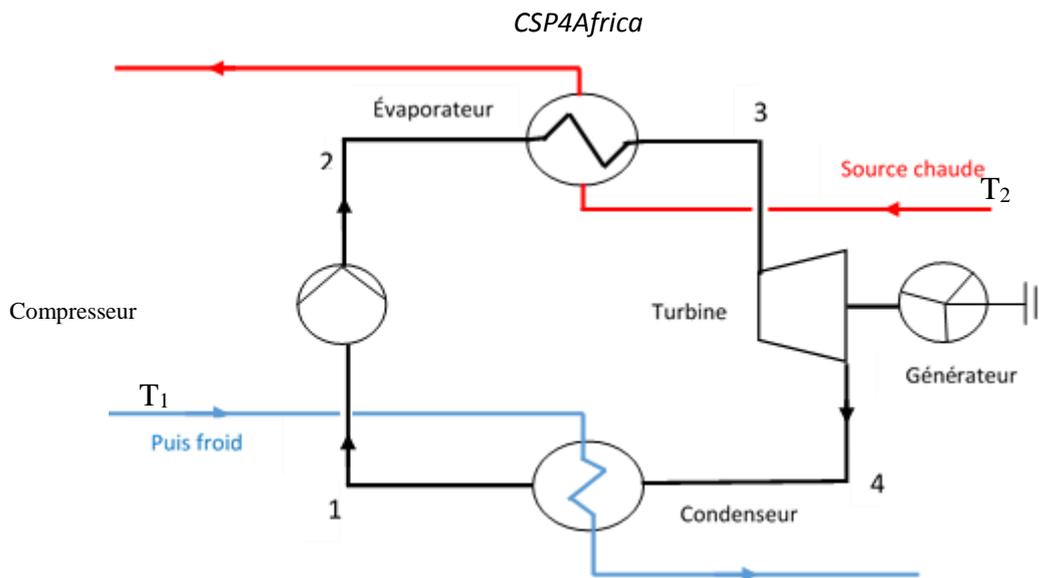


Figure 2 : Le principe de fonctionnement d'un cycle organique de Rankine.

La description des différentes phases du cycle de Rankine est donnée par :

- 1 – 2 : Le fluide de travail est comprimé depuis le réservoir vers l'évaporateur via un compresseur. Il subit une compression adiabatique, pas d'échange de chaleur ;
- 2 – 3 : L'évaporateur est connecté à la source chaude avec une température  $T_2$ . Le fluide subit une transformation isotherme en absorbant une quantité de chaleur de la source chaude. Par conséquent, il se vaporise vers la turbine ;
- 3 – 4 : La vapeur venue de l'évaporateur avec une pression élevée, échange du travail avec la turbine. Cet échange fait chuter la pression et la température du fluide. Il subit donc une détente adiabatique ;
- 4 – 1 : Le condenseur de la machine est connecté à la source froide ( $T_1$ ). Le fluide cède sa chaleur à la source froide et se liquéfie, subissant ainsi une condensation.

Aujourd'hui, il existe plus de 350 sites ORC à travers le monde pour une puissance installée supérieure à 1,5 GW [2]. À ceux-ci, il convient de rajouter 50 références en cours d'installation. Le nombre de références et la puissance installée est en augmentation continue depuis plus de 20 ans. On observe même une accélération du nombre de projets depuis le début des années 2000 [2].

### I.3.2 PERFORMANCE

La performance de l'ORC est mesurée en fonction de la puissance à installer. Il présente donc un rendement de 10 à 20 % pour des puissances inférieures à 20 MW [4] donné par l'équation (1), beaucoup plus faible que le cycle de Rankine classique à vapeur d'eau. Ce faible

rendement est principalement lié à la faible différence de température entre la source chaude et la source froide dans les applications considérées. Plusieurs recherches se focalisent donc aujourd'hui sur l'amélioration de la performance du cycle ORC.

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (1)$$

Avec  $Q$  et  $W$  respectivement la chaleur reçue de la source chaude par l'ORC et le travail utile que l'ORC fournit. L'expression de l'efficacité du cycle idéal de Carnot, elle, est donnée par l'équation (2).

$$eff = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (2)$$

Où  $T_1$  et  $T_2$  sont respectivement la température de la source froide et celle de la source chaude.

### I.3.3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Nous comparons dans ce cas l'ORC avec le cycle à vapeur d'eau (cycle de Rankine classique).

Les applications thermodynamiques utilisent, depuis le 18<sup>ème</sup> siècle, l'eau comme fluide pour le cycle thermodynamique. Elle est gratuite, sans risque pour l'homme et l'environnement, sauf qu'elle ne dispose pas que d'avantages mais aussi d'inconvénients que nous retiendrons :

- La nécessité de posséder une source chaude à une température élevée, supérieure à 400 °C, pour obtenir une efficacité de cycle économiquement rentable [4] ;
- Un fonctionnement à des pressions supérieures à 40 bars qui oblige à une surveillance permanente ;
- La nécessité de mettre en place des auxiliaires coûteux comme des systèmes de déminéralisation. Ces coûts fixes empêchent les installations de petites tailles ;
- La difficulté de trouver des constructeurs fiables pour des petites puissances ;
- L'usure de la turbine à cause de la présence d'eau en fin de détente.

Les technologies ORC apportent des solutions à ces problèmes. Elles permettent de produire de l'électricité à partir d'une source de chaleur à basse température (jusqu'à 70 °C). En fonction de la température de la source chaude, il est également possible de faire un système de cogénération. Ces modules permettent une production décentralisée grâce à leur puissance relativement faible qui correspond parfaitement aux besoins actuels des réseaux électriques et possédant une durée de vie supérieure à 20 ans [2,5]. L'exploitation et la maintenance sont légères. L'eau est un fluide dit « mouillant ». Lorsque l'on détend la vapeur d'eau dans la turbine,

des gouttelettes d'eau peuvent apparaître et endommager les ailettes. Par contre, les fluides organiques utilisés dans les cycles organiques de Rankine sont des fluides dits « séchant », c'est-à-dire que la détente dans la turbine se fait en permanence à l'état vapeur [6].

Ce cycle présente quelques inconvénients que nous pouvons résumer en quelques points :

- Cette technologie est adaptée pour la plupart à des applications de puissances, inférieures à 2 MW ;
- Les coûts d'investissement élevés en partie dus à l'utilisation de technologies spécifiques pour de petites séries [5].

## II. LA CENTRALE SOLAIRE À CONCENTRATION CSP4AFRICA

### II.1 PRÉSENTATION DE LA CENTRALE

CSP4Africa est un pilote de centrale solaire à tour. Elle a une puissance de  $100 \text{ kW}_{\text{th}}$  et une puissance électrique de  $8,6 \text{ kW}_{\text{el}}$ , modulaire, adaptée aux mini-réseaux pour les zones rurales et périurbaines. La plupart de ses composants sont construits à base des matériaux locaux pour valoriser la richesse de la sous-région, de faciliter la maintenance et surtout de la rendre économiquement rentable. Le principe de fonctionnement de la centrale est donné par la Figure 3.

La centrale CSP4Africa regroupe quatre blocs : le champ solaire, l'ORC, la boucle thermique, et la supervision. Notre étude est axée sur l'implantation et la connexion des équipements de la centrale, la partie mécanique des héliostats et aussi la boucle thermique notamment les calculs de pertes de charges et le choix de ses équipements.

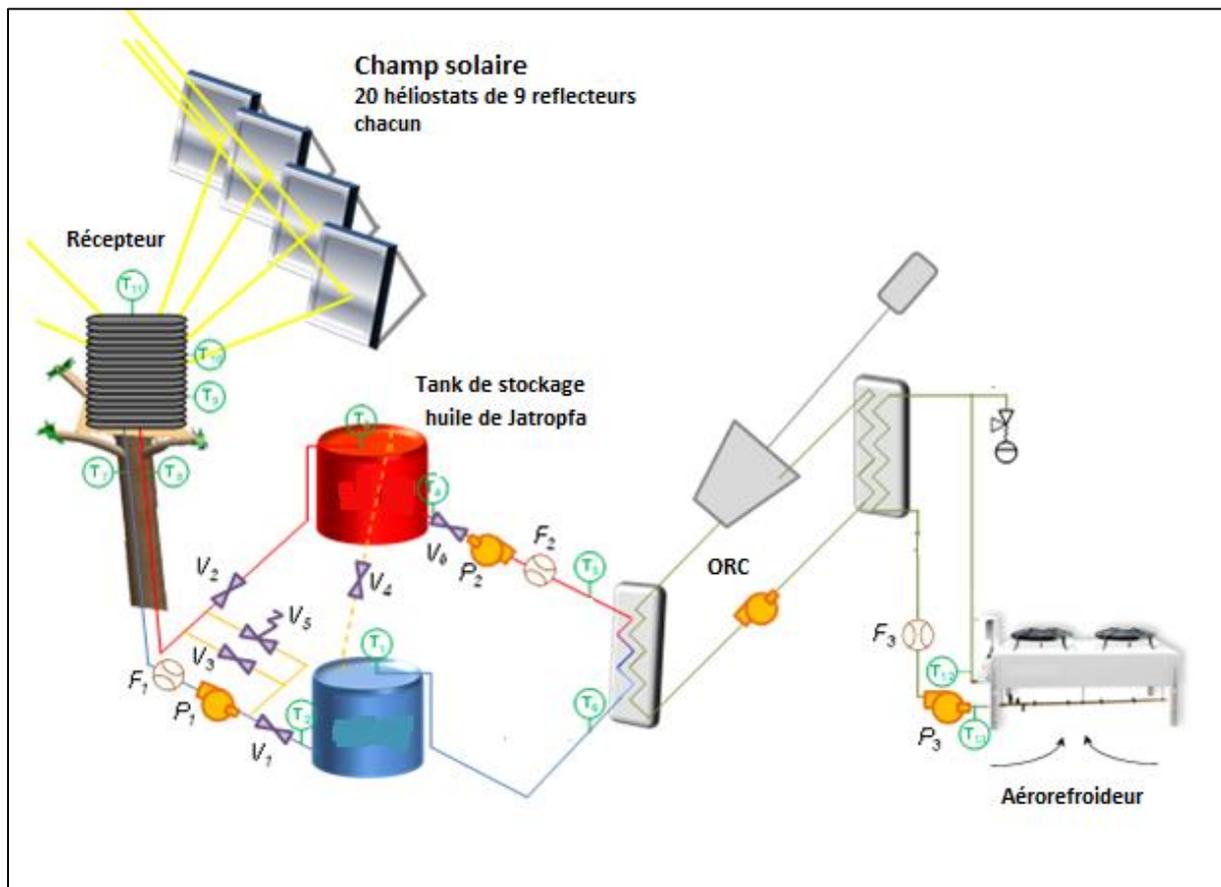


Figure 3 : Vue d'ensemble de la centrale CSP4Africa[7].

## II.2 IMPLANTATION ET CONNEXIONS DES ÉQUIPEMENTS

La centrale solaire à concentration CSP4Africa sera placée sur le site K2 à Kamboinsé. Elle occupe une surface totale de 2507 m<sup>2</sup> sur laquelle les héliostats seront installés au centre sur une surface de 25 m x 25 m. Le premier héliostat est placé à 5 m de la tour. Quant à la tour, elle a une hauteur de 15 m, et sera placée vers le Sud. Le local de supervision sera implanté derrière le champ solaire pour une vue globale de la centrale. Le local technique sera placé à l'Est de la tour. Les ballons de stockages, l'ORC, les pompes de circulation, le débitmètre et les équipements de mesure et de contrôle seront implantés dans le local technique. La vue d'ensemble de la centrale est donnée par la Figure 4.

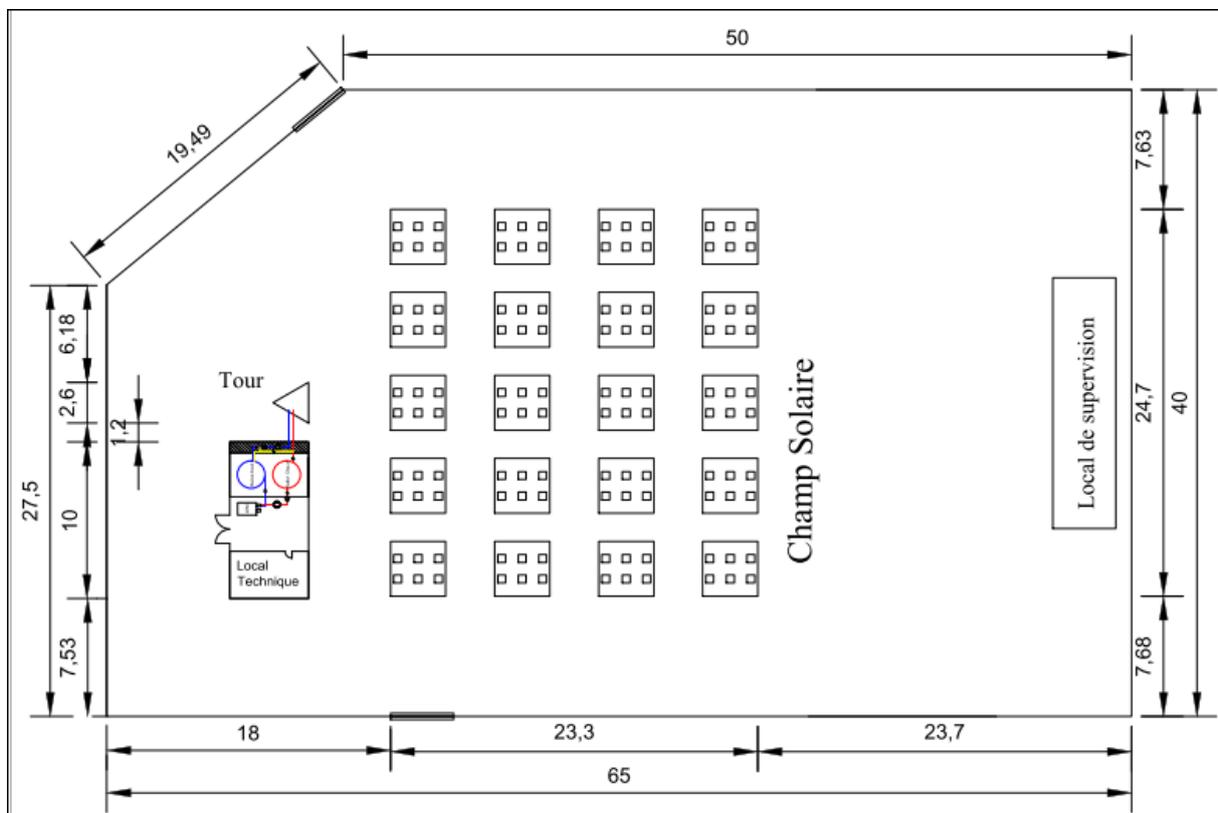


Figure 4 : Vue en plan de l'implantation des équipements de la centrale CSPP4Africa.

### II.3 LE CHAMP SOLAIRE

Le champ de concentrateurs solaires est un champ constitué de plusieurs capteurs solaires appelés « héliostats », qui ont pour but de concentrer les rayonnements reçus du soleil vers un foyer fixe situé au sommet d'une tour appelée « récepteur » afin de chauffer un fluide caloporteur qui permet en général la production d'énergie électrique. La Figure 5 nous montre la manière dont les rayons solaires sont reçus par les héliostats et réfléchis vers le point fixe ou le récepteur.

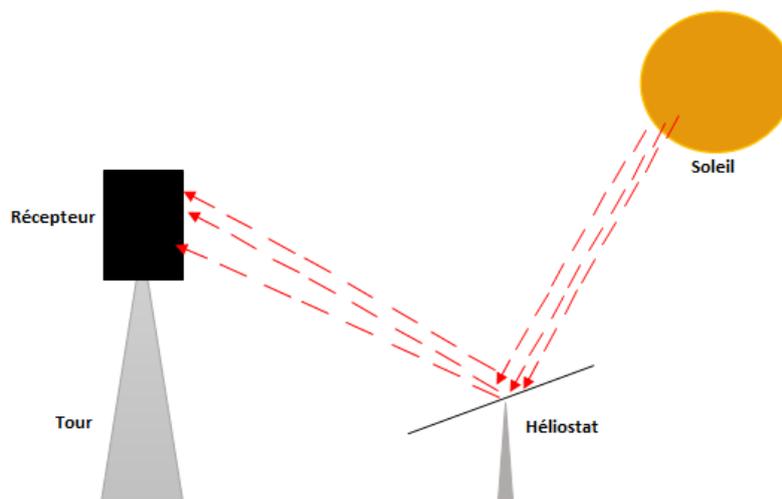
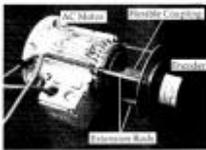


Figure 5 : Réflexion des rayons solaires vers un récepteur à travers un héliostat.

Les héliostats sont constitués essentiellement des miroirs accompagnés d'un système de motorisation. Ce système permet de traquer le soleil d'une manière journalière de façon à réfléchir ses rayons sur le récepteur solaire. En général, chaque héliostat a son système de motorisation propre à lui. Il est entraîné par deux moteurs électriques, permettant au miroir de se déplacer sur deux axes pour assurer la réflexion d'une source mobile vers la cible (fixe) voulue. Il existe plusieurs technologies de motorisation d'héliostats installés dans le monde, le Tableau 1 fait l'inventaire de 5 types d'héliostats (Almeria, THEMIS, Solar Two, Four solaire d'Odeillo, Wis) manufacturés dans la fin des années 90. La masse des héliostats atteint quelques centaines de kg. La fixation au sol est très importante pour permettre à l'héliostat de fonctionner en cas de vent (jusqu'à environ  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Ainsi, les pieds des héliostats sont très souvent en béton et pèsent plusieurs tonnes [8].

Tableau 1 : Exemple des motorisations d'héliostats [8].

Nom/Lieu	Photo	Convertisseur	Moteur	Mécanisme réducteur	Capteur (points/tour)	Puissance (W)
ALMERIA		Hacheur	MCC à aimant permanent	Vis sans fin / pignon	Incrémental 20 000	70
THEMIS		Relais - Ballast	MCC à aimant permanent	Pignon	Incrémental 200	170
SOLAR TWO			Moteur pas à pas	Pignon	Absolu 20 000	90
FOUR D'ODEILLO		Commande numérique	Moteur pas à pas	Vérin hélicoïdal	Aucun	115
WIS ISRAEL		Contrôle vectoriel	Moteur asynchrone	Câble Mécanique non connue	Absolu 4 096	360

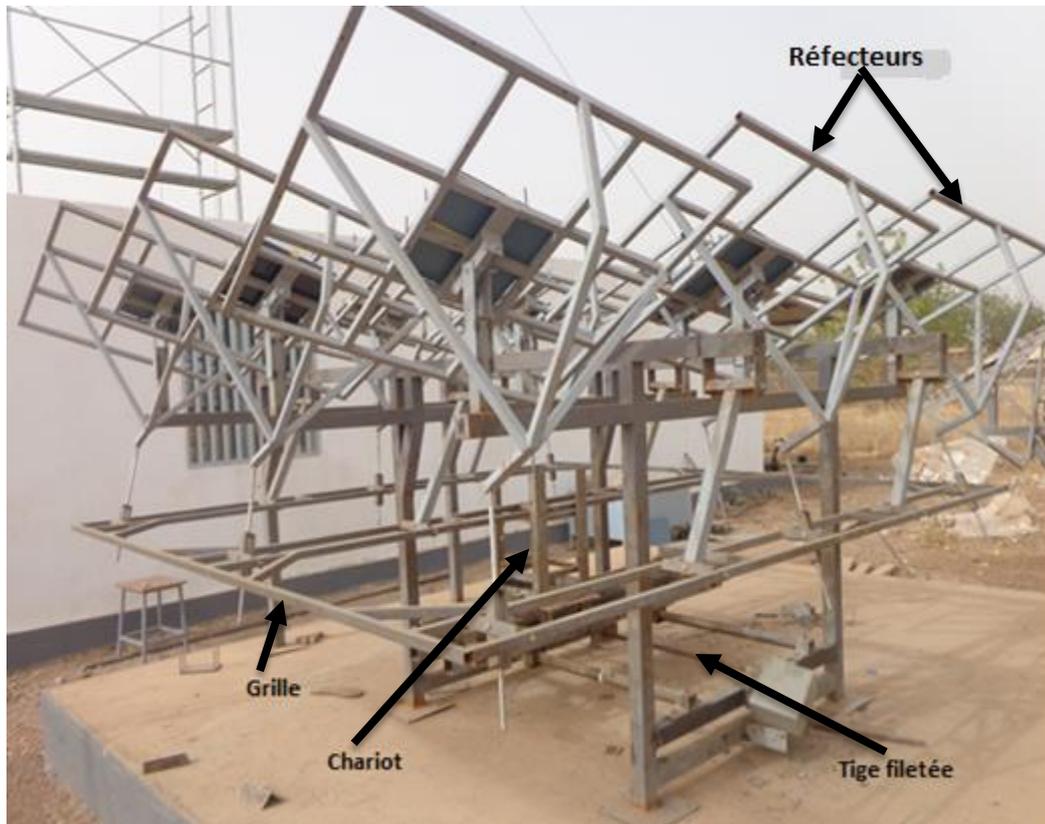
Ces types d'héliostats sont adaptés aux centrales possédant des centaines de mégawatts comme puissance électrique.

Pour un système adapté à des petites installations (quelques dizaines de kilowatts) et à la recherche d'un meilleur rendement, le laboratoire LESEE a mis en place un système d'héliostats différent de ceux cités au Tableau 1 que nous décrivons sur les lignes suivantes.

### Les héliostats du pilote CSP4Africa

Le pilote CSP4Africa présente une autre technologie de conception d'héliostats comme nous l'avons souligné antérieurement. Il utilise en effet un champ comportant 20 héliostats de 9 réflecteurs chacun. Chaque réflecteur à une surface utile de 1 m<sup>2</sup>. Les réflecteurs sont montés sur une grille de forme carrée. Ils se déplacent en fonction du mouvement de la grille. Cette dernière est transportée par un chariot. Le déplacement du chariot suivant les axes (Est – Ouest et Nord – Sud) est assuré par un système vis-écrou. La Figure 6 présente le système de suivi solaire utilisé pour la centrale solaire à concentration pilote CSP4Africa.

Il est construit à base des matériels disponibles sur le marché local (tube en acier, tige filetée, écrou, etc.). La tige filetée est couplé à un moteur PAS à PAS alimenté en continu et commandé par une carte ARDUINO. Cette dernière est programmée en fonction de la position du soleil, de faire tourner d'un sens ou de l'autre et de l'arrêter en cas de nécessité. La rotation de la tige filetée impose le déplacement du chariot en translatant dans un sens donné.



*Figure 6 : Système de suivi solaire du pilote CSP4Africa.*

## **II.4 LA BOUCLE THERMIQUE**

La boucle thermique est constituée des ballons de stockage, des tuyauteries, des pompes et des instruments de mesures. Les équipements de la boucle sont logés dans le local technique. Cette boucle a pour objectif de transférer l'énergie thermique reçue du soleil par le récepteur solaire au fluide de travail de l'ORC à travers un fluide caloporteur. La connexion détaillée des équipements est présentée par la Figure 7. Cette figure nous permettra d'évaluer les distances des tuyauteries afin de pouvoir déterminer les pertes de charge du circuit hydraulique, et par conséquent, indiquer les caractéristiques des pompes nécessaires pour la circulation du fluide caloporteur.

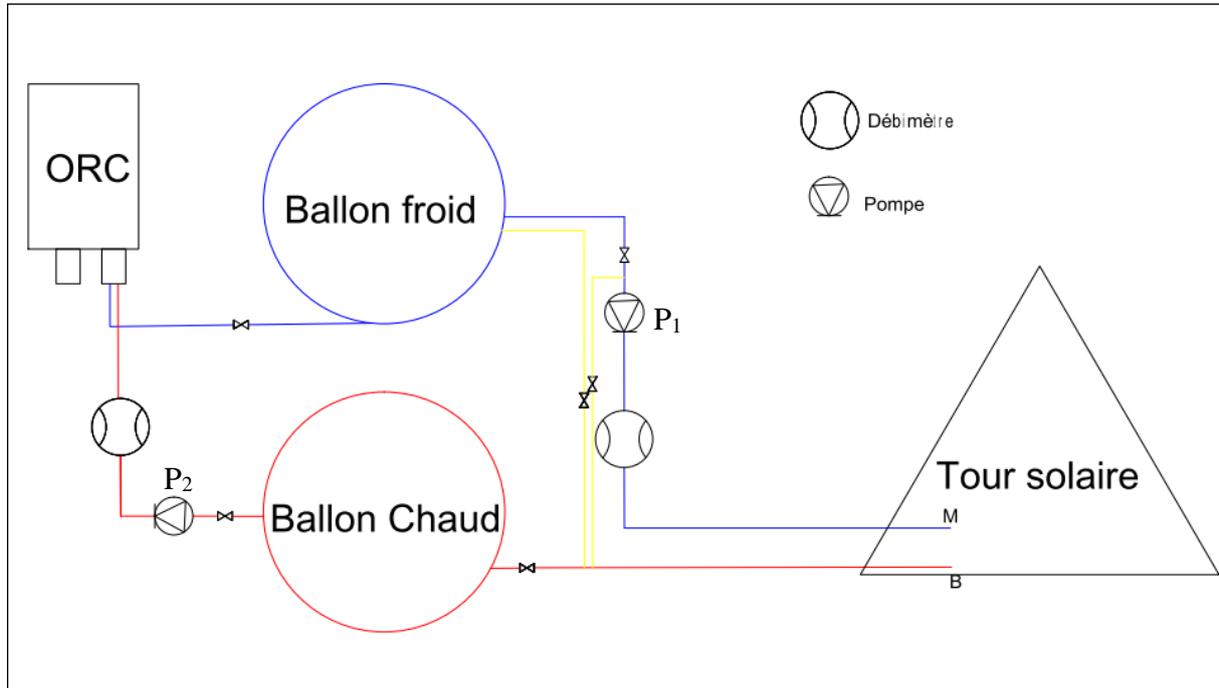


Figure 7 : Connexion des équipements du cycle thermique.

## II.4.1 LES POMPES DE CIRCULATION DU FLUIDE CALOPORTEUR

### II.4.1.1 Évaluation des pertes de charge

L'huile stockée dans le ballon chaud est envoyée à l'ORC pour transmettre sa chaleur à un fluide de travail afin de pouvoir tourner une turbine pour la production d'énergie électrique. Après échange avec le fluide de travail, l'huile est envoyée vers le ballon froid puis renvoyée vers le récepteur pour commencer le cycle. La circulation de l'huile dans le circuit chaud de la centrale est assurée par deux pompes. Quant à la boucle froide de la centrale, une pompe sera installée pour faire circuler l'eau. Le choix de ces pompes sera fait après calcul détaillé de la chute de pression dans les différents tronçons (Figure 7) des circuits hydrauliques. Les calculs des pertes des charges linéaires sont donnés par l'équation (3).

$$J = \frac{8f Q^2}{g\pi^2 D^5} \quad (3)$$

Il existe plusieurs manières pour déterminer le facteur  $f$ . La méthode la plus adaptée à notre cas est celle de Colebrook-White. Elle est donnée par l'équation (4).

$$f = \left[ -2 \text{Log} \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right) \right]^{-2} \quad (4)$$

B Achour et A Bedjaoui proposent une formule constituant la solution exacte pour la relation

implicite (4) de Colebrook-White [9]. Elle est applicable sur toutes les tuyauteries de forme circulaire pour un écoulement turbulent et couvre l'ensemble du diagramme de Moody. Elle est donnée par l'équation (5).

$$f = \left[ -2 \operatorname{Log} \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2} \quad (5)$$

Où la relation approchée du paramètre  $\bar{R}$  décrite par B Achour et A Bedjaoui est donnée par l'équation (6).

$$\bar{R} = 2R \left[ -\operatorname{Log} \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,5}{R^{0,9}} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

Quant aux pertes des charges singulières, elles sont déterminées par la relation (7).

$$K = \frac{8k}{g\pi^2 D^4} Q^2 \text{ en } (m) \quad (7)$$

Légende :

**J** : Pertes de charges linéaires

**R** : Nombre de Reynolds

**K** : Pertes de charges singulières (m)

**D** : Diamètre nominale (m)

**ε** : Rugosité de la conduite (mm)

**k** : Coefficient des singularités

**Q** : Débit du fluide (m<sup>3</sup>·s)

**f** : Facteur des pertes de charges linéaires

**g** : Accélération de la pesanteur (m·s<sup>-2</sup>)

Les Tableau 2 et Tableau 3 nous résument les propriétés des fluides et des conduites servant aux calculs des pertes des charges dans le circuit hydraulique. Notons que nous utilisons pour notre étude l'huile "DowthermA". Elle fait partie des huiles les plus utilisées dans les centrales thermiques. Puisque l'huile de "Jatropha", prévue pour la centrale, est encore en cours d'expérimentation.

Tableau 2 : Propriétés des conduites.

Désignation	Huile	Eau	Récepteur
Diamètre nominal D <sub>n</sub> (mm)	25	50	25
Diamètre extérieur D <sub>ex</sub> (mm)	31,7		
Diamètre intérieur D <sub>int</sub> (mm)	25,6		
Rugosité ε (mm)	3	0,7	0,4

Tableau 3 : Propriétés des fluides[10].

Paramètres	Huile "DowthermA"		Eau
Température °C	150	200	55
Nombre de Reynold R	70 453	103 101	215 903
Viscosité dynamique $\mu$ (mPa·s)	0,60	0,41	0,55
Débit massique Q (kg·s <sup>-1</sup> )	0,83		4,65

#### II.4.1.2 Résultats et discussions

Les résultats montrent que le circuit1 (du réservoir froid au récepteur solaire) a besoin d'une pompe avec une puissance hydraulique de 0,45 kW. Ce qui suppose une puissance électrique un peu plus élevée. Les résultats des calculs sont résumés par le Tableau 4. Tandis que les pertes de charges calculées par tronçons, en détail, sont données par le Tableau 7 en Annexe IV.

Compte tenu de la puissance maximale que la centrale peut fournir (8,6 kW), cette puissance est élevée et pourra être réduite. Nous remarquons que les pertes de charges sont importantes au niveau du récepteur (78,6 % des pertes de charges totales). Son diamètre de tube (2,5 cm) et sa forme explique ces résultats. Autrement dit, un autre récepteur, de même taille et de diamètre (3 cm), diminuera les pertes de charges du récepteur de 62 % et conduira à une puissance hydraulique de la pompe à 0,26 kW près de 2 fois plus petite que la première. Le changement du récepteur pourra conduire à une économie d'énergie à long terme.

Tableau 4 : Pertes de charges des circuits ainsi que les puissances hydrauliques utiles.

Fluide	Circuit	Température (°C)	Débit (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Pdc récepteur (m)	Pdc totales (m)	HMT (m)	Puissance hydraulique (W)
DowthermA	1	150	3,15	30,98	39,40	55,40	451,08
	2	200	3,15		2,79	4,54	36,96
Eau	3	55	17,00		0,61	3,11	73,62

#### Caractéristiques des pompes :

Les pompes sont choisies en fonction de leurs puissances, température de fonctionnement, hauteur manométrique et le type du fluide. Les caractéristiques des pompes à choisir pour un fonctionnement optimal sont données par le Tableau 5.

Tableau 5 : Caractéristiques des pompes minimales à choisir.

Désignation	Température (°C)	Fluide	Rh $\hat{o}$ (kg·m $^{-3}$ )	$\mu$ (mPa·s)	Débit (m $^{-3}$ ·h $^{-1}$ )	HMT (m)	Puissance hydraulique (W)
<b>Pompe1</b>	150	Huile thermique	950	0,6	3,5	55,4	500
<b>Pompe2</b>	200	Huile thermique	903	0,41	3,5	4,5	38
<b>Pompe3</b>	55	Eau	985,7	0,549	17	3.1	75

### **III. LA PLATEFORME DE TESTS DES COMPOSANTS DE CSP4AFRICA**

---

#### **III.1 PRÉSENTATION DE LA PLATEFORME**

Pour la conception et le fonctionnement de la centrale CSP4Africa, le LESEE a mis en place une plateforme d'essai et de tests des composants à l'échelle de la centrale. Cette plateforme a pour objectif d'effectuer des tests qui permettront de connaître les comportements réels, les performances et le point de fonctionnement optimal des composants de la centrale dans des conditions différentes de celles données par les constructeurs. Ensuite, les résultats obtenus de ces tests seront analysés et interprétés afin de tirer des conclusions pouvant aider à une extrapolation à l'échelle de la puissance du pilote CSP4Africa.

La plateforme est constituée principalement d'un banc d'essai pour le cycle thermodynamique et d'un prototype d'héliostat.

#### **III.2 LE BANC DE TEST**

##### **III.2.1 DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI**

Le but du banc d'essai est pour caractériser la boucle thermodynamique en caractérisant une machine à cycle organique de Rankine. Il est composé de :

- Une ORC Infinity Turbine IT10 de 10 kW<sub>el</sub> ;
- Une chaudière de 120 kW<sub>th</sub> ;
- Une tour de refroidissement ;
- Un système d'instrumentation.

La Figure 8 nous présente la configuration des différents composants du banc de test. Tandis que son protocole d'expérimentation est donné en Annexe III.

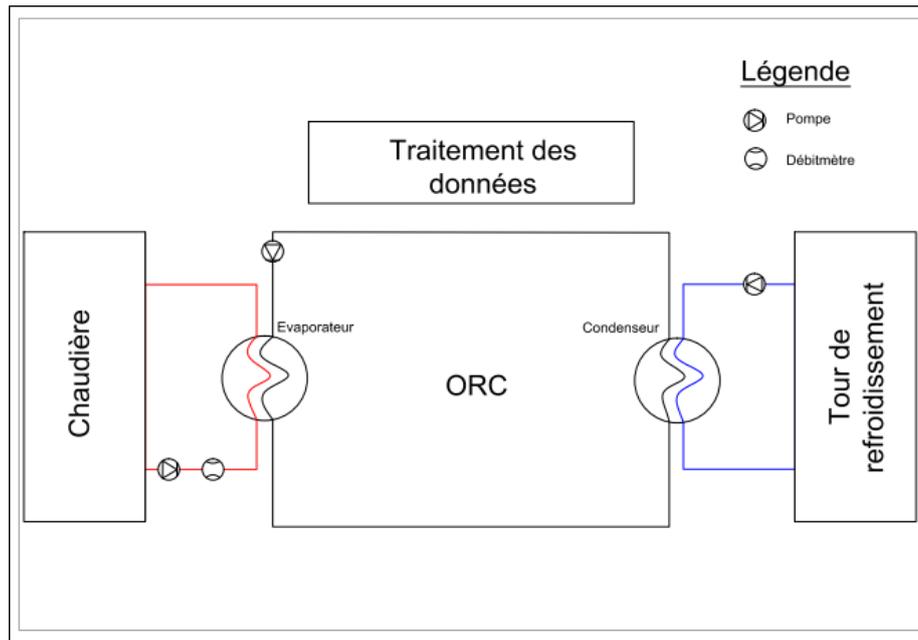


Figure 8 : Configuration des différents équipements du banc de test.

### III.2.1.1 L'ORC Infinity Turbine IT10

#### Description de l'IT10

Infinity Turbine IT10 est une machine à cycle organique de Rankine utilisant le Générone R245fa comme fluide de travail. Elle produit une puissance électrique de 10 kW dans des conditions de fonctionnement spécifiques données par le constructeur. Elle est constituée essentiellement d'une pompe, d'une turbine, de deux échangeurs de chaleur (un évaporateur et un condenseur), d'un réservoir, et d'équipements de mesures et de sécurité. L'ORC est présentée par la Figure 9.



Figure 9 : Vue de l'ORC Infinity Turbine IT10.

Description des composants de l'IT10 :

- La pompe : Elle a pour rôle faire circuler le fluide de travail dans le circuit de l'ORC. Elle est issue de l'assemblage d'une pompe doseuse à engrenage externe du constructeur BEINLICH PUMP SYSTEMS et d'un moteur LEESON.
- La turbine : C'est une turbine radiale centripète, elle est connectée à un alternateur à aimant permanent de marque SCS48 du constructeur Hydrogène Appliance. Ce couplage turbo-alternateur permet de transformer l'énergie thermique reçue de la chaudière par l'énergie électrique.
- Les échangeurs de chaleur : L'IT10 est équipée de deux échangeurs de chaleur (un évaporateur et un condenseur). L'évaporateur a pour but de transmettre la chaleur issue de la chaudière au fluide de travail. Tandis que le condenseur est connecté à l'aéro-refroidisseur et qui a pour rôle de refroidir le fluide jusqu'à la température de condensation pour recommencer le cycle.

L'IT10 sera couplée à une chaudière à travers l'évaporateur, et avec une tour de refroidissement via le condenseur. Sa production sera enregistrée par le système d'acquisition des données. Sa connexion avec la chaudière se fait à base des flexibles en acier. Tandis que celle avec la tour de refroidissement se fera par des tuyaux en PVC.

L'IT10 présente des défauts d'étanchéité probablement causés par son déplacement. En effet, nous avons effectué plusieurs tests suivant les protocoles des tests, dont nous avons apporté certaines solutions en fonction des contextes que nous décrivons brièvement.

### **Tests d'étanchéité de l'IT10**

Pour effectuer les tests d'étanchéité du circuit, il existe trois tests (à l'air, à l'azote, et le tirage à vide) recommandés et décrits par le constructeur et détaillés en Annexe I.

- Test à l'air

Nous avons rempli l'ORC de l'air jusqu'à une pression de 6.7 bar en utilisant un compresseur à air. Pendant 3 heures (temps nécessaire pour le test à l'air), aucune chute n'a été constatée. En conséquence, nous passons au test suivant : le test à l'azote.

- Test à l'azote

Nous avons rempli l'ORC d'azote jusqu'à une pression de 10.3 bar en utilisant une bouteille d'azote. Nous remarquons malheureusement une chute de pression plus de 0,7 bar en 24 h (temps imposé par le constructeur pour ce test). Nous avons par conséquent adopté une méthode pour détecter les problèmes liés et les résoudre.

**Méthode utilisée pour détecter les fuites :** Après avoir rempli l'ORC de l'azote jusqu'à la pression de 10,3 bar, nous avons inspecté toutes les tuyauteries en appliquant une solution savonneuse. De cette méthode, il en ressort plusieurs endroits de fuite au sein du circuit thermodynamique de l'IT10. La fuite est fréquente au niveau des raccords des tuyauteries. Il existe une fuite au niveau de la turbine et d'autres plus importantes à la sortie et à l'entrée du réservoir. Ces fuites sont généralement causées par le mouvement de l'ORC compte tenu des jonctions de plusieurs tuyauteries de diamètres différents, et des joints (colle bleue) mis dans la plupart de ces jonctions. Quant à la fuite au niveau de la turbine, elle est due au fait que la turbine a été démonté par erreur. Et au moment du remontage, le joint s'est dilaté et devenu plus large que sa rainure où il se loge. En conséquence, il ne peut pas supporter l'azote sous une pression importante. La Figure 10 nous présente certains endroits des fuites détectés lors de test à l'azote.

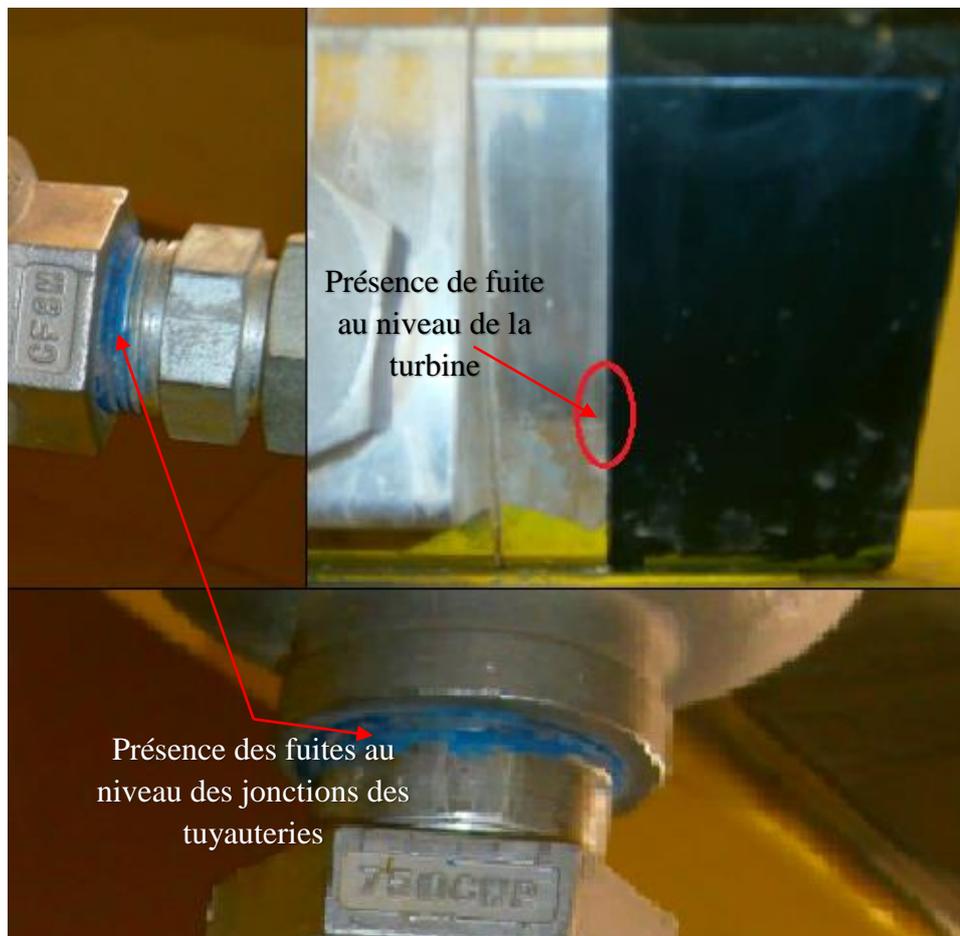


Figure 10 : Quelques endroits des fuites trouvées.

**Solutions Apportées aux anomalies trouvées :** Pour résoudre ces problèmes, plusieurs raccords ont été démontés, nettoyés puis remontés en mettant du téflon sur tous les filetages des raccords. Dans certains endroits sensibles, à part le téflon, une colle ARALDITE est aussi utilisée. Le téflon et la colle ont pour rôle de supprimer les défauts au niveau des filetages. Quant à la fuite au niveau de la turbine, nous avons changé le joint qui assure le contact de 2 surfaces des pièces formant la turbine. Quelques échantillons de raccordement des pièces en utilisant du téflon sont représentés par la Figure 11.

Notons qu'après chaque intervention, le protocole de test d'étanchéité est respecté en commençant bien sûr par le test à l'air avant de passer à l'azote si les conditions de ce premier sont conformes.



Figure 11 : Quelques pièces raccordées en utilisant du téflon.

Après plusieurs interventions et tests à l'azote, nous nous retrouvons avec une chute de pression relativement faible à l'ordre de 0,1 bar en 24 h. Autrement dit un système étanche à 98,9 %. Aucune autre fuite n'est visible. Par conséquent, nous passons au test suivant qui est le tirage à vide.

- Tirage au vide

Il s'agit d'utiliser une pompe à vide et faire le tirage à vide avec une pression inférieure à 0,66 mbar. Après 10 min, la pression augmente jusqu'à 0.72 mbar, et continue toujours à augmenter. Cette pression est supérieure à celle imposée pour le test à vide (inférieure à 0.4 mbar). Par conséquent, nous déduisons qu'il existe une fuite que nous n'avons pas pu détecter.

### **III.2.1.2 La chaudière**

#### **Description de la chaudière**

La chaudière est la source chaude de la plateforme. Elle délivre une puissance thermique de 120 kW pour un volume de 145 l d'eau. Cette chaudière est équipée d'un brûleur utilisant du fioul comme combustible. Les caractéristiques de la chaudière sont données par l'Annexe II. La Figure 12 nous montre l'image relative à la chaudière de la plateforme.



*Figure 12 : Chaudière GARIONI NAVAL de la plateforme.*

#### **Installation de la chaudière**

La chaudière doit être couverte par un isolant "la laine de verre" puis par des tôles pour assurer la sécurité des personnes (fourni par le constructeur). Elle sera couplée à l'ORC à travers l'évaporateur sur lequel une pompe sera installée pour assurer la circulation du fluide caloporteur (eau chaude). À part la pompe, des instruments de mesures tels que : un débitmètre pour mesurer le débit envoyé, des thermocouples et manomètres pour mesurer respectivement la température et la pression à l'entrée comme à la sortie de l'évaporateur.

### III.2.1.3 La tour de refroidissement

La tour de refroidissement a pour rôle de refroidir l'eau formant la boucle froide de la plateforme. La boucle froide permet au fluide de travail de l'ORC de se refroidir, donc de se condenser pour commencer le cycle thermodynamique. Une pompe sera connectée entre la tour de refroidissement et l'ORC pour envoyer d'eau depuis la tour de refroidissement jusqu'à l'ORC à travers son condenseur. Une vue de la tour de refroidissement est donnée par la Figure 13.



Figure 13 : Image relative la tour de refroidissement de la plateforme.

### III.2.1.4 Le système d'instrumentation et des mesures

Le système d'instrumentation et des mesures a pour rôle d'enregistrer et d'afficher les mesures effectuées par les équipements de mesures afin de pouvoir contrôler la production et les performances des équipements de la centrale. Ce système a été conçu par SIREA et qui est composé principalement d'un microcontrôleur, d'un convertisseur analogique/numérique, et des capteurs divers pour mesurer les différentes grandeurs. Les Figure 14 et Figure 15 présentent respectivement le synoptique de l'installation et une vue d'affichage des données mesurées.

CSP4Africa

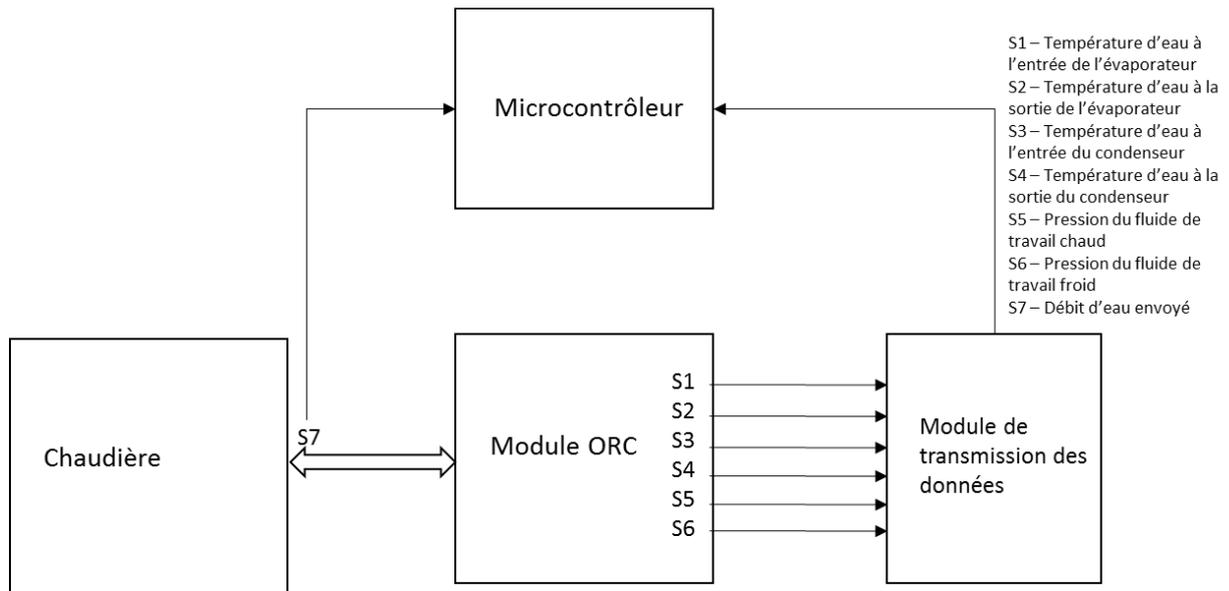


Figure 14 : schéma synoptique du système d'acquisition des données.

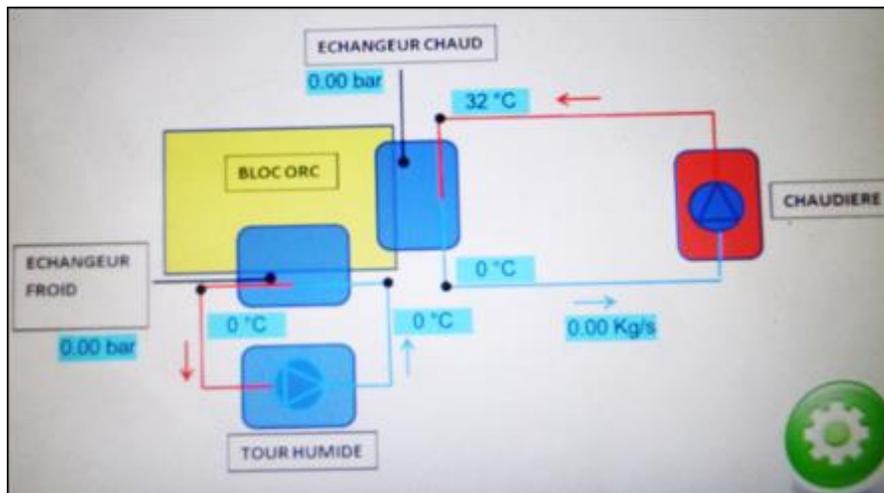


Figure 15 : Vue de l'affichage des données [11].

### III.2.2 INSTALLATION DU BANC DE TEST

L'installation du banc de test est faite en deux parties : la connexion des équipements entre eux, et la connexion électrique de chaque composant.

Sur cette dernière, un coffret électrique d'ensemble a été conçu en tenant compte de la sécurité des personnes et d'équipements de la plateforme. Il commande la chaudière, la pompe eau chaude, la tour de refroidissement et la pompe eau froide. La mise en marche de la boucle chaude est liée à celle de la boucle froide. Et l'arrêt de la boucle froide est conditionné par l'arrêt de la boucle chaude. Le schéma électrique du coffret d'ensemble est donné en Annexe V. Par contre, l'ORC est commandé par un autre coffret conçu par le constructeur.

**Remarque :** Contrairement à la configuration du coffret (Annexe V), la mise en marche de la pompe d'alimentation en eau chaude met sous-tension la vanne 3 voies et le débitmètre. Il n'y a pas une liaison de verrouillage entre le coffret de l'ensemble et celui de l'ORC. Par conséquent, il faut attention pour la mise en marche de la pompe d'alimentation d'eau chaude et l'ORC.

Une vue du banc de test prise lors de l'installation est donnée par la Figure 16. Tandis-que la Figure 17 nous présente une image du banc de test après installation.



Figure 16 : Image prise lors de l'installation du banc de test.



Figure 17 : Schéma du banc de test après installation.

### III.2.3 DÉMARRAGE DU BANC DE TEST

Après avoir effectué l'installation du banc de test, nous avons procédé aux démarrages séquentiels des composants. Nous avons remarqué qu'il y'a des fuites d'eau au niveau du réseau hydraulique de l'installation. À cause de ces fuites que malheureusement nous n'avons pas pu les régler, les démarrages de la chaudière et l'ORC n'ont pas eu lieu. Par conséquent l'ORC n'a pas été caractérisé.

### III.3 LE PROTOTYPE D'HÉLIOSTATS

#### III.3.1 DIAGNOSTIC DES PROBLÈMES DU MÉCANISME

Le prototype d'héliostats présenté par la Figure 6 ne fonctionne pas comme souhaité. Les rayons solaires concentrés ne sont pas tous focalisés sur la cible. En effet, certaines anomalies mécaniques causent ces problèmes que nous pourrions citer :

- Les tubes supports du chariot sont tordus. La torsion des tubes a pour origine d'une part, la flèche maximale quand le poids est au centre (Figure 18), et l'importante longueur des tubes (180 cm). Cette flèche est donnée par l'équation (8) et pourtant, le chariot n'a besoin que 120 cm pour toute sa course. D'autre part, la force d'attraction apportée par les héliostats quand le chariot est vers l'angle (Nord-Est ou Nord-Ouest) est plus importante que la résistance mécanique des tubes (l'épaisseur des tubes est de 3 mm). Cela crée un coup-de-bélier et déforme les tubes. En conséquence, le chariot ne pourra pas se déplacer librement.

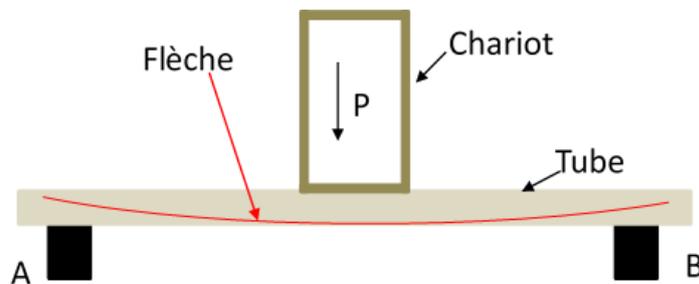


Figure 18 : Déformation des tubes supports du chariot.

$f_{max} = \frac{1}{48} \frac{PL^3}{EI}$	(8)
--	-----

Où L est la longueur du tube ; E est le module d'élasticité longitudinale ; et I est le moment d'inertie de la section.

- Le moteur utilisé présentement, avec un couple moteur de 1,76 N·m, n'est pas suffisant pour transporter la charge jusqu'aux extrémités (2,6 N·m). Cela dit donc les héliostats ne peuvent pas suivre le soleil au début de la journée tout comme à l'après-midi ;
- La pièce en « H » (Figure 19) qui sert nécessairement à guider le chariot est soudé sur le chariot. le chariot repose sur cette pièce. Ce qui fait qu'elle agit par conséquent sur la torsion de la tige filetée, et crée ainsi un faux-rond. Ce faux-rond a tendance de soulever la grille à travers le chariot, ce qui n'est pas possible vu le poids du système et la puissance du moteur ;
- La pièce mobile qui lie la grille au chariot (Figure 20) sort du chariot quand il est à l'extrémité. Cela explique que le support du chariot est plus bas ;
- Les tiges filetées sont logées directement dans les paliers. La jonction n'est donc pas précise et provoque ainsi un déséquilibre dans le système ;
- Le Burkina Faso est dans une zone poussiéreuse. La poussière s'infiltré dans l'espace qui est entre le chariot et les tubes qui le supportent. Le contact de la graisse (qui sert à un lubrifiant) avec cette poussière provoque des dysfonctionnements dans le système.

La Figure 19 montre l'espace inutile formé entre la pièce mobile où la grille se repose et le chariot, l'effet de la poussière en contact avec la graisse, ainsi que l'effet de la pièce H directrice du chariot.

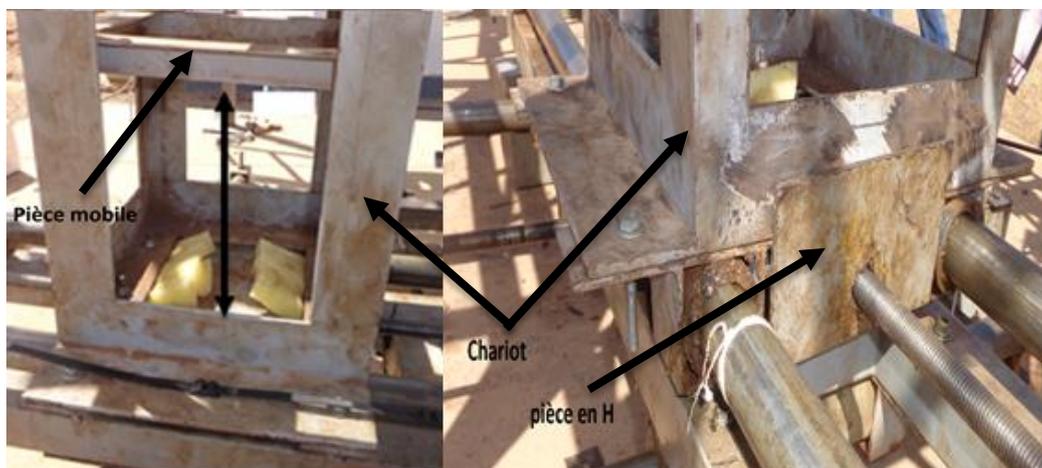


Figure 19 : Espace inutile entre la pièce mobile et le chariot, la pièce en forme de H ainsi l'effet de la poussière en contact avec la graisse.

CSP4Africa

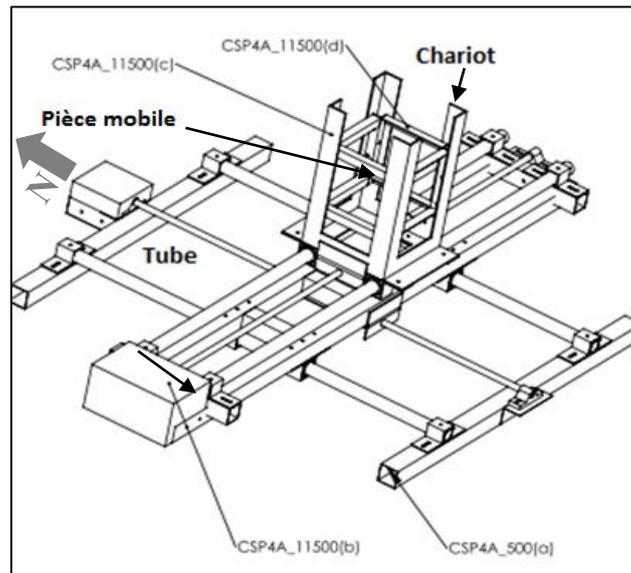


Figure 20 : Perspective du système de suivi solaire des héliostats de la CSP4Africa [7].

Pour résoudre ces différents défauts de fonctionnement, plusieurs corrections et changements ont été proposés et mis en œuvre.

### III.3.2 SOLUTIONS ET MODIFICATIONS APPORTÉES AU PROTOTYPE

Suite à ces corrections et changements soulevés, un certain nombre de modifications ont été appliqués et d'autres analyses sont en cours. De ces modifications, nous retenons :

- La diminution de la longueur des tubes de 60 cm. Cette diminution réduira la flèche formée par la longueur inutile des tubes quand le chariot est au milieu de sa course, et permet aussi une précision meilleure ;
- Le soulèvement du support du chariot de 12 cm (Figure 21, b). Il évitera en effet la sortie du support de la grille de sa cage et diminuera donc l'erreur due de cette sortie ;
- La vérification de parallélisme des axes lors du montage des composants de l'héliostat avec précisions les plus strictes possibles. Vu que le chariot se déplace d'une manière rectiligne sur des tubes (supports), la moindre erreur provoque une charge supplémentaire nécessitant ainsi un couple plus important pour le faire fonctionner. Voir même un dysfonctionnement total du système ;
- La libération de la pièce en « H » permet à la pièce de se mouvoir librement dans le sens où elle pourra bien se positionner pour faire bouger le chariot. La tige filetée ne supporte donc que son poids et le poids de la pièce en « H ». Même en cas de déformation de la tige filetée, le faux-ronde est amorti par le fait qu'il y a un jeu entre la pièce en « H » et le chariot. Elles forment, par conséquent, un dispositif libre et directif du système ;
- La location de la tige filetée dans le palier doit être assurée par une tige pleine soudée à la tige filetée, avec un diamètre de 20 mm équivalant au diamètre interne du palier. Pour

qu'il n'ait pas un jeu entre le palier et la tige pleine, un système de blocage avec un circlips (Figure 21, a) des diamètres interne et externe respectivement 18 mm et 22 mm est mis en place puis fixé par deux vis du palier ;

- Pour vaincre le couple mécanique du système (2,6 N·m), un moteur de 7 W est nécessaire. Même en cas d'une petite erreur due au parallélisme des axes ou encore de la flèche, il pourra assurer le fonctionnement ;
- Quant aux problèmes des poussières, un système de protection assuré par une couverture appelée « soufflet » avec une longueur totale de 90 cm et peut se compacter jusqu'à 20 cm. Il doit être en tissu qui pourra résister à la température du soleil pendant longtemps, et sera monté lors du montage des tubes. La Figure 22 montre un exemple d'un soufflet de fourche.



Figure 21 : a) Système de blocage de la tige filetée avec le palier à travers un circlips.

b) Soulèvement du chariot de 12 cm.



Figure 22 : Image relative au soufflet de fourche [12].

## **IV. CONCLUSION**

---

En somme, nos travaux sont focalisés sur deux grandes parties. L'installation et la caractérisation de l'ORC du banc de test au niveau de la plateforme d'une part, puis la contribution à la mise en place des équipements de la centrale CSP4Africa d'autre part.

Sur ce dernier, des schémas d'implantation et de connexion d'équipements de la centrale ont été proposés. Ensuite, nous avons déterminé les pertes de charge de la boucle thermique de la centrale afin de pouvoir choisir des pompes appropriées pour faire circuler le fluide caloporteur. Les résultats donnent une puissance hydraulique de la pompe1 de 0.45 kW, qui est élevée compte tenu de la puissance de la centrale. Cette puissance élevée est due, en grande partie, des pertes liées au récepteur solaire. À cet effet, nous avons évoqué un éventuel changement du récepteur pour une réduction marquante des pertes de charge.

Quant à la plateforme des tests de composants de la centrale, l'installation du banc de test a été effectuée après avoir réglés des problèmes liés à l'étanchéité de l'ORC. Tandis que son démarrage n'a pas eu lieu à cause des fuites d'eau notées au niveau de la boucle chaude du banc. Ensuite, des solutions ont été proposées dont certaines modifications ont été appliquées au prototype d'héliostat présent à la plateforme. Nous notons donc une amélioration conséquente au fonctionnement du prototype.

## **V. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES**

---

Au terme de nos travaux, nous recommandons les points suivants :

- Finaliser l'installation et le démarrage du banc de test ;
- Utiliser un pupitre pour la supervision et la commande des équipements du banc ;
- Faire un verrouillage électrique entre le coffret principal et celui de l'ORC.
- Faire une étude technico-économique pour un éventuel changement du récepteur solaire.

## VI. BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Heuraux Christine, “Formation aux métiers de l’électricité : un projet pilote en Afrique de l’Ouest au service de l’électrification rurale,” EDF, 2iE, FDE, AMADER, Ouagadougou, Mar. 2011.
- [2] “Le Cycle Organique du Rankine et ses applications,” *ENERTIME*, 2009. [Online]. Available: <http://www.cycle-organique-rankine.com/technologie.php>. [Accessed: 16-Mar-2015].
- [3] Mohamed Fadhel AYACHI, “Intégration des cycles de Rankine organiques dans la valorisation de la chaleur fatale industrielle à basses et moyennes températures,” Thèse, UNIVERSITÉ DE PERPIGNAN VIA DOMITIA, France, 2014.
- [4] Van Long LE, Michel FEIDT, Abdelhamid KHEIRI, and Stéphanie JUMEL, “Optimisation de la puissance du cycle organique de Rankine pour le cas supercritique en considérant le cycle endoréversible,” Projet CERES 2, France, Nov. 2013.
- [5] DELTOUR Nicolas, LAURENT David, and VRANCKEN Bruno, “Modélisation et dimensionnement de la partie solaire de la centrale solaire Sun2Power,” Université de Liège, Belgique, cours, 2013 2012.
- [6] Calise Francesco, Claudio Capuozzo, and Laura Vanoli, “DESIGN AND PARAMETRIC OPTIMIZATION OF AN ORGANIC RANKINE CYCLE POWERED BY SOLAR ENERGY,” *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6 (2): 178-204, 2013, Naples, Italy, pp. 178–204, 04-Feb-2013.
- [7] Laboratoire d’Énergie Solaire et Économies d’Énergie, “CSP4Africa Schéma d’ensemble.” 2012.
- [8] Alaric Montenon, “Analyse, mutualisation et optimisation par la commande de la consommation énergétique des héliostats autonomes des centrales à concentration solaire,” Génie Électrique, Université de Toulouse/Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Toulouse, France, 2013.
- [9] B. ACHOUR, A. BEDJAOU, “CALCUL DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT EN CONDUITE CIRCULAIRE SOUS PRESSION,” 2006 *Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface - LARHYSS*, Université de Biskra, BP 145 RP, 07000, Biskra, Algérie, pp. 197–200, Jun-2006.
- [10] Centre d’Étude Nucléaires de Grenoble, France, “PROPRIETES THERMIQUE DES POLYPHENYLES,” Centre d’Étude Nucléaires de Grenoble, France, Étude des propriétés thermiques 007-60-12 ORGF, 1964.
- [11] Abdouramane Moussa COULIBALY, “CARACTERISATION D’UN MODULE ORC DE 10kWe POUR LES PRETESTS DU PILOTE CSP4AFRICA,” Institut International d’Ingénierie d’Eau et d’Environnement (2iE), Ouagadougou/Burkina Faso, Mémoire de fin d’étude 1, 2014 2013.
- [12] HVAPièce, “Soufflet de fourche,” France, 2015.
- [13] [ulrich@infinityturbine.com](mailto:ulrich@infinityturbine.com), “IT 10 kWe Installation Manual for a full build system only without PLC system Version 11,” Infinity Turbine LCC. ORC Engine Generator Set – 10 kWe – Version 12, California.

## **VII. ANNEXES**

---

Annexe I: Protocoles des tests d'étanchéité de l'ORC.....	39
Annexe II: Caractéristiques de la chaudière.....	41
Annexe III : Protocole d'expérimentation du banc d'essai de CSP4Africa.....	42
Annexe IV : Pertes de charge données par tronçon et par variante.....	46
Annexe V : Circuits de puissance et commande du banc de test .....	48

## Annexe I: Protocoles des tests d'étanchéité de l'ORC

Le test d'étanchéité de l'ORC se fera en trois étapes :

### Test à l'azote :

1. Raccorder le compresseur avec le point haut du réservoir ;
2. Ouvrir toutes les vannes du module ORC ;
3. Remplir l'ORC avec l'air jusqu'à une pression de 6,7bar ;
4. Noter l'instant, la pression et laisser le système sous cette pression pendant 3 heures ;
5. Inspecter toute la tuyauterie y compris la turbine ;
6. Noter la variation de pression à la fin du temps prévu ;
7. En cas de fuite (baisse de pression) recherche la fuite avec la solution savonneuse et contacter le constructeur ;
8. Sinon évacuer l'air du système et passer test suivant.

### Test à l'azote :

1. Ouvrir toutes les vannes du module ORC ;
2. Raccorder la bouteille d'azote au point haut du réservoir ;
3. Remplir l'ORC avec l'azote jusqu'à une pression de 6,5bar puis par graduation de 0,5bar jusqu'à la pression de 10,3 bar ;
4. Noter l'instant, la pression et laisser le système sous cette pression pendant 24 heures ;
5. Inspecter toute la tuyauterie y compris la turbine ;
6. Noter la variation de pression à la fin du temps prévu ;
7. En cas de fuite (baisse de pression) contacter le constructeur ;
8. Sinon évacuer l'azote du système et passer au chargement de R245 fa.

Pour les deux tests précédents, la Pression de réglage de soupape de sécurité en phase gazeuse est comprise entre 6,9 à 8,9 bars.

### Tirage à vide :

1. Raccorder la pompe à vide sur le module comme indiqué sur la Figure 23.
2. Placer le vacuomètre à l'opposé de la pompe à vide ;
3. Tirage au vide, avec une pression inférieure à 0,66 mbar ;
4. À cette pression, isoler la pompe et attendre pendant 10 min :

Si la pression est inférieure à 0,4 mbar, alors le système est étanche.

Si la pression est supérieure à 0,4 mbar et qu'il cherche à s'équilibrer, recommencer le tirage au vide dans les mêmes conditions ;

Si la pression est supérieure à 0,4 mbar et qu'elle continue à augmenter, alors le système est non étanche.

**Les matériels:**

- Une pompe à vide
- Un vacuomètre (capteur de pression)
- Deux flexibles munis des valves schraders )

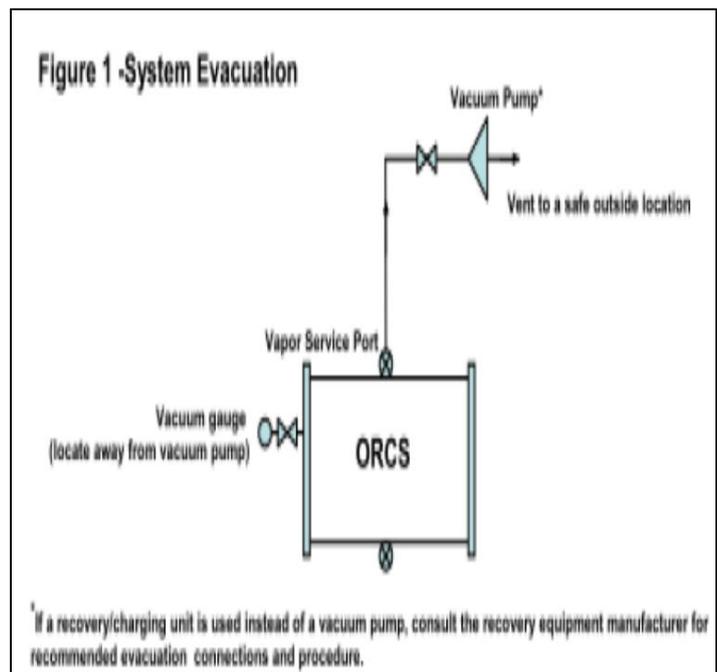


Figure 23 : Connexion de l'ORC avec une pompe à vide[14].

## Annexe II: Caractéristiques de la chaudière

Tableau 6 : Caractéristiques de la Chaudière.

Constructeur	GARIONI NAVAL
Capacité	103.2 kcal·h <sup>-1</sup> 120 kW
Rendement $\eta$	91,3 %
Volume d'eau	145 l
Pression de service	6 bar
Perte de charge de fumées	7 mmH <sub>2</sub> O
Pertes de charge de l'eau	200 mmH <sub>2</sub> O
Température d'entrée de l'eau mini	60 °C
Température de sortie de l'eau max	100 °C

## **Annexe III : Protocole d'expérimentation du banc d'essai de CSP4Africa**

L'ensemble d'équipements de la plateforme est commandé par un coffret d'alimentation à l'exception de l'ORC qui présente son propre coffret.

Le coffret d'ensemble commande, en conséquence, la chaudière, la pompe eau chaude, la tour de refroidissement et la pompe eau froide. Le coffret a été conçu en tenant compte de la sécurité des personnes et d'équipements de la plateforme. La mise en marche de la boucle chaude est liée à celle de la boucle froide. Et l'arrêt de la boucle froide est conditionné par l'arrêt de la boucle chaude.

***Attention :*** *L'arrêt d'urgence n'arrête que la boucle chaude, et la mise en marche de la pompe d'alimentation en eau chaude met sous-tension la vanne 3 voies et le débitmètre. Il n'y a pas une liaison de verrouillage entre le coffret de l'ensemble et celui de l'ORC. Par conséquent, il faut faire attention pour la mise en marche de la pompe d'alimentation d'eau chaude et l'ORC.*

La mise en marche du banc de test doit suivre en ordre les instructions décrites ci-dessous :

### **1- Démarrage de la boucle froide**

La boucle froide est constituée d'une tour de refroidissement et d'une pompe de circulation d'eau froide. Son démarrage se fait en deux cas suivant la période d'inactivité de la tour de refroidissement.

***NB :*** *La tour de refroidissement est commandée par un variateur de vitesse réglé à 50 Hz. Ne touchez pas aux paramètres du variateur ni démarrer la tour de refroidissement à partir du variateur. En cas de dérèglement, veuillez suivre les instructions de réglage décrites sur sa fiche technique.*

### **Cas1 : démarrage après une longue période (plus de 6 mois) d'inactivité**

- Éliminer toute la saleté déposée sur les persiennes, ventilateurs, et dans le bassin.
- Nettoyer à fond le bassin avec le filtre monté en finissant par un lavage avec une grande quantité d'eau.
- Démonter le filtre, nettoyer-le puis le remonter.
- Faire tourner le ventilateur manuellement pour s'assurer qu'il tourne librement.
- Remplir le bassin jusqu'au niveau du déversoir.

- Régler la vanne à flotteur pour qu'elle se ferme quand le flotteur arrive environ 5 à 10 cm en-dessous du niveau du déversoir.
- Connecter le ventilateur et vérifier si le sens de rotation correspond à celui indiqué par la flèche qui se trouve sur la carcasse.
- Contrôler la tension du courant et l'intensité dans les bornes du moteur du ventilateur. L'intensité mesurée ne doit en aucun cas dépasser celle qui est indiquée sur la plaque signalétique du moteur.
- Démarrer la tour de refroidissement
- Démarrer la pompe de circulation d'eau froide.

### **Cas2 : Redémarrage en période d'opération**

- Éliminer toute la saleté déposée sur les persiennes, ventilateurs, et dans le bassin.
- Ouvrir la vanne d'alimentation du condenseur
- Démarrer la tour de refroidissement
- Démarrer la pompe de circulation d'eau froide.

Si après le démarrage de la tour on constate dans l'eau des restes ou des particules de n'importe quel genre, qui pourraient avoir été introduites pendant le montage, on procédera à son nettoyage pour éviter les obstructions qu'elles pourraient occasionner.

Si pendant le démarrage on observait un déséquilibre du ventilateur, on devra arrêter le moteur, démonter le groupe, et équilibrer à nouveau le ventilateur avant de mettre définitivement la tour en marche. Un tel déséquilibre pourrait conduire à des dégâts sur les coussinets du moteur, et dans des cas extrêmes, à l'apparition de crevasses occasionnées par la vibration ou par n'importe quel autre genre de cassures.

#### **2- Démarrage de la chaudière**

Avant de commencer la mise en marche de la chaudière, il faudra fermer les soupapes de décharge, de prise d'eau chaude et de prise auxiliaire ; fermer correctement les ouvertures ; puis ouvrir les soupapes d'évent, d'arrêt niveau, alimentation de la pompe d'eau (en amont tout comme en aval), et la prise du manomètre.

La mise en marche de la chaudière peut être effectuée en ordre suivant les opérations décrites ci-dessous :

- Mettre le bouton d'urgence à sa position initiale avant de déclencher le commutateur principal
- Contrôler l'ouverture de l'interrupteur général du brûleur, soumettre à tension le tableau chaudière
- Soumettre à tension le brûleur
- Faire augmenter la température dans la chaudière et faire ouvrir le thermostat de sécurité
- Quand le brûleur est arrêté en conséquence de l'intervention du thermostat de sécurité, faire baisser la température dans la chaudière (en ouvrant avec précaution la prise principale d'eau chaude). régler le thermostat à la température voulue
- Avant d'alimenter le service en eau chaude, veuillez démarrer l'ORC en suivant les instructions décrites au point 3.

### 3- Démarrage de l'ORC IT10 :

**Remplissage avec le Genetron :** Le remplissage du Genetron se fera après avoir effectué les tests d'étanchéité. Placer le cylindre au-dessus du réservoir, raccorder d'abord le flexible au point bas du réservoir du module, puis inverser le cylindre contenant le R245fa et raccorder l'autre bout du flexible au cylindre. Ouvrir la vanne avec précaution et poursuivre le remplissage. La masse totale du fluide est de 58 kg.

Après avoir rempli du Genetron, le démarrage de l'ORC se fera en ordre comme suit :

- Vérification des branchements électriques
- Connecter les échangeurs de l'ORC à la tour de refroidissement et à la chaudière, puis les tester
- Démarrer de la tour de refroidissement et alimenter la pompe du circuit froid
- Vérification de la soupape de décharge
- Paramétrer le variateur de vitesse à une vitesse de 1500 tr/min pour une première mise en marche
- Faire tourner la pompe pendant 10 min sans pourtant alimenter en eau chaude
- Après 10 min de fonctionnement, Démarrer la pompe d'alimentation en eau chaude, ouvrir la vanne de la source chaude à (50%)
- La pression du système doit augmenter sans dépasser 6,9 bar.

Au démarrage à froid, la pression du système est comprise entre 4,13 et 4,82 bar. Si la pression du système augmente trop vite alors diminuer la vitesse de la pompe. Quand le système est équilibré, la vitesse de la pompe peut être réduite à 50 %.

### **Procédures d'arrêt de la plateforme**

Pour l'arrêter, veuillez arrêter la chaudière puis l'ORC avant la tour de refroidissement, en respectant les protocoles d'arrêts de chaque composant.

#### **Arrêt de la chaudière**

- Diriger la vanne d'alimentation vers le retour
- Arrêter la pompe d'alimentation
- Arrêter le brûleur

#### **Arrêt de l'ORC**

Pour arrêter l'ORC, il faudra :

- Arrêter l'alimentation en eau chaude, diriger la vanne vers le retour
- Maintenir la pompe à sa vitesse nominale (1500 tr/min)
- La pression du système diminuera et sera comprise entre 2,06 et 4,13 bars
- L'arrêt du système a besoin d'une durée relativement comprise entre de 30 à 45 min.

Durant tout le processus d'arrêt du système, l'alimentation en eau froide est maintenue.

#### **Arrêt de la tour de refroidissement**

- Arrêter le ventilateur ;
- Arrêter la pompe de circulation.

## Annexe IV : Pertes de charge données par tronçon et par variante

$$J = \frac{8f Q^2}{g\pi^2 D^5}$$

$$f = \left[ -2\text{Log} \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right) \right]^{-2}$$

$$f = \left[ -2\text{Log} \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2}$$

$$\bar{R} = 2R \left[ -\text{Log} \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,5}{R^{0,9}} \right) \right]^{-1}$$

$$K = \frac{8k Q^2}{g\pi^2 D^4} \text{ en } (m)$$

Légende :

**J** : Pertes de charges linéaires

**DHS** : Pertes de charges singulières (m)

**R** : Nombre de Reynolds

**D** : Diamètre nominale (m)

**k** : Coefficient des singularités

**f** : Facteur des pertes de charges linéaires

**T** : Température du fluide (°C)

**Jt** : Pertes de charges linéaires totales

**DH** : Pertes de charges totales (m)

**K** : Pertes de charges singulières (m)

**ε** : Rugosité de la conduite (mm)

**Q** : Débit du fluide (m<sup>3</sup>.s)

**g** : Accélération de la pesanteur (m.s<sup>-2</sup>)

**L** : Longueur du tube (m)

Tableau 7 : Pertes de charge dues aux tuyauteries.

Variété	Tronçons	T (°C)	L (m)	k	Reynolds	$\bar{R}$	f	J (m/ml)	Jt (m)	$\Delta H_s$ (m)	$\Delta H$ (m)	Signification des tronçons
Huile	AB	200	16	0,30	1,03E+05	6,01E+04	0,0212	0,15	2,43	0,01	2,44	Hauteur de la tour solaire
	BC		5,5	10,16					0,84	0,23	1,06	Bas de la tour - Entrée Ballon chaud
	DE		0,6	1,30					0,09	0,03	0,12	Sortie Ballon chaud - Entrée P2
	FG		1,6	0,90					0,24	0,02	0,26	Sotie P2 - Entrée ORC
	HI	150	4,5	1,90	7,05E+04	4,11E+04	2,13E-02	0,14	0,62	0,04	0,66	Sotie ORC - Entrée Ballon froid
	JK		1,5	6,60					0,21	0,13	0,34	Sotie Ballon froid - Entrée P1
	LM		4,5	0,60					0,62	0,01	0,63	Sotie P1 - Bas de la tour
	MA		16	0,30					2,20	0,01	2,20	Hauteur de la tour solaire
Eau	NO	55	1,25	1,30	2,16E+05	5,27E+04	8,18E-03	0,05	0,06	0,05	0,11	Sortie Tour R. - Entrée P3
	PQ	55	4	0,60					0,19	0,02	0,22	Sotie P3 - Entrée ORC
	RS	60	5	1,30					0,24	0,05	0,29	Sotie ORC - Entrée Tour R.

## Annexe V : Circuits de puissance et commande du banc de test

