

**Dimensionnement d'un stockage thermique de gestion pour une centrale
solaire à concentration : cas de CSP4Africa**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE
OPTION : ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 24 Juin 2014 par
Yenumpunti Elsa OUALI

Travaux dirigés par: Dr Kokouvi Edem N'TSOUKPOE

Enseignant-chercheur

Ing Eric Serge KENDA NITEDEM

Doctorant

Pr Yao AZOUMAH

Professeur

LABORATOIRE ENERGIE SOLAIRE
ET ECONOMIE D'ENERGIE (LESEE)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Sayon SIDIBE

Membres et correcteurs : Patrice DANGANG
K. Edem N'TSOUKPOE
Yoan RICHARDSON

Promotion [2013/2014]

A ma mère Noélie KIEMA OUALI

.

REMERCIEMENTS

Toute ma reconnaissance va tout d'abord au créateur de toutes choses, le Maître du temps et de l'Histoire, le Maître de mon histoire.

J'exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance :

Au **Pr Yao AZOUMAH**, chef du laboratoire LESEE qui a été l'un de mes encadrants pour ce mémoire et dont le soutien et l'engagement pour la réussite des stagiaires de son laboratoire ont toujours été sans faille. Votre charisme force l'admiration et constitue pour moi une réelle source d'inspiration.

Au **Dr Kokouvi Edem N'Tsoukpoe** qui a assuré mon encadrement au quotidien et qui par son perfectionnisme a toujours su me pousser dans mes retranchements et aiguiser mon esprit critique.

Au doctorant **Eric Serge KENDA NITEDEM** qui a aussi fait partie de mes encadrants. Ta disponibilité et tes différentes remarques m'ont fortement aidées à mener à bien les tâches qui m'étaient dévolues ; bien plus qu'un encadrant, tu as été pour moi un grand-frère.

A **Mme Mintou SIDIBE**, assistante administrative du laboratoire LESEE pour son soutien multiforme tout au long de mon stage.

A l'ensemble des **stagiaires, ingénieurs de recherche, doctorants et enseignants-chercheurs du LESEE** : vous constituez la « famille solaire » toujours en quête de l'excellence qui m'a accueillie et qui a toujours répondu favorablement à l'ensemble de mes sollicitations pour mes travaux de mémoire.

Je voudrais également exprimer toute ma tendresse et toute ma reconnaissance :

A celui qui s'est battu pour ma réussite, celui qui s'est tout simplement « diminué pour que moi je croisse », mon père **Laurent OUALI**. Puisse ma vie toute entière t'honorer et te signifier ma gratitude et mon amour filial.

A ma mère **Noelie KIEMA OUALI** qui a posé les fondements de mon existence et à qui ce travail est dédié : même si pour un moment tu t'es cachée dans l'ombre du temps, mes pensées sans cesse te sont adressées et mon amour, s'il n'est resté le même qu'autrefois, a grandi au fil des ans. Puisseons-nous un jour dans l'Eternité bienheureuse nous retrouver.

A mes frères **Sylvestre, Rosine et Jocelyne** pour leur soutien dans la prière et pour leurs attentions.

A mes neveux **Aurel, Ewann et Malicka** pour qui j'espère être un jour un modèle et « une maman supplémentaire ».

A notre « mamie » **Joséphine KABORE** pour son soutien à tous égards et pour sa patience.

Mes remerciements vont aussi à mes frères du **groupe liturgique Marie Reine Immaculée de Dassasgho** et à tous mes amis de la chapelle Cœur Immaculé de Marie de Dassasgho pour leur soutien dans la prière.

RESUME

L'Afrique est de nos jours confrontée à un sérieux problème d'accès à l'énergie en raison du coût élevé des centrales électriques ainsi que du coût d'achat élevé de l'électricité pour les consommateurs. C'est pour essayer de trouver des solutions à ce problème que le laboratoire LESEE a initié le projet CSP4Africa pour des centrales solaires à concentration adaptées au contexte africain. Ces centrales devraient utiliser des matériaux locaux et fournir une électricité moins chère. Nous avons dans nos travaux de mémoire dimensionné le système de stockage de la chaleur pour la centrale CSP4Africa. Il s'agit d'un système direct à deux réservoirs de 2,25 m³ en P235GH EN 128-2 avec une épaisseur de 5 mm de paroi. La capacité du stockage est de 100 kWh thermique pour un temps de fonctionnement journalier de 3 h. L'isolation est faite de 20 cm de laine de verre. Des équipements annexes s'ajoutent à ces réservoirs : des pompes Salmson et des conduites en acier ASTM106 Gr B.

Mots Clés :

-
- 1 – Centrale solaire à concentration**
 - 2 – Stockage thermique**
 - 3 - Dimensionnement**
 - 4 – CSP4Africa**
 - 5 – Stockage de gestion**

ABSTRACT

Africa is facing a real problem of access to energy because of the high cost of electrical power plants and thus an expensive cost of electricity for consumers. LESEE laboratory then initiated the CSP4Africa project, a project whose goal is to develop concentrating solar power plants which are suitable for Africa, using local materials and allowing a lower cost electricity supply. During our master thesis' work, we have designed the thermal storage for the solar power plant of CSP4Africa. It is a direct and two-tank storage system. Each tank has a capacity of 2, 25 m³ and is made of P235GH EN 128-2 for 5 mm of thickness. The storage system has a capacity of 100 kWh_{th} and is intended to run for three hours. The insulation consists of 20 cm of glass wool and adjunct equipment like Salmson pumps and pipes made of ASTM106 Gr B steel are added to the tanks.

Key words:

- 1 – Concentrating solar power plant**
- 2 – Thermal storage**
- 3 - Design**
- 4 – CSP4Africa**
- 5 – Management storage**

LISTE DES ABREVIATIONS

Symboles	Général	Unité
S	Surface	m ²
C	Coût	F CFA
C _p	Capacité calorifique	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
D	Diamètre	m
DNI	Ensoleillement direct	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
e	Epaisseur	m
E	Energie	kWh
f	Fréquence d'apparition	%
g	Accélération de la pesanteur	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Gr	Nombre de Grashof	
h	Coefficient de convection	$\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$
H	Hauteur	m
HMT	Hauteur manométrique totale	m
I	Rayonnement incident	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
l	Largeur	m
L	Longueur	m
m	Masse	kg
n	Rang	
Nu	Nombre de Nusselt	
p	Pression	Pa
P	Puissance	kW
Pr	Nombre de Prandtl	
q _m	Débit massique	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
q _v	Débit volumique	m ³ /s

Q	Chaleur	kWh _{th}
Re	Reynolds	
R _{th}	Résistance thermique	°C.W ⁻¹
t	Temps	s
T	Température	°C
U	Coefficient global d'échange	m ² . °C.W ⁻¹
V	Volume	m ³

Lettres grecques

ε	Déformation	m
ζ	Coefficient de frottement dû aux singularités	
λ	Conductivité thermique	W/m. °C ⁻¹
η	Rendement	%
ρ	Masse volumique	kg/m ³
Φ	Flux de chaleur	W

Indices

0	Initial
1	Entrée
2	Sortie
a	Air extérieur
b	Base
c	Critique
ch	Chaud
cs	Champ solaire
f	Fluide
geo	Géométrique

h	Horizontal
i	Intérieur
ic	Incident
is	Isolant
l	Liquide
m	Massique
me	Mur extérieur
mi	Mur intérieur
ml	Mur latéral
p	Pertes
r	Récepteur
rc	Réservoir chaud
rf	Réservoir froid
s	Sol
st	Stocké
t	Toit
T	Total
	Volumique
v	

2IE	Institut International de l'Eau et de L'Environnement
BUMIGEB	Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina
CSP4Africa	Concentrating Solar Power Plant For Africa
LESEE	Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie

Table des matières

REMERCIEMENTS	iii
RESUME	v
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX	12
LISTE DES FIGURES	13
PRESENTATION DU LABORATOIRE D'ACCUEIL	14
I. PRESENTATION DU PROJET CSP4Africa	15
II. Introduction	16
1. Contexte.....	16
2. Problématique.....	17
3. Objectifs du mémoire	18
4. Les formes de stockage.....	18
5. Le stockage à chaleur sensible : différentes configurations possibles	18
I. Revue bibliographique sur les méthodes de dimensionnement	23
1. La ressource solaire	23
2. Estimation de l'énergie mobilisable	23
3. L'unité de stockage.....	25
4. Les équipements connexes : pompes et conduites	31
5. Réglementation sur les systèmes de stockage haute température	32
III. Matériels et Méthodes	34
1. Justification du choix du système de stockage	34
2. Estimation de l'énergie disponible.....	34
3. Energie mobilisable	35
4. L'unité de stockage.....	36
5. Les conduites et les pompes.....	38
IV. Résultats	39
1. Énergie disponible	40
2. Energie mobilisable	40
3. L'unité de stockage.....	41
4. Calcul des conduites et pompes	46
III. V. Discussion et Analyses	48
1. La configuration du système de stockage de CSP4Africa	48
2. Evaluation de la ressource solaire sur le site de Kamboinsé.....	48
3. L'unité de stockage.....	49



VI. Conclusion.....	51
IV. VII. Recommandations - Perspectives.....	51
V. Bibliographie.....	52
VI. VII. ANNEXES	54



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs d'épaisseurs minimales calculées par nuance d'acier (réservoir chaud)	43
Tableau 2: Epaisseurs minimales de paroi selon le diamètre.....	43
Tableau 3: Paramètres thermiques déterminés pour le réservoir chaud.....	44
Tableau 4 : Pertes thermiques du réservoir chaud isolé.....	44
Tableau 5: Estimation de la quantité de fluide requise pour le stockage	46
Tableau 6: Récapitulatif du dimensionnement des pompes et conduites	47
Tableau 7: : Caractéristiques de tubes d'aciers spécifiés hautes températures	47
Tableau 8: Aperçu du calcul du diamètre optimal (1/2)	56
Tableau 9 : Aperçu du calcul du diamètre optimal (2/2)	57
Tableau 10: Résistances élastiques d'aciers spécifiés hautes températures en fonction de la température (MPa)	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Stockage thermique thermocline (9).....	21
Figure 2. Stockage à deux réservoirs (10)	21
Figure 3. Systèmes direct et indirect de stockage thermique (11)	22
Figure 4: Profil d'ensoleillement et enjeu du stockage (14).....	25
Figure 5 Aperçu de la constitution d'un réservoir de stockage thermique	26
Figure 6 Pertes thermiques dans un réservoir cylindrique	27
Figure 7: Courbe illustrative du cout de l'ensemble (conduite + pompe) en fonction du diamètre.....	32
Figure 8 Configuration obligatoire du réservoir (20).....	33
Figure 9 Proposition de schéma pour la centrale de CSP4Africa (22).....	39
Figure 10 Profils journaliers d'ensoleillement en fonction des fréquences d'apparition	40
Figure 11 Profil de production à une fréquence d'apparition de 50 %	41
Figure 12 Schéma de la centrale	46
Figure 13: Aperçu des ensoleillements directs en fonction des fréquences cumulées pour 11h30.....	58
Figure 14: Aperçu des ensoleillements directs en fonction des fréquences cumulées pour 12h30.....	58
Figure 15: Aperçu des ensoleillements directs en fonction des fréquences cumulées pour 13h30.....	59
Figure 16: Aperçu des ensoleillements directs en fonction des fréquences cumulées pour 14h30.....	59

PRESENTATION DU LABORATOIRE D'ACCUEIL

Le travail de mémoire que nous avons réalisé a été fait au sein du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE). Ce laboratoire constitue avec le Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburants (LBEB) le département Energie et Electricité de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Il est situé sur le site K1 du campus 2iE de Kamboinsé. L'objectif de ce laboratoire est de mener des travaux de recherche pour une production et une gestion durable de l'énergie mécanique, thermique et électrique en Afrique. Cet objectif s'inscrit dans une dynamique de contribution à l'innovation industrielle et technologique. De façon concrète, les activités du LESEE se déroulent suivant deux axes de recherche que sont la conversion de l'énergie solaire sous environnements chauds et rudes et la gestion optimale d'énergie durable (production, transport, distribution). Le premier axe se décompose en trois sous axes de recherche à savoir :

- les systèmes solaires photovoltaïques en milieu hostile
- les centrales solaires à concentration (CSP) pour mini réseaux
- les habitats solaires

Quant au second axe de recherche, il se décompose en deux sous axes que sont :

- l'hybridation des systèmes énergétiques
- l'interaction sources – réseaux intelligents – utilisateurs

Avec à sa tête le Professeur Yao Ketowoglo AZOUMAH, le laboratoire compte 03 enseignant-chercheurs, 07 ingénieurs de recherche, un post-doctorant et 04 doctorants. Ces derniers travaillent en synergie sur trois grands projets principaux que sont : la Climatisation Solaire (CLIMSOL), la Plateforme Hybride d'Expérimentation d'un Générateur d'Electricité PV-Diesel de Kamboinsé (PHEGEK) et enfin le Concentrating Solar Power for Africa (CSP4Africa) sur lequel nous avons travaillé pour notre mémoire de Master.



I. PRESENTATION DU PROJET CSP4AFRICA

Le projet « Development of a Cost-effective, Modular and Dry Concentrating Solar Power for Africa : Design and Test of Components » est un projet qui vise à réaliser un démonstrateur de centrale solaire à concentration sur le site du 2iE à Kamboinsé. C'est un projet ayant un budget de plus d'un million d'euros financé par l'Union Africaine et l'Union Européenne. Il a été lancé en 2012 au Cap Vert sous le sigle CSP4Africa pour une durée de trois ans. Le 2iE à travers son laboratoire LESEE est le porteur du projet avec des partenaires que sont la société SIREA, le Centre des Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (ECREEE) et l'Energy Center de Kwame Nkrumah University du Ghana. Ce projet revêt de nombreuses innovations tant au niveau des miroirs qu'au niveau du groupe turbo-alternateur. Il comportera un stockage thermique d'une capacité de 100 kW thermique. L'objectif de notre stage est d'ailleurs de réaliser le dimensionnement de ce stockage thermique.

II. INTRODUCTION

Le soleil comme source d'énergie est, comme beaucoup d'autres sources d'énergie renouvelables, une ressource très variable aussi bien du point de vue de sa disponibilité dans le temps et dans l'espace que de son intensité. Dans le cas d'une centrale solaire à concentration, la chaleur provenant du soleil doit alimenter un ensemble d'équipements pour produire en bout de chaîne de l'énergie électrique. Le problème est qu'une variabilité de l'approvisionnement de ces équipements en chaleur peut entraîner leur destruction. Une solution possible est donc de stocker la chaleur quand elle est disponible en surplus. Cette chaleur est ensuite utilisée pour combler les déficits pouvant résulter d'une variation de l'énergie solaire disponible. L'approvisionnement est ainsi maintenu constant pour la protection des équipements.

L'efficacité d'un tel système de stockage requiert un dimensionnement des plus adaptés à la fois du point de vue de la localité du projet, de la forme d'énergie stockée que de la technologie de captage de l'énergie en question. Le point essentiel reste néanmoins la définition exacte du but ultime du stockage

1. Contexte

Le but du projet CSP4Africa est de mettre au point un prototype d'installation solaire à concentration utilisant des matériaux locaux. Une telle installation vise à avoir une énergie électrique d'origine solaire thermique avec un coût de revient assez bas pour être à la portée des pays africains et ainsi permettre d'améliorer l'accès à l'électricité aux populations africaines en constante paupérisation.

Le prototype de la centrale CSP4Africa est en cours de conception et d'installation sur le site K2 du campus 2iE de Kamboinsé. Le principe est décrit ci-après. Des miroirs permettent de capter le rayonnement solaire qu'ils réfléchissent sur une cible placée en hauteur appelée récepteur. Le récepteur est constitué d'un ensemble de tubulures peintes en noir où le rayonnement réfléchi est concentré. Cette chaleur est récupérée grâce à un fluide non vaporisable que l'on fait circuler dans ce système de tubulures. Ce fluide est appelé fluide de transfert de chaleur. Cette chaleur transportée par le fluide de transfert peut ensuite être utilisée pour produire de la vapeur qui sera ensuite détendue dans une turbine couplée à un alternateur pour produire de l'électricité.

L'enjeu de ce projet est donc de trouver les solutions les moins coûteuses permettant la réalisation de la centrale pour une électricité plus accessible pour l'Afrique.

2. Problématique

Parlant du « but du stockage », il faut comprendre « ce que l'on désire réaliser avec le stockage ».

En effet, dans le cas des installations solaires, le stockage de l'énergie consiste à accumuler pendant la journée une certaine quantité d'énergie pour l'utiliser soit au cours de la nuit (1) soit pendant des périodes aux conditions météorologiques défavorables (2). Pour le dernier cas, le stockage a une vocation d'assurer une continuité du service au cours de la journée. La notion de continuité est ici importante car, au-delà de la satisfaction du besoin, il y a la nécessité de protéger des équipements sensibles du procédé qui supportent mal les régimes transitoires à leurs bornes. Pour le cas des centrales solaires à concentration, l'enjeu se situe à deux niveaux. Le premier concerne le bloc thermodynamique où il est nécessaire d'éviter des variations brusques de régime au niveau de la turbine. Celles-ci peuvent amener la turbine à s'emballer, ce qui peut résulter en un choc mécanique fatal pour elle, constituant une perte financière importante. On peut donc, lorsque l'énergie fournie par le champ solaire n'est plus suffisante, réaliser un appoint d'énergie provenant d'un stockage préalable, ce qui permet de maintenir une puissance d'approvisionnement constante au bloc thermodynamique. On parle alors de stockage de gestion des intermittences. Le second enjeu a trait au récepteur du champ solaire dans les régions à forts passages nuageux. Une variation brusque du rayonnement réfléchi au récepteur entraîne une brutale variation de sa température, ce qui peut entraîner sa destruction. Dit autrement, le récepteur est fait de métal. Lorsque ce métal est soumis à des variations brusques de température il subit un choc thermique qui se traduit par l'apparition de contraintes au sein de la structure du matériau qui s'en trouve altérée. Il est donc possible de réaliser un stockage utilisant des matériaux capables de fournir une importante quantité d'énergie en un temps réduit (3) pour contrer les effets néfastes des variations de températures.

Pour en revenir au cas où le stockage est fait au cours de la journée pour permettre de continuer la production de l'électricité pendant la nuit, on parle de stockage de production. Il est toutefois important de souligner que le stockage de production peut être aussi utilisé pendant les jours nuageux (4). Mieux, il est possible de faire un stockage de production afin de réutiliser le stock pour produire l'électricité pendant des périodes de la journée où le prix de revente de celle-ci est plus élevé (5).

Selon le cas d'étude, l'on peut donc choisir de réaliser un stockage de production ou de gestion. Il reste néanmoins important de choisir de façon judicieuse la forme de stockage à mettre en œuvre pour correspondre au mieux au cas d'étude.

3. Objectifs du mémoire

L'objectif global de notre travail de mémoire est de réaliser la conception du système de stockage de la centrale solaire à concentration qui jusques-là n'a encore pas été réalisé. Pour ce faire, nos objectifs spécifiques seront de réaliser une revue bibliographique sur les méthodes de dimensionnement des systèmes de stockage thermique et d'en choisir une pour concevoir le stockage de la centrale CSP4Africa. Nous devons ensuite comparer les deux configurations à savoirs le système à un seul réservoir et celui à deux réservoirs afin de choisir la meilleure configuration pour le projet. Tout cela sera ensuite utilisé pour dimensionner le stockage de la centrale CSP4Africa. Notre travail s'achèvera avec l'étude des transferts thermiques et des actions mécaniques du ou des réservoir(s) de stockage et le dimensionnement des équipements annexes du stockage que sont les pompes et conduites.

4. Les formes de stockage

Il existe une grande variété de formes de stockage d'énergie. Mais dans notre cas, l'énergie disponible étant de la chaleur, nous n'allons nous intéresser qu'au stockage thermique. Cela peut se faire selon trois modes de stockage thermique : le stockage thermochimique, le stockage par chaleur latente et le stockage par chaleur sensible.

Malheureusement, l'énergie thermochimique reste une technologie rarement utilisée dans la pratique pour les installations solaires en raison du coût d'investissement élevé et du fait que ce mode est encore à l'état de recherche et donc n'est pas maîtrisé. Le stockage à chaleur latente quant à lui pose le problème du prix élevé des matériaux de stockage mais aussi de leur manque de pureté car étant souvent des mélanges dont les constituants peuvent se dissocier durant les cycles de charge/ décharge. Certains matériaux tels le NaOH peuvent réagir avec les huiles de transfert utilisés dans les collecteurs solaires thermiques. Tous ces problèmes, conjugués à la disponibilité et à la relative simplicité du stockage par chaleur sensible ont contribué à ce que le stockage par chaleur latente soit peu utilisé de façon générale, au profit des stockages par chaleur sensible (6).

5. Le stockage à chaleur sensible : différentes configurations possibles

Le principe du stockage par chaleur sensible est le suivant : du fluide froid contenu dans un réservoir isolé est chauffé avec de l'énergie en provenance des collecteurs du champ solaire. Dans la majeure partie des applications industrielles, le fluide employé dans les collecteurs est le même que celui provenant du réservoir. On parle alors de système de stockage direct. Lorsque le fluide de stockage est différent du fluide de transfert de la chaleur, on parle de stockage indirect. Ce système

présente l'avantage, contrairement au stockage indirect, de ne nécessiter aucun échangeur de chaleur à l'interface des collecteurs du champ solaire et du réservoir de stockage, ce qui induit une baisse significative du coût d'investissement du système. Les deux systèmes direct et indirect sont présentés dans la figure 3 avec à gauche un système indirect avec l'échangeur intégré entre le champ solaire et le stockage ; et sur la droite, un stockage direct sans aucun échangeur intermédiaire entre le champ et le réservoir de stockage. Le système de stockage indirect se présente sous deux configurations : le stockage à deux réservoirs et le stockage à un seul réservoir. Le stockage à deux réservoirs est de loin le plus utilisé et le plus maîtrisé (7). Dans cette configuration, pendant la phase de charge, le fluide froid est pompé du réservoir froid au récepteur où il emmagasine la chaleur avant d'être renvoyé au réservoir chaud. Pendant la phase de décharge, le fluide chaud est pompé du réservoir chaud vers un échangeur où il cède sa chaleur avant d'être renvoyé au réservoir froid. Lorsqu'on n'emploie qu'un seul réservoir pour le stockage, le processus est beaucoup plus compliqué. Pendant la phase de charge, le fluide froid est pompé du bas du réservoir vers le récepteur où il est chauffé avant de retourner au même réservoir par le haut. A contrario, la décharge se traduit par un pompage du fluide chaud du haut du réservoir qui va céder sa chaleur dans un échangeur et retourner au réservoir de stockage par le bas. Un phénomène de stratification suivant la température s'observe dans le réservoir, d'où le nom de réservoir thermocline. L'efficacité du système repose donc sur une bonne stratification de la température dans le réservoir. Le grand avantage de ce système réside dans l'économie du second réservoir et des vannes, pompes et tuyauteries qui lui sont associées (8). Par exemple, un thermocline utilisant des sels fondus permet de réduire la quantité de sels fondus nécessaire de plus de 25% et le volume du réservoir de 60% comparativement à un système de stockage à deux réservoirs (4). La figure 1 présentée ci-dessous schématise une centrale solaire à concentration intégrant un système de stockage thermique thermocline. Le champ d'héliostat capte le flux solaire qu'il concentre au niveau du récepteur. A partir du bas du réservoir de stockage le fluide stocké est froid. Il est pompé et envoyé au récepteur où il récupère la chaleur et revient au même réservoir par le haut. A ce système thermocline on oppose le système à deux réservoirs présenté dans la figure qui représente un stockage à deux réservoirs à base de sels fondus. Du bac froid, le sel froid est envoyé au récepteur où il est chauffé puis renvoyé au bac chaud. C'est à partir de ce bac chaud que le sel sera prélevé et envoyé au générateur de vapeur qui est un échangeur de chaleur. En entrée de cet échangeur nous avons d'une part de l'eau et d'autre part le sel chaud. En sortie nous avons le sel refroidi et de la vapeur surchauffée. La vapeur alimente le groupe turboalternateur et le sel fondu refroidi va au bac de sel froid.



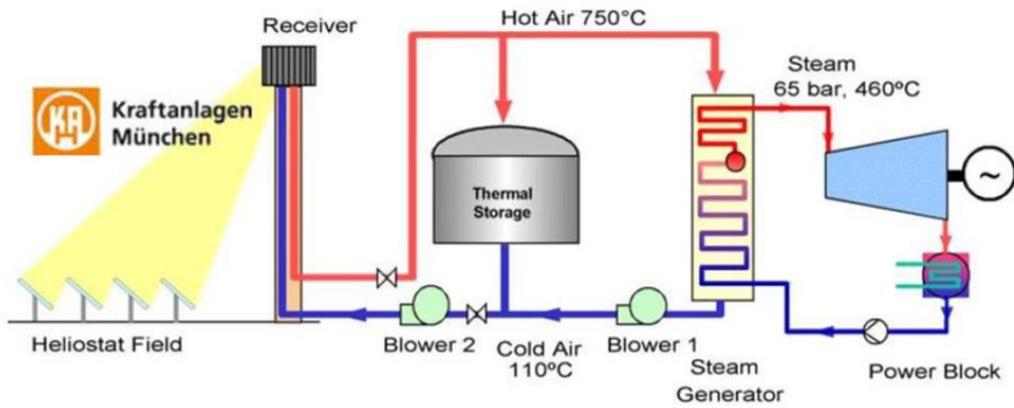


Figure 1 Stockage thermique thermocline (9)

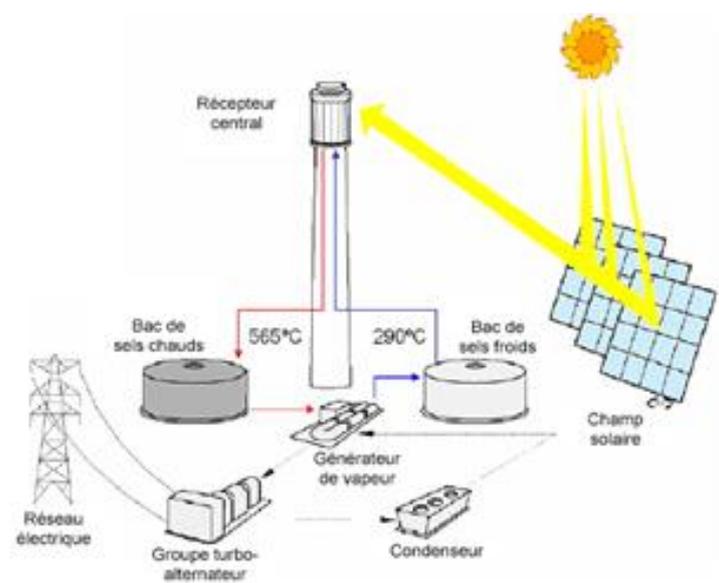


Figure 2. Stockage à deux réservoirs (10)

Deux notions importantes sont évoquées dans la littérature pour caractériser la manière dont le matériau de stockage stocke l'énergie. Lorsque le matériau est « statique dans le réservoir et emmagasine l'énergie par le biais d'un fluide de travail qui le traverse et échange avec lui la chaleur sans qu'il soit mis en mouvement dans le circuit, il s'agit d'un stockage passif. C'est l'exemple des réservoirs à lits fixes. Dans ce système, le réservoir est garni de roches et traversé par des tubes contenant le fluide de travail qui va ainsi échanger la chaleur avec le lit rocheux. L'air est souvent employé dans ce type de stockage comme fluide caloporteur.

Plus généralement, le stockage thermique passif utilise des matériaux liquides (stockage par chaleur sensible par des sels fondus), solides et des matériaux à changement de phase (stockage par chaleur latente). Il n'y a qu'un seul réservoir utilisé à la fois pour le matériau chaud et le matériau froid ; c'est donc une configuration associée aux réservoirs thermoclines. Par opposition au stockage passif, le stockage est dit actif lorsque le matériau est mis en mouvement dans le circuit. Il peut être observé dans les deux configurations de système de stockage : le stockage à deux réservoirs et les thermoclines.

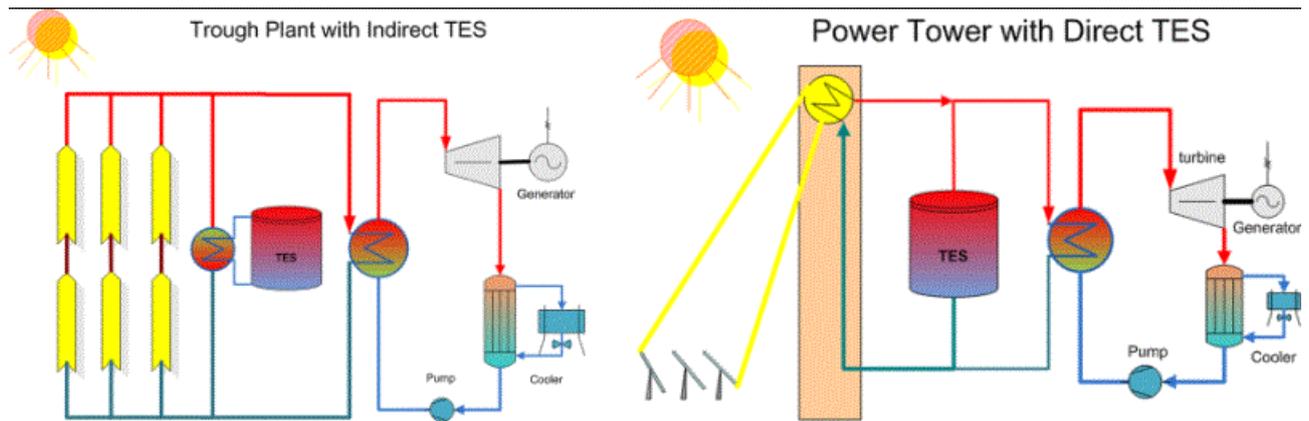


Figure 3. Systèmes direct et indirect de stockage thermique (11)

I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES METHODES DE DIMENSIONNEMENT

Une bonne démarche de dimensionnement pour un stockage est un processus itératif qui devrait avoir pour objectif la conception d'un système techniquement réalisable et efficace, économiquement viable avec des impacts environnementaux moindres (12). La démarche de dimensionnement se construit autour de trois éléments majeurs : la ressource de laquelle dépendent l'énergie mobilisable, l'unité de stockage et ses équipements connexes. Un aperçu sur les travaux de certains auteurs autour de ces sujets permettra d'entrevoir la démarche de dimensionnement des systèmes de stockage thermique pour les CSP.

1. La ressource solaire

La vocation d'un système de stockage est de recueillir l'énergie lorsqu'elle est disponible au-delà des exigences du besoin, et de la conserver afin de l'employer pendant les périodes où la ressource solaire n'est pas suffisante ou disponible pour couvrir la demande. Le fonctionnement d'une centrale solaire à concentration suppose que l'on dispose d'une part d'un ensoleillement direct, et d'autre part que cet ensoleillement soit suffisant. La prédiction de l'ensoleillement et donc de la disponibilité de la ressource est donc de mise pour le dimensionnement d'une centrale solaire à concentration, en particulier pour celui du stockage. Cette prédiction se fait sur la base de mesures passées des ensoleillements sur le site du projet ou dans une localité voisine de celui-ci (13); ce qui permet d'établir des courbes de l'ensoleillement en fonction du temps sur une journée. Ces courbes décriraient donc une journée type qui sera utilisée comme « journée-base de dimensionnement ».

2. Estimation de l'énergie mobilisable

L'estimation de l'ensoleillement journalier ne suffit pas pour déterminer l'énergie totale disponible pour le stockage. En effet, le circuit est constitué d'équipements qui dégradent l'énergie, introduisant des notions de rendement des équipements. Ceux-ci sont les collecteurs et le récepteur, mais aussi les conduites.

Penser la conception de l'unité de stockage requiert de déterminer la politique de stockage : quand débiter la charge du réservoir, combien de temps charger, quand décharger, etc.

Une notion intéressante a été développée par des auteurs comme John Duffie et Beckman (12): l'utilisabilité. L'utilisabilité repose sur la définition d'un niveau critique d'ensoleillement. Un bilan d'énergie sur le collecteur permet d'affirmer que la quantité d'énergie utile d'un collecteur est égale à la différence de l'énergie totale qu'elle absorbe et de ses pertes. L'ensoleillement incident critique (I_{TC}) se définit donc comme étant la valeur pour laquelle l'énergie utile du collecteur est nulle ; c'est-à-dire que les pertes sont égales à l'énergie totale reçue. Dès lors que l'ensoleillement incident dépasse cette valeur critique, l'énergie utile n'est plus nulle. L'utilisabilité pour un instant t est donc la fraction d'énergie au-dessus du niveau critique ; elle varie de 0 à 1 et est donnée par l'équation (0-1). Φ_h L'utilisabilité qui est égal au rapport de l'écart entre le rayonnement incident au temps T et le rayonnement incident critique et le rayonnement incident au temps T .

$$\Phi_h = \frac{I_t - I_{tc}}{I_t} \quad (0-2)$$

Une notion semblable est utilisée dans le système de stockage du projet OptiEnR du laboratoire PROMES (13). De ce fait, un seuil de début de charge est défini comme étant la valeur de DNI à partir de laquelle l'énergie est disponible. A ce seuil correspond une puissance seuil égale au produit des rendements du champ solaire et du récepteur avec la surface du champ solaire et la valeur du rayonnement direct au mètre carré.

$$P_{\text{seuil}} = \text{DNI} \cdot R_{cs} \cdot R_r \cdot S_{cs} \quad (0-3)$$

Une fois le seuil de stockage fixé, nous allons graphiquement fixer la puissance thermique requise au bloc thermodynamique. Cette puissance représente la puissance maximale que devra fournir le réservoir de stockage

La différence entre cet objectif de puissance à fournir pour satisfaire la demande et la puissance réellement disponible nous donne le manque ou le surplus de puissance. Sur la figure 4 est une illustration de la méthode exposée plus haut. La courbe la plus haute présente un exemple de l'évolution de la demande d'électricité au cours de la journée. Plus bas, la courbe en cloche représente le profil de l'ensoleillement direct disponible sur le site considéré. Entre 8h et 17h, l'énergie est stockée. Entre 17h et 22h, elle est réutilisée.

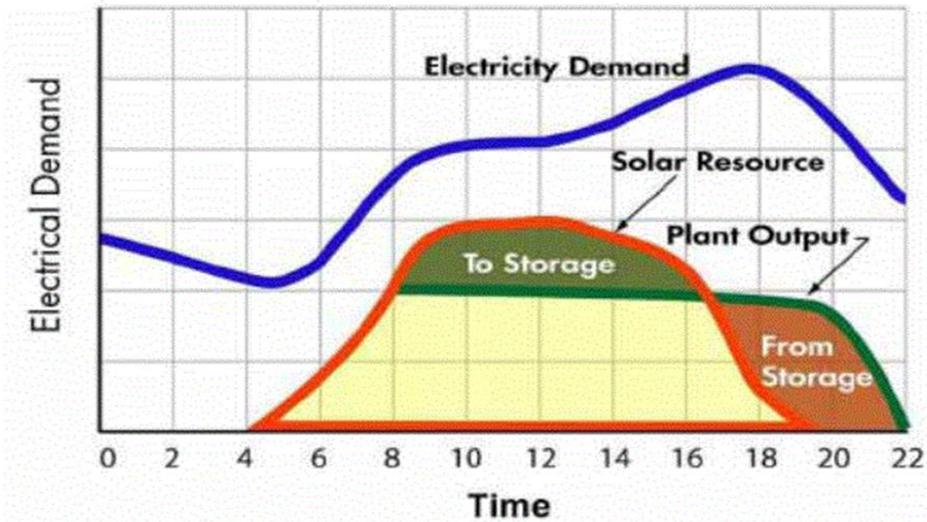


Figure 4: Profil d'ensoleillement et enjeu du stockage (14)

On peut alors tracer le profil journalier de puissance disponible. L'intégration de ce profil nous permet de connaître l'énergie totale exploitable pour produire l'électricité.

3. L'unité de stockage

- **La géométrie du réservoir**

Du point de vue de la contrainte due au vent et de celle de la pression hydrostatique du fluide stocké sur les parois, la forme sphérique est la plus indiquée. Toutefois, sa fabrication reste délicate. De plus, implanter un réservoir sphérique suppose la construction d'un berceau sur lequel reposera la sphère. Pour simplifier, nous optons pour une géométrie cylindrique qui présente aussi les avantages d'offrir moins de prise au vent et une bonne résistance à la pression hydrostatique tout en nécessitant peu de matériaux pour sa fabrication. C'est d'ailleurs une géométrie usuelle pour les réservoirs de stockage dans les centrales solaires à concentration (15) avec cependant un toit en forme conique qui permet d'atténuer l'effet de la dilatation du matériau du réservoir.

C'est donc sur cette même base que nous travaillerons. L'enjeu est alors de déterminer la hauteur et le diamètre de notre réservoir. Un diamètre élevé correspond à une surface de base importante et donc, pour une configuration verticale, l'encombrement au sol est plus élevé. Plus l'encombrement est élevé, plus le terrassement est important et le coût de la fondation est élevé. Il faut en plus tenir compte des pertes thermiques sur la surface latérale, sur le toit et sur la base avec pour objectif d'adopter les dimensions qui permettent d'avoir le moins de pertes thermiques possibles.

- **La construction du réservoir**

Le réservoir est construit de la façon suivante : une couche de base métallique qui constitue la matrice du stockage, suivie d'une ou de plusieurs couches d'isolation et enfin une mince couche métallique de protection extérieure (16) . La couche isolante est renforcée par une fine couche protectrice de feuille métallique en acier galvanisé ou zinc / aluminium (17). Un exemple de réservoir présente la configuration présentée sur la figure 5 avec une charpente métallique de base parcourue par des tuyauteries tant au niveau du bas que du haut. Le matériau stocké est composé à la fois de gravier, sable et huile. L'enveloppe de base est métallique et est recouverte d'une isolation. Le toit a une forme conique et est équipé d'un tube d'évent.

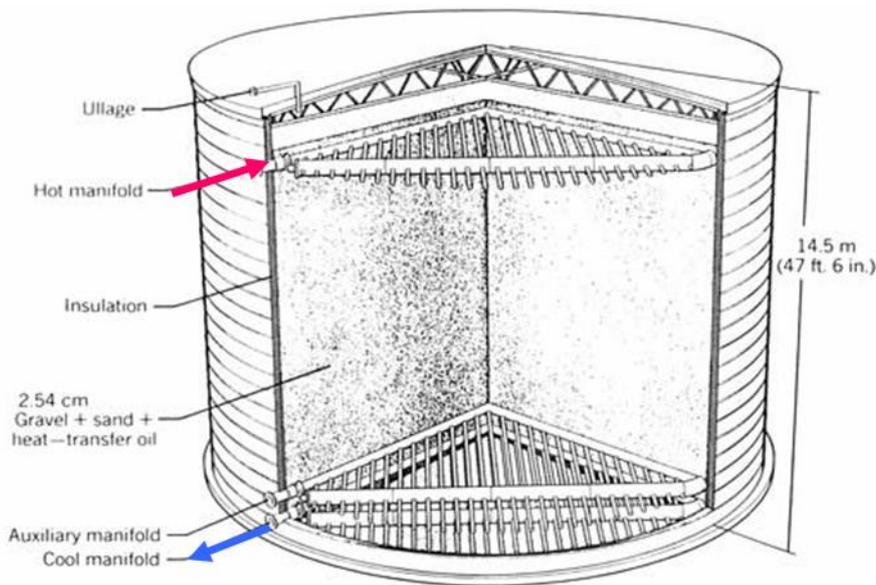


Figure 5 Aperçu de la constitution d'un réservoir de stockage thermique

- **Les matériaux**

Le matériau utilisé pour la matrice doit être à même de supporter les contraintes thermiques du système à savoir la température du fluide stocké. Cela signifie que les déformations du réservoir à la température du fluide doivent rester inférieures à la limite élastique du matériau pour éviter les déformations plastiques et les ruptures. De façon générale, les réservoirs utilisés pour le stockage thermique dans les CSP sont en acier inoxydable, en acier au carbone ou en acier alliés spéciaux. Quant à l'épaisseur de la paroi, elle sera déterminée en fonction de la pression hydrostatique du fluide sur le réservoir et de la résistance du matériau choisi à la température de service du réservoir.

- **L'isolation**

Le dimensionnement du réservoir doit tenir compte des déperditions thermiques dont le réservoir sera le siège. C'est pourquoi l'isolation est un impératif. Les isolants tels la laine de roche, la laine de verre ou de laitier peuvent être utilisés (18).

- **Étude des transferts thermiques**

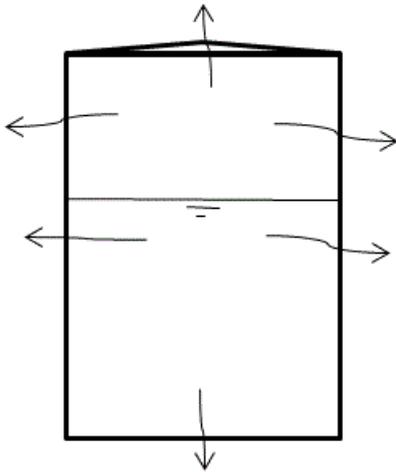


Figure 6 Pertes thermiques dans un réservoir cylindrique

Tout réservoir de stockage est soumis à des transferts de chaleur tant au niveau du mur latéral que du toit et de la base comme présenté sur la figure 6.

Jimmy Kumana a exposé une démarche itérative permettant la prédiction des transferts thermiques pour des réservoirs cylindriques à base plane et à toit conique. La démarche est la suivante. On fait des hypothèses sur la température de la paroi interne et de la paroi externe du réservoir et sur la température ambiante. On calcule alors les nombres adimensionnels de Grashof, de Prandtl et de Nusselt qui permettent le calcul des coefficients de convection intérieure et extérieure de chaque surface (toit, base et surface latérale). Ces calculs sont faits grâce aux équations (II-9) à (II-14).

$$\text{Gr} = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad (0-4)$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (0-5)$$

En fonction de la géométrie de l'interface d'échange on a les équations suivantes :

$$\mathbf{Nu} = 0,138 \cdot \text{Gr}^{0,36} \cdot (\text{Pr}^{0,175} - 0,55) \quad (0-6)$$

(Valable pour la convection intérieure sur la surface latérale du réservoir).

$$\mathbf{Nu} = 0,14 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,33} \quad (0-7)$$

(Surfaces horizontales avec convection en dessous)

$$\mathbf{Nu} = 0,27 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \quad (0-8)$$

(Surfaces horizontales avec convection au-dessus)

L'équation (II-14) permet de déterminer le coefficient de convection.

$$\mathbf{Nu} = \frac{\mathbf{h} \cdot \mathbf{L}}{\lambda} \quad (0-9)$$

A partir de cette première approximation des coefficients de convection, les équations II-15 et II-16 permettent respectivement de calculer les résistances thermiques, les pertes thermiques pour chaque surface calculées en II-17, II-18 et II-19.

$$\mathbf{q}_{admi} = \left(\mathbf{h}_i + \mathbf{h}_e + \frac{2 \cdot \pi \cdot \mathbf{L} \cdot \lambda}{\ln((\mathbf{r}+e)/(\mathbf{r}))} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \mathbf{L} \cdot \lambda_{is}}{\ln((\mathbf{r}+e_{is}+e)/(\mathbf{r}+e))} \right) \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{T}_L - \mathbf{T}_a) \quad (0-10)$$

$$\mathbf{A}_m = \pi \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{L} \quad (0-11)$$

$$\mathbf{A}_{tr} = \left(\frac{\pi \cdot \mathbf{D}}{2} \right) \cdot \left(\frac{\mathbf{D}^2}{4} + \mathbf{d}^2 \right)^{1/2} \quad (0-12)$$

$$\mathbf{A}_b = \left(\frac{\pi \cdot \mathbf{D}^2}{4} \right) \quad (0-13)$$

On fait un bilan thermique sur la paroi du réservoir pour le toit, la base et la surface latérale.

Il n'y a pas de génération de chaleur dans la paroi du réservoir. En considérant qu'aucune accumulation de chaleur n'a lieu dans la paroi du réservoir, on arrive à écrire les équations (II-20) qui déterminent la température de la paroi interne et celle de la paroi externe pour le toit (même principe pour la base et la surface latérale).

$$\begin{aligned}
 q_{tr} &= U_{tr} \cdot A_{tr} \cdot (T_L - T_a) \\
 q_{tr} &= h_i \cdot A_{tr} \cdot (T_L - T_{mi}) \\
 q_{tr} &= h_e \cdot A_{tr} \cdot (T_{me} - T_a)
 \end{aligned}
 \tag{0-14}$$

Ces équations (II-20) signifient que la déperdition thermique par convection extérieure est égale à la perte par convection intérieure et aussi égale à la chaleur transférée par conduction.

Nous estimons une valeur initiale de température de paroi interne. En utilisant les équations (II-9) à (II-20) nous parvenons à calculer le flux de chaleur dû à la convection intérieure et celui dû à la convection extérieure que nous comparons. Nous itérons le procédé jusqu'à ce que les deux valeurs de flux de chaleur s'équivalent au 1/100^{ème} près. Nous interrompons alors les itérations. Le flux de chaleur trouvé est la perte thermique de notre réservoir isolé.

- **Sa capacité**

Un bilan de masse sur le réservoir permet de déterminer le volume de fluide stocké qui est une fonction du temps. La formule du bilan de masse est donnée par l'équation II-4 et signifie que la masse stockée dans le réservoir donnée par le produit de la masse volumique du fluide et de la variation du volume avec le temps est égale à la différence entre le débit entrant dans le réservoir et le débit sortant. L'utilisation de cette formule est surtout pertinente dans le cas où la charge et la décharge se fait de façon simultanée.

$$\rho_f \cdot \frac{dV}{dt} = q_{m1} - q_{m2}
 \tag{0-15}$$

La solution V de cette équation est ensuite utilisée dans un bilan d'énergie (équation II-5) sur le réservoir avec pour inconnue la température T du fluide en sortie du réservoir. Le premier membre de l'équation représente l'énergie stockée dans le réservoir. Cette énergie correspond à la différence entre la variation d'enthalpie entre l'entrée et la sortie du réservoir et l'énergie perdue par le réservoir. L'énergie perdue s'obtient en multipliant le coefficient global d'échange U du réservoir par la surface d'échange de celui-ci et la différence entre la température du fluide stocké et la température ambiante.

$$\rho_f \cdot C_p \frac{d(VT)}{dt} = C_p \cdot (T_1 q_{m1} - T_2 q_{m2}) - U \cdot S \cdot (T - T_a) \quad (0-16)$$

Les hypothèses sont que le réservoir est cylindrique, le débit d'entrée du réservoir froid est égal au débit de sortie du réservoir chaud et réciproquement ; et enfin la masse volumique est supposée constante. La détermination du volume de stockage est donc faite à partir de la quantité d'énergie totale stockée dans le réservoir chaud exprimée par l'équation (II-6). La chaleur stockée Q_{st} est égale au produit de la masse m de fluide, de sa capacité calorifique C_p et de la variation de température ΔT entre le réservoir chaud et le réservoir froid.

$$Q_{st} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (0-17)$$

La masse étant égale au produit de la masse volumique ρ et le volume V, nous remplaçons la masse dans l'équation II-6 par son expression donnée par l'équation II-7.

$$m = \rho \cdot V \quad (0-18)$$

On déduit l'expression du volume qui est le quotient de l'énergie stocké et du produit de la masse volumique ρ , de la capacité calorifique C_p et de la différence de température ΔT .

$$V = \frac{Q_{st}}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} \quad (0-19)$$

4. Les équipements connexes : pompes et conduites

Les systèmes de stockage nécessitent l'usage d'équipements annexes tels les pompes de circulation des fluides. La circulation du fluide caloporteur se fera d'un organe à l'autre de la centrale grâce à des conduites. Le matériau des conduites devra supporter la température du fluide, les actions mécaniques dues à la dilatation du fluide en fonction de la température, mais aussi sa dilatation propre qui ne doit pas dépasser le seuil de la déformation élastique au risque que ces déformations deviennent permanentes et aient des répercussion sur l'écoulement dans les conduites. La recherche d'un optimum technico-économique devrait nous amener à rechercher le diamètre qui nous permet d'avoir une conduite à moindre cout avec ses éléments accessoires, tout en ayant une pompe dont le cout de fonctionnement sur toute sa durée de vie est le plus bas possible. La démarche de cette étude technico-économique est exposée dans ce qui suit. Elle consiste à tracer la courbe d'évolution du prix de la conduite en fonction du diamètre d'une part, et d'autre part la courbe d'évolution du cout de fonctionnement de la pompe correspondante. L'étape finale étant la sommation de ces deux courbes pour trouver le minimum qui serait notre diamètre optimal. Le graphique obtenu grâce à cette méthode est selon le format de la courbe de la figure 7 avec en abscisse le diamètre de la conduite, en ordonnée le prix. La courbe quasi linéaire représente le cout de la conduite qui augmente avec son diamètre. La seconde courbe qui lui est sécante représente le cout du fonctionnement de la pompe. Ce cout évolue en sens inverse avec le diamètre. Les grands diamètres induisent des pertes de charges plus et partant, des puissances et donc des couts de fonctionnement plus faibles que les petits diamètres. La courbe la plus haute est la somme des couts des conduites et de fonctionnement de la pompe. Son minimum représente le diamètre optimal recherché.

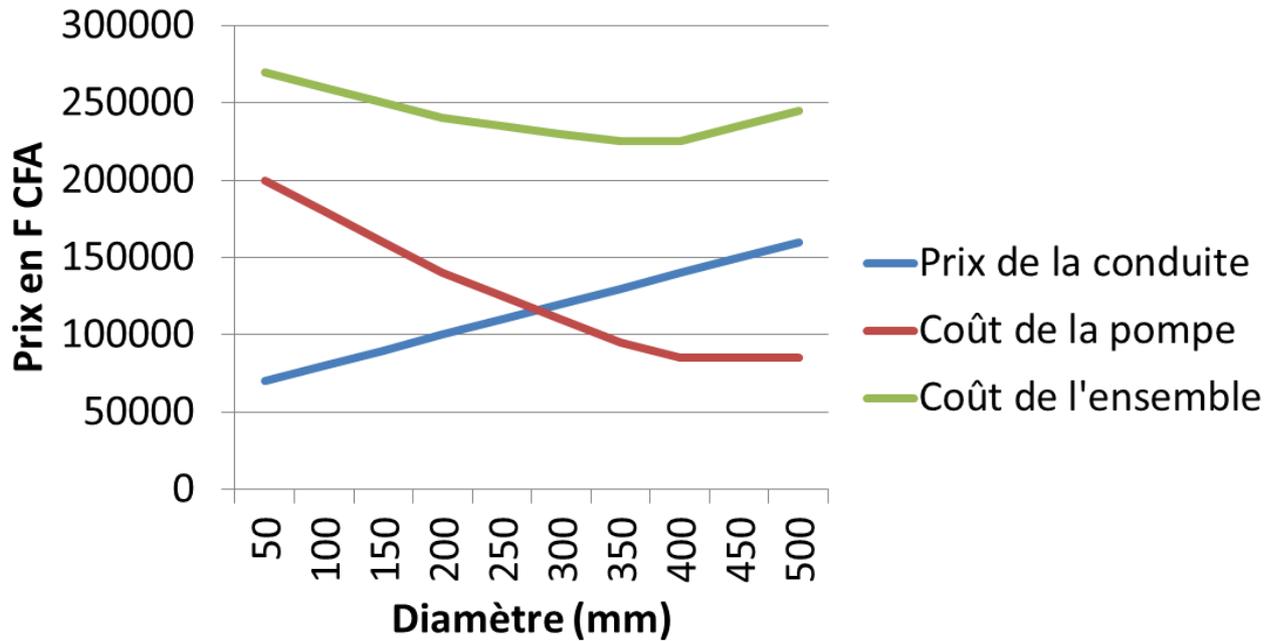


Figure 7: Courbe illustrative du cout de l'ensemble (conduite + pompe) en fonction du diamètre

La méthodologie adoptée pour ce calcul est exposée dans l'annexe I.

5. Réglementation sur les systèmes de stockage haute température

Les installations de stockage de produits hydrocarbures et dérivés sont soumises à une réglementation et au contrôle du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB) à travers sa Direction de la sécurité industrielle, des hydrocarbures et des mines. Cette réglementation inclut les obligations constructives et sécuritaires suivantes :

- **Obligations constructives**

Les unités de stockage de moins de 6 m³ sont soumises à une réglementation limitée. La norme constructive est présentée sur la figure 8 ci-dessous. Le réservoir est implanté sur un berceau en béton armé et l'ensemble est sécurisé dans un bassin de rétention construit tout autour, avec un fonds imperméabilisé. Le berceau a un rôle de socle pour le réservoir tandis que le bassin de rétention a pour but de contenir le fluide stocké en cas de fuite, limitant ainsi l'impact sur l'environnement. Le bassin devra être muni d'un dispositif de pompage pour permettre l'évacuation du fluide vers le réservoir éventuellement. Son volume doit être égal au volume du réservoir de stockage.

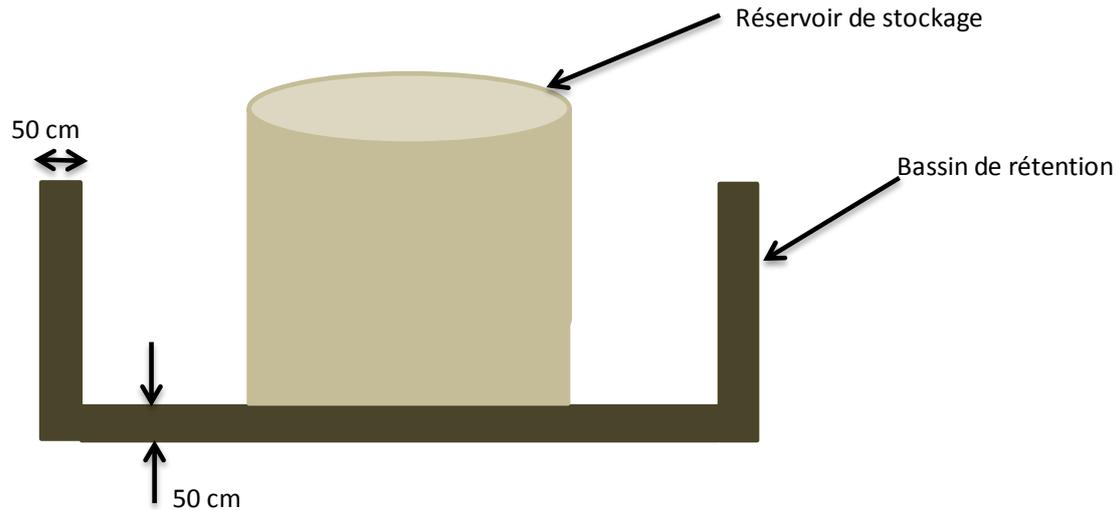


Figure 8 Configuration obligatoire du réservoir (20)

Au sujet du réservoir en lui-même, il doit être construit en tôle d'acier d'épaisseur minimale de 5 mm, avec un enduit anticorrosion.

- **Sécurité de l'installation**

L'unité de stockage doit être équipée d'une prise de terre de résistance d'isolement inférieure à 100 Ω . Un système de détection des fuites et un dispositif de jaugeage devront aussi être mis en place. Le dernier volet a trait à la sécurité incendie et requiert une caisse de sable sec (150 kg), une pelle de projection et des extincteurs 9 kg à poudre ABC ou un équivalent tel ceux à bromure de méthyle.

- **Validation de l'installation**

Un contact devra être établi entre le chaudronnier en charge de la conception du réservoir et le BUMIGEB avant la mise en place du réservoir pour un essai de résistance du réservoir à l'eau ou à l'air sous une pression de 1 bar. Une fois la résistance validée, ils doivent procéder à un test d'étanchéité à la mise en place de l'unité de stockage. Ce test d'étanchéité sera mené avec le liquide stocké à la pression atmosphérique. Une fois l'étanchéité vérifiée, on procède à la mise en place de l'unité puis à un nouveau test d'étanchéité avant sa mise en service. Des procès-verbaux des différents essais devront être faits par le BUMIGEB qui délivrera un certificat de conformité avant la mise en service de l'installation.

III. MATERIELS ET METHODES

L'essentiel de notre travail a été effectué avec le tableur Excel qui est un tableur intégrant des fonctions mathématiques de calcul et d'analyse. Nous avons, pour notre étude, utilisé ces fonctions et l'utilitaire d'analyse pour effectuer certaines simulations.

Nous allons donc dans ce qui suit exposer notre méthode de dimensionnement de façon détaillée.

1. Justification du choix du système de stockage

- **Le système de stockage**

Nous avons choisi de réaliser un stockage à chaleur sensible à deux réservoirs en raison du fait que cette technologie est largement utilisée pour les applications dans les centrales solaires à concentration et que la technologie est mature. Le système sera direct afin d'éviter le recours aux échangeurs très coûteux. Le même fluide sera donc employé à la fois pour le transfert et pour le stockage de la chaleur. Etant donné que nous nous intéressons à un stockage de gestion, notre souci doit être la conception d'un système réactif. Le fluide employé doit donc avoir la capacité de restituer facilement et rapidement l'énergie. Les stockages à base d'huile répondent très bien à ce critère de réactivité.

- **Choix de l'huile**

Le choix de l'huile doit intégrer aussi bien des critères technico-économiques que des critères de disponibilité. Le fluide recherché doit présenter une stabilité à la température de service, avoir un coût relativement abordable. La disponibilité sur le marché local serait un plus.

Pour le cas de notre système de stockage, le fluide de stockage retenu dans les spécifications du cahier de charges est la SERIOLA, fournie par le Groupe Total Burkina.

2. Estimation de l'énergie disponible

Nous avons estimé l'énergie disponible grâce à une analyse fréquentielle de mesures d'ensoleillement. L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les occurrences mesurées d'un phénomène afin d'en estimer les probabilités d'apparition future qu'on appelle fréquence d'apparition. Le pas de temps des mesures est la minute ; les mesures s'étendent sur deux années consécutives à savoir 2012 et 2013 et elles nous sont fournies par l'équipe météo du LESEE. Une analyse fréquentielle pertinente requiert en réalité une série de données sur plusieurs années mais la station de Kamboinsé ne dispose que des données des deux dernières années. Nous réorganisons les données de façon à ne considérer que les données allant de

5 h 30 à 18 h 30 car elle correspond à la période de la journée où les mesures sont significatives - les autres plages de temps se caractérisent par des mesures négatives. Nous obtenons donc 781 séries correspondant chacune à une minute (exemple : série de 5 h 30, série de 5 h 31...) de la plage spécifiée. Chaque série comprend au plus 731 valeurs (deux ans de données). Chaque série est étudiée de façon indépendante des autres, l'idée étant d'étudier la distribution de l'ensoleillement à chaque instant de la journée sur deux ans. Pour une même série, les données sont triées et rangées par ordre croissant ; chaque individu de la série est ensuite affecté d'un rang : le plus petit de la série correspond au rang 1 et le plus grand à un rang n égal à l'effectif de la population de la série. L'étape qui suit est celle du calcul de la fréquence empirique. Cette fréquence permet d'estimer le temps de retour : par exemple une fréquence de 50% (correspond à la médiane) indique une probabilité de non-dépassement de la valeur d'ensoleillement un jour sur deux à une heure donnée. L'équation (II-21) permet le calcul de la fréquence empirique.

$$f = \left(\frac{r - n}{\text{Eff}} \right) \quad (0-1)$$

n est compris entre 0 et 0.5. Une fois le calcul des fréquences effectué, nous déduisons les valeurs d'ensoleillement direct correspondant aux fréquences que nous nous choisissons comme fréquences de référence. Cette déduction se fait par interpolation linéaire. Pour ce faire, on suppose que les fréquences suivent une progression linéaire. Une petite partie des résultats de ce travail est donnée en annexe II.

3. Energie mobilisable

L'estimation de la quantité d'énergie mobilisable est faite sur la base d'une journée type d'ensoleillement. Le choix d'une fréquence de référence des ensoleillements permet d'avoir le profil journalier type.

La valeur de la puissance disponible par pas de temps est donc multipliée par le rendement du champ solaire et du récepteur à ce temps pour donner la valeur de l'énergie récupérée en sortie. Fixer la consigne de production thermique en termes de puissance et la plage de temps pendant laquelle a lieu la production permet d'estimer la nécessité ou non de stockage , la quantité d'énergie nécessaire pour lisser la courbe de puissance, les plages de temps pendant lesquelles la charge du stockage est possible et enfin le temps de cette charge.

4. L'unité de stockage

Le volume de l'unité est calculé selon l'équation (II-22) :

$$V = \left(\frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} \right) \quad (0-2)$$

La forme géométrique choisie est la forme cylindrique.

- **Étude des transferts thermiques**

Le calcul des coefficients de convection se fait suivant la méthode exposée dans la section 6 et un exemple de calcul est exposé dans l'annexe III.

Nous utilisons les résultats de cette méthode afin de déterminer les dimensions de notre réservoir.

- **Détermination du diamètre et de la hauteur du réservoir**

Nous dimensionnons un réservoir de stockage de chaleur. Il est impératif pour nous de concevoir l'unité de stockage de façon à minimiser les déperditions thermiques. La quantité de chaleur perdue n'est cependant pas la même selon qu'il s'agisse du toit, du mur latéral ou de la base du réservoir. Nous choisissons donc de trouver le diamètre et la hauteur de façon à minimiser les pertes thermiques. Nous utilisons donc l'outil « solveur » de Microsoft Excel que nous paramétrons comme suit. Les données variables sont le diamètre et la hauteur. L'objectif fixé est que la somme des pertes thermiques calculées sans isolation soit minimale. La contrainte est que le diamètre et la hauteur trouvés soient tels que le volume soit égale au volume calculé avec l'équation II-22.

$$q_{\text{tot}} = q_{\text{tr}} + q_{\text{b}} + q_{\text{m}} \quad (0-3)$$

- **Choix du matériau du réservoir**

Le matériau du réservoir doit pouvoir supporter la température du fluide stocké sans subir des déformations irréversibles. Il doit aussi pouvoir résister à la pression qui s'exerce sur le réservoir et qui est la somme de la pression hydrostatique du liquide et de la pression au-dessus du liquide dans le réservoir donnée l'équation (II-24) sans rupture. Le calcul de cette pression permettra de s'assurer qu'elle est inférieure à la contrainte admissible du matériau, c'est-à-dire la pression maximale que peut supporter le matériau sans déformation irréversible

$$p = \rho \cdot g \cdot h + \Delta p \quad (0-24)$$

- **Détermination de l'épaisseur minimale de la paroi**

Nous rappelons que dans le domaine du génie civil, les normes d'usage au Burkina Faso sont les normes européennes.

Le calcul de l'épaisseur minimal e_{\min} de la paroi se fait grâce à l'équation (II-25) selon la norme EN 14015 sur les réservoirs de stockage (21). h est la hauteur du fluide dans le réservoir, ρ_f la masse volumique, p la pression qui s'exerce sur les parois du réservoir, r le rayon du réservoir et σ la contrainte admissible du matériau du réservoir.

$$e_{\min} = \frac{2 \cdot r \cdot (98 \cdot \rho_f \cdot (h - 0,3) + p)}{20 \cdot \sigma} \quad (\text{II-24})$$

- **Isolation du réservoir**

Nous nous proposons de calculer notre réservoir de sorte à réduire les pertes thermiques à une limite admissible de 10 % de la capacité maximale du réservoir, soit un maximum de pertes thermiques de 10 kWh pour un stockage de la chaleur pendant 24 h. L'épaisseur est calculée grâce au solveur d'Excel. La formule de base est donnée en (II-25) et l'inconnue est l'épaisseur d'isolant e_{is} .

$$q_{admi} = \left(h_i + h_e + \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda}{\ln((r + e)/(r))} + \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{is}}{\ln((r + e_{is} + e)/(r + e))} \right) \cdot A \cdot (T_L - T_a) \quad (\text{II-25})$$

- **Bilan thermique sur l'huile**

Le bilan d'énergie instantané se traduit par l'équation (II-26).

$$\rho_f \cdot C_p \frac{d(VT)}{dt} = C_p \cdot (T_1 q_{m1} - T_2 q_{m2}) - U \cdot A \cdot (T_0 - T_a) \quad (\text{0-6})$$

Les débits q_{m1} et q_{m2} étant égaux, nous obtenons l'équation simplifiée suivant :

$$\frac{d(VT)}{dt} \cdot \frac{1}{T_0 - T_a} = - \frac{U \cdot A_t}{\rho_f \cdot C_f} \quad (\text{0-7})$$

L'intégration de ce bilan nous donne l'expression de la température de l'huile en fonction du temps.

$$(T - T_a) \cdot \frac{1}{T_0 - T_a} = - \exp \left(- \frac{U \cdot A}{\rho_f \cdot C_p} \cdot t \right) \quad (\text{0-8})$$



5. Les conduites et les pompes

Les conduites et pompes sont calculées suivant la méthodologie exposée en annexe I.

IV. RESULTATS

La proposition de schéma faite par l'équipe du projet CSP4Africa est présentée sur la figure 10. Le récepteur est surélevé, et relié aux deux réservoirs de stockage par deux circuits de tuyauteries. Du réservoir froid le fluide est froid et monte au récepteur où il récupère la chaleur. Deux options sont alors possibles : lorsque le réservoir chaud est en cours de charge, le fluide chauffé au récepteur va au réservoir chaud où il est stocké. Lorsque le fluide est déchargé de ce réservoir, il va céder sa chaleur à un autre fluide via un échangeur. La seconde option a cours en dehors des périodes de charge. Le fluide chaud provenant du récepteur est alors acheminé directement vers l'échangeur où il cède sa chaleur. La stratégie ici décrite n'est pas définitive car une autre possibilité envisagée est que la charge du réservoir chaud se fasse en parallèle à l'alimentation directe de l'échangeur. Le fluide provenant du récepteur est donc scindé en deux parties : l'une d'elles allant directement alimenter l'échangeur et la seconde étant stockée.

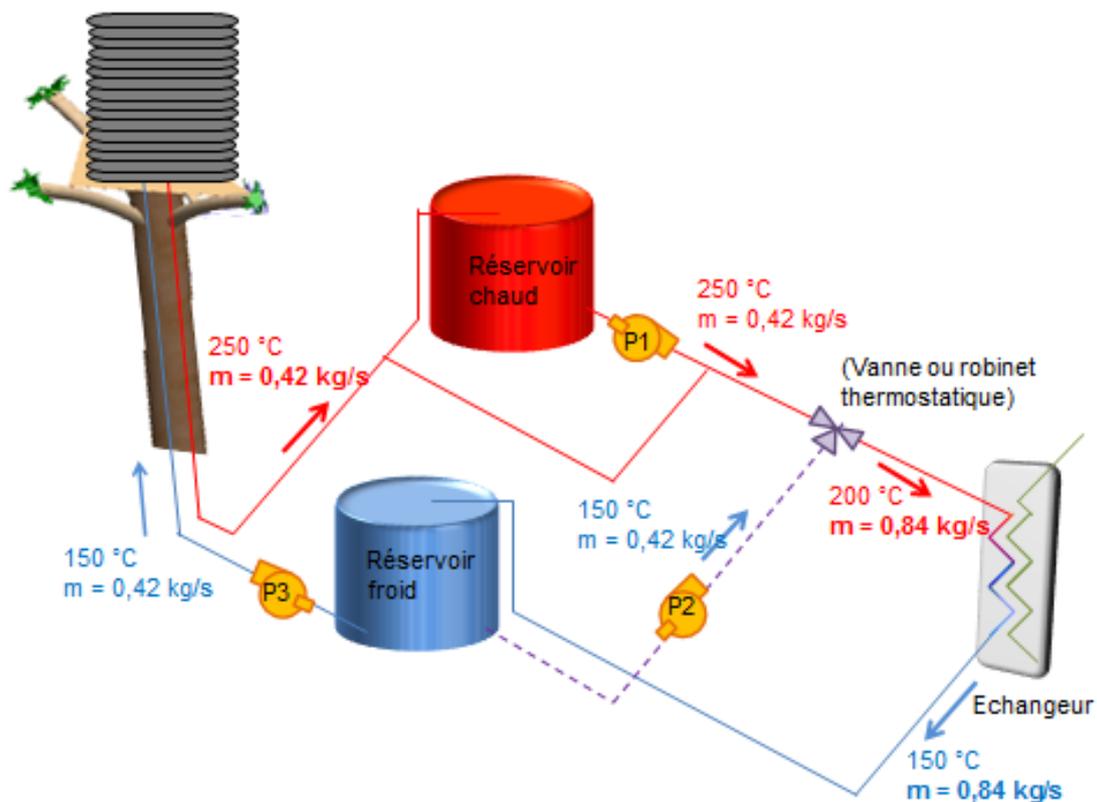


Figure 9 Proposition de schéma pour la centrale de CSP4Africa (22)

1. Énergie disponible

Etant donné le volume important des données traitées, nous n'en exposerons qu'une plage horaire en annexe II. Nous exposons donc simplement l'ensemble des résultats de l'étude sur la figure 11.

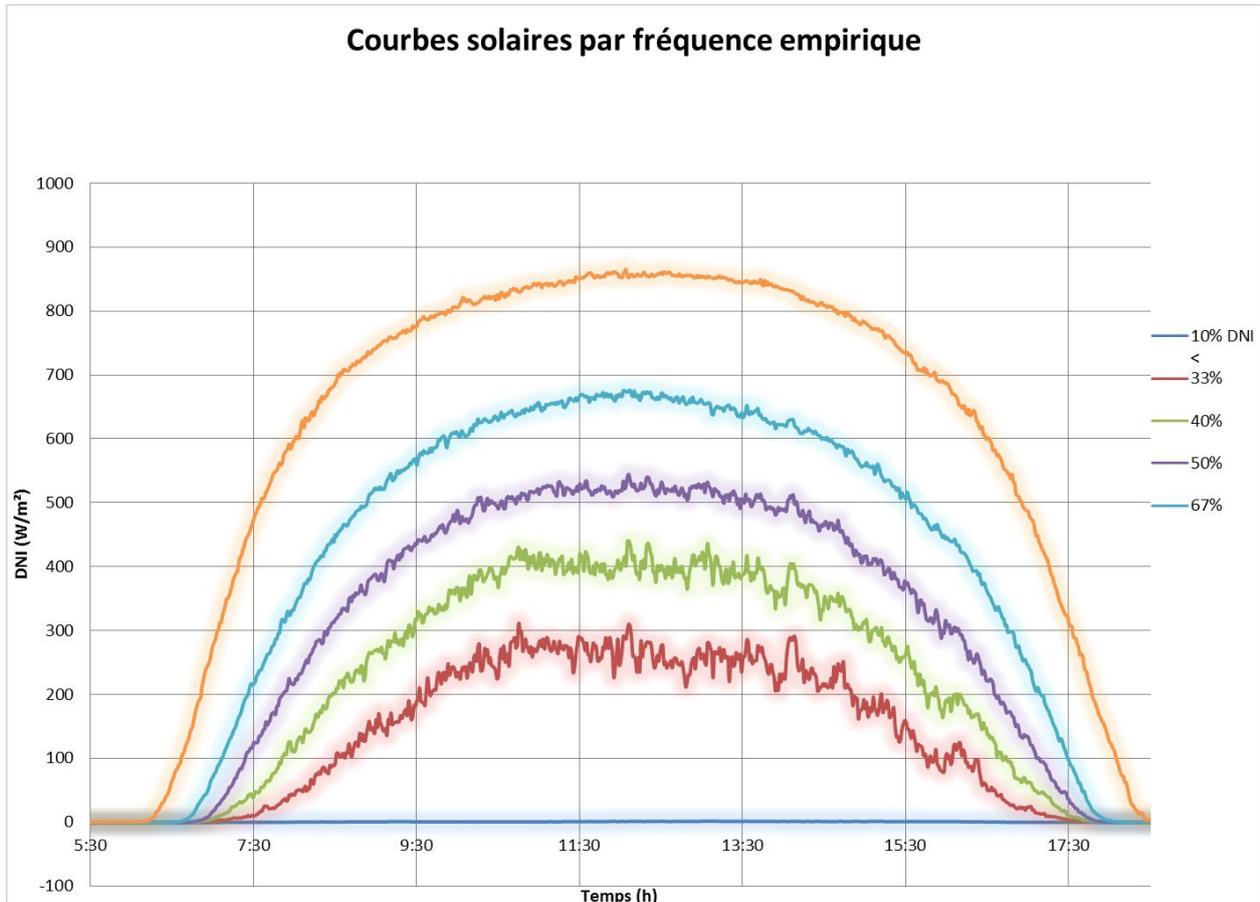


Figure 10 Profils journaliers d'ensoleillement en fonction des fréquences d'apparition

Ces courbes représentent les profils d'ensoleillement en fonction de la probabilité d'apparition. Prenons l'exemple de la courbe troisième courbe (du haut vers le bas). Elle correspond à la médiane. Cela veut dire que dans 50 % des cas, la valeur d'ensoleillement que nous aurons sur le site de Kamboinsé à une heure donnée sera inférieure à celle indiquée sur ce profil. Nous avons donc une chance sur deux d'observer ladite valeur d'ensoleillement.

2. Energie mobilisable

Nous choisissons comme fréquence de référence la valeur médiane qui nous donne des ensoleillements que l'on est sûr d'avoir dans 50 % des cas. Le temps de fonctionnement du pilote CSP4Africa est a été fixé à 3 h par jour. Le profil obtenu est présenté dans la figure 12.

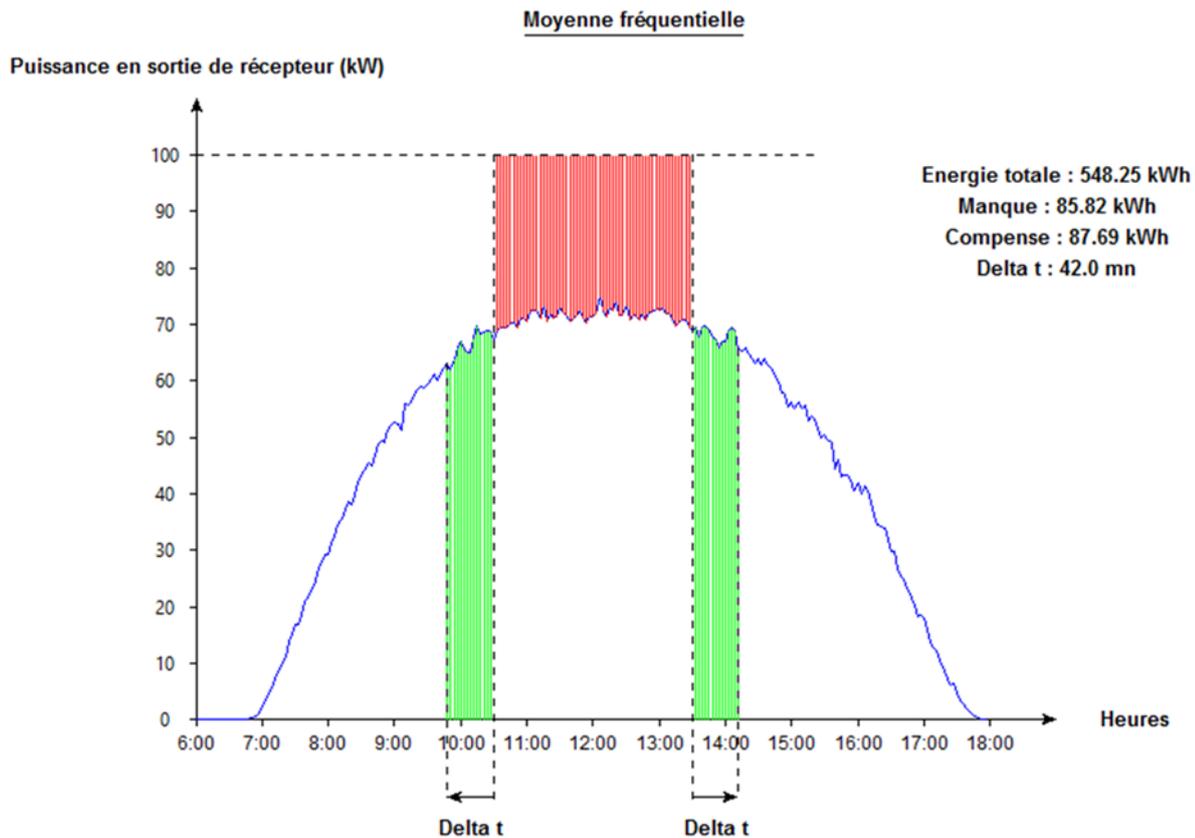


Figure 11 Profil de production à une fréquence d'apparition de 50 %

La courbe en cloche représente la quantité de chaleur effectivement disponible en sortie du récepteur qui est égale à 548 kWh. L'objectif de production est fixé à 100 kW et correspond à la droite d'équation $y = 100$. La surface délimitée par l'intersection de cette droite avec la courbe en cloche et les droites d'équation $x = 10\text{h}30$ et $x = 13\text{h}30$ constitue le manque d'énergie à combler. Quant aux zones délimitées par l'intersection de la courbe en cloche et de l'axe des abscisses avec les droites d'équation $x = 9\text{h}45$, $x = 10\text{h}30$ d'une part et $x = 13\text{h}30$, $x = 14\text{h}15$ respectivement, elles correspondent à la quantité d'énergie que l'on doit stocker pour combler le manque qui est de 86 kWh. La stratégie définie est la suivante, à la fin d'une journée type de fonctionnement (13 h 30), le réservoir chaud est chargé à la moitié de sa capacité. Le jour suivant, ce stock est complété avant le début de la production (surfaces symétriques vertes). Le manque étant de 86 kWh, nous décidons considérer une quantité d'énergie à stocker de 100 kWh.

36

3. L'unité de stockage

Le calcul en première approximation du volume du réservoir froid donne un résultat de $1,84 \text{ m}^3$ tandis que celui du réservoir chaud est de $2,01 \text{ m}^3$. La différence n'étant pas très importante nous

optons pour un réservoir froid de volume identique à celui du réservoir chaud.

- **Choix des matériaux des réservoirs**

La norme EN 10028-2 :2009 définit un certain nombre d'aciers à caractéristiques mécaniques spécifiées pour les hautes températures. Nous devons choisir des aciers capables de résister aux températures de 150 à 250 °C sans déformations permanentes. Le tableau 12 en annexe IV présente la résistance élastique de différentes nuances d'aciers en fonction de la température. Les résistances de ces aciers sont reprises dans le tableau 1. Par la notion de résistance thermique, il faut comprendre « la contrainte maximale » que peut supporter le matériau tout en ne subissant que des déformations élastiques. Les déformations élastiques d'un matériau sont celles qui disparaissent une fois que la contrainte exercée sur le matériau cesse.

La pression hydrostatique dans le réservoir froid est de 0,0126 MPa, ce qui est inférieur aux pressions admissibles par les aciers du tableau 4 dont la résistance la plus petite à 150 °C est de 198 MPa. Il en est de même pour le réservoir chaud qui a une résistance de 0,0115 MPa tandis que la résistance la plus petite des aciers à 250 °C est de 167 MPa. Tous ces aciers sont donc aptes à être employés pour nos réservoirs. Nous choisissons donc le P235GH EN10028-2.

- **Calcul de l'épaisseur minimal de la paroi du réservoir**

Le tableau 1 présente les résultats du calcul de l'épaisseur minimale de paroi requise pour chacun des aciers spécifiés dans le tableau 12 en annexe III.

Tableau 1: Valeurs d'épaisseurs minimales calculées par nuance d'acier (réservoir chaud)

	Résistance élastique (N/mm ²)	Contrainte admissible (N/mm ²)	Epaisseur minimale (mm)
P235GH EN 10028-2	167,0	111,3	0,049
P265GH EN 10028-2	188,0	125,3	0,043
P295GH EN 10028-2	209,0	139,3	0,039
P355GH EN 10028-2	252,0	168,0	0,032
16 Mo 3 EN 10028-2	213,0	142,0	0,038

Tableau 2: Epaisseurs minimales de paroi selon le diamètre

Diamètre du réservoir (m)	Epaisseur minimale des tôles de paroi (mm) selon ...	
	API 650 - 3.6.1.1	EN 14015 - table 14
< 15	5	5
15-30	6	6
30-36	6	8
36-60	8	8
60-90	10	10
>90	10	12

Le tableau 1 présente les résultats de calculs de l'épaisseur de paroi minimale requise en fonction de la contrainte admissible du matériau et du type de matériau. Quant au tableau 2, il présente les épaisseurs minimales imposées par les normes API 650 et EN 14015 en fonction du diamètre du réservoir. Le tableau 1 nous donne des épaisseurs très petites. Toutefois, notre diamètre étant inférieur à 15, les deux normes ci-dessus mentionnées nous impose un choix d'épaisseur de 5 mm. Nous choisissons donc l'acier P235GH EN 10028-2 comme matériau des deux réservoirs avec une épaisseur de 5 mm pour les deux réservoirs.

- **Les transferts thermiques**

La température ambiante est prise égale à 30°C, moyenne annuelle de température observée au Burkina (23). Le diamètre et la hauteur sont égaux à 1,4 m. Nous avons fait le choix d'une isolation de 20 cm de laine de verre. Les transferts thermiques ne sont étudiés que sur le réservoir chaud car il est celui où il est nécessaire de limiter les déperditions thermiques.

Les différents résultats des calculs de l'isolation et des pertes thermiques sont consignés dans les tableaux 3 et 4.

Tableau 3: Paramètres thermiques déterminés pour le réservoir chaud

	Type de surface	Température de paroi interne (°C)	Température de paroi externe (°C)	Coefficient de convection interne (W/m ² /°C)	Coefficient de convection externe (W/m ² /°C)
Mur	Cylindrique	241,73	42,10	3,87	2,93
Fond	Circulaire	244,08	214,11	4,63	–
Toit	Conique	216,33	92,27	3,24	1,75

La convection est plus accentuée sur le mur que sur le toit et la base. Au niveau de la base il n'y a pas de convection extérieure considérée ; la conduction vers le sol étant le phénomène prédominant. Les épaisseurs sont uniformes pour les trois surfaces et égales à 5 mm.

Tableau 4 : Pertes thermiques du réservoir chaud isolé

	Perte thermique (W)	Energie journalière perdue (kWh)	Temps de décharge complète (J)
Mur	281,96	6,77	9,1
Fond	0,76	0,02	
Toit	174,78	4,19	
	Total	10,98	



Le tableau 4 concorde avec le tableau 3 et montre que la zone de plus grande perte thermique est le mur du réservoir. La perte journalière due au mur est en effet de 6,77 kWh environ tandis que le toit entraîne une perte de 4,19 kWh et le fond une perte de 0,02 kWh environ. Le réservoir mettra environ 9 jours et 2 heures pour se décharger complètement de la chaleur stockée. Globalement, on perd 10,98 kWh par jour, ce qui signifie que la capacité du réservoir doit être augmentée de cette quantité pour combler le déficit occasionné.

Tableau 5: Estimation de la quantité de fluide requise pour le stockage

Capacité thermique journalière requise (kWh)	Perte thermique journalière (kWh)	Capacité totale du réservoir (kWh)	Volume du fluide requis (m ³)
100	10,98	110,98	2,23

Le tableau 5 montre par exemple qu'il faut rajouter 0,22 m³ au réservoir chaud pour résorber l'effet des pertes thermiques. De ce fait, nous prenons le volume utile de chacun de nos deux réservoirs égal à 2,25 m³. La hauteur du toit conique étant prise égale à 0,2 m, nous parvenons à des réservoirs d'une hauteur totale de 1,62 m pour un diamètre de 1,42 m.

4. Calcul des conduites et pompes

Les étapes du calcul des pompes se trouvent résumées en annexe I. Les résultats essentiels sont présentés dans les tableaux 6 et 7. Les pompes choisies sont des pompes centrifuges de marque SALMSON spécifiées pour les fluides caloporteurs jusqu'à une température maximale de 350 °C et une vitesse de rotation de 1450 tr/min. La figure 13 reprend le schéma de la centrale avec quelques résultats du dimensionnement à savoir les longueurs et diamètres de conduites et le volume des réservoirs.

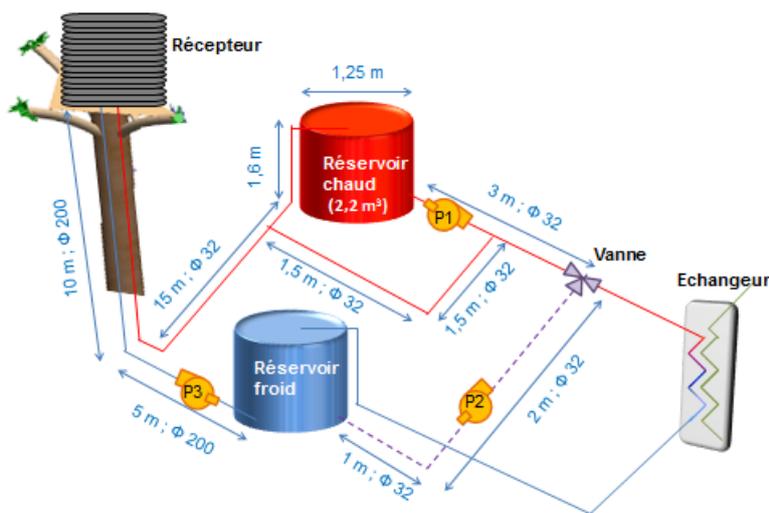


Figure 12 Schéma de la centrale

Tableau 6: Récapitulatif du dimensionnement des pompes et conduites

Récapitulatif des tuyauteries et des pompes							
Tronçon	Longueur (m)	Débit (m ³ /h)	Diamètre (m)	Désignation	HMT (m)	Puissance hydraulique (kW)	Pompe choisie
RC - V	3	2,10	0,032	P1	5,83	0,023	NCF 32-125
RF - V	3	2,10	0,032	P2	5,46	0,022	
Direct	3	2,10	0,032	Néant			
RF - R	15	2,10	0,2	P3	11,60	0,047	NCF 32-160
R - RC	17,15	2,10	0,032	Néant			
V - RF	8,15	4,20	0,08				

Tableau 7: Caractéristiques de tubes d'aciers spécifiés hautes températures

Nuance d'acier	Type d'acier	Température limite de service (°C)
ASTM A106 Gr B	Acier au carbone	300
ASTM A335 Nuance P11	Aciers alliés	575
ASTM A335 Nuance P22		600
ASTM A335 Nuance P5		650

Nous choisissons donc des conduites en acier au carbone ASTM A106 Gr B qui respectent notre limite de température.

1. La configuration du système de stockage de CSP4Africa

Notre travail a consisté à dimensionner un système de stockage thermique de gestion pour la centrale solaire à concentration du projet CSP4Africa. Cette centrale à une capacité installée de 100 kW, ce qui est relativement faible en comparaison de la capacité installée des CSP qui est généralement de l'ordre de 500 MW. Les premières CSP installées en Californie dans les années 80 avaient d'ailleurs une capacité de 584 MW. Toutefois, il faut dire que CSP4Africa est un projet pilote qui vise à développer un prototype afin de fournir aux pays africains une alternative accessible au problème énergétique. Il faut aussi noter que contrairement à nombre de centrales solaires telles celles de Californie (1980), CSP4Africa n'est prévu fonctionner qu'avec l'énergie solaire comme source primaire. Aucune source secondaire n'est prévue. Cela représente un désavantage pour ce qui est de la continuité de service car lorsqu'une source alternative est prévue, gaz naturel pour le cas de la Californie, cela permet de pallier les insuffisances du soleil dont le rayonnement est aussi variable en disponibilité qu'en intensité. L'enjeu n'est peut-être pas très grand vu que dans sa phase actuelle, la centrale n'est censée fonctionner que trois heures par jour. Néanmoins, en vue de développements futurs du projet vers un fonctionnement plus étendue voire un fonctionnement 24 h/24, il serait fort appréciable d'intégrer, en plus du système de stockage de gestion et de production, une source d'énergie alternative. La question majeure serait alors de savoir quelle source d'énergie pourrait se prêter à cet usage. Le Burkina Faso n'a malheureusement pas de ressources en gaz naturel ou en houille. La seule ressource énergétique disponible hormis le soleil est l'hydroélectrique. Les dérivés pétroliers servant pour la plupart des centrales burkinabé n'est pas une alternative envisageable en ce sens qu'ils sont importés et donc ne cadrent pas avec le principe de CSP4Africa de développer des solutions moins couteuses avec des ressources locales. On pourrait donc reconsidérer la ressource solaire mais avec une approche différente.

2. Evaluation de la ressource solaire sur le site de Kamboinsé

- **Les données météorologiques employées**

Nous avons évalué la quantité d'énergie disponible pour notre stockage grâce à des données météorologiques d'ensoleillement direct. Ces données proviennent de la station BF1 de Kamboinsé et correspondent aux mesures des années 2012 et 2013. D'une part, nous ne disposons que des données sur deux années ; ce qui est très insuffisant vu que nous avons opté pour une étude statistique de ces données. Les études statistiques sont courantes en hydrologie notamment, mais les

séries de données utilisées s'étendent en général sur des dizaines d'années. Il se pose alors pour notre cas, le problème de fiabilité de l'étude que nous avons mené. En effet, le nombre insuffisant de données réduit considérablement la fiabilité des résultats que nous avons obtenus. Malheureusement, il n'existe pas pour la zone de Kamboinsé et même du Burkina, des bases de données d'ensoleillement disponibles. De nombreuses démarches auprès de la météorologie nationale du Burkina ont achevé de nous en convaincre. L'alternative est donc d'admettre ces résultats faute de mieux, et de poursuivre la collecte de données sur la station BF1 sur au moins une dizaine d'années. L'analyse fréquentielle pourra ensuite être reprise pour permettre d'obtenir des résultats plus fiables

- **Choix de la fréquence de dimensionnement**

Les résultats de notre analyse fréquentielle nous ont donné des courbes d'ensoleillement qu'on ne dépassera pas à des fréquences de 10 %, 33 %, 40 %, 50 %, 67 % et 95 %. Nous avons choisi la courbe à 50 % comme courbe de référence. Nous nous situons donc dans le cas moyen. Toutefois, il se pose la question des cas extrêmes. Dans le cas où nous avons un ensoleillement en dessous de la moyenne, nous aurons surdimensionné notre installation. Les conséquences pourraient être plus sérieuses dans le cas où nous aurions un ensoleillement au-dessus de la moyenne. Dans ce cas, nos équipements (récepteur, tuyauteries...) sont exposés à un risque de surchauffe voire de choc thermique. Mais dans le cas de CSP4Africa, des dispositions ont déjà été envisagées pour cet aspect sécurité. Il s'agit d'une défocalisation des miroirs qui permettra de réduire l'apport solaire sur notre installation.

3. L'unité de stockage

Nous avons opté pour un réservoir cylindrique. La forme sphérique est plus indiquée du point de vue résistance à la pression hydrostatique sur la paroi du réservoir, résistance au vent et économie de matériau. Toutefois, le réservoir cylindrique est usuellement adopté dans la plupart des centrales solaires à concentration telles Thémis en France, l'ACSP (Archimede Concentrating Solar Plant) en Sicile. Pour des cas d'applications tels accumulateurs de vapeur, la forme cylindrique est aussi utilisée. C'est le cas par exemple pour la centrale Planta Solar 10 (PS10) en Espagne.

Le réservoir est conçu en acier au carbone et aciers alliés. Nous avons bien évité l'emploi d'aciers plus coûteux tels les aciers réfractaires. Ils sont plus coûteux que ceux en acier inoxydables employés dans la centrale californienne de Barstow.

L'isolation est faite en laine de verre uniquement. Dans de nombreuses applications, l'isolation est composée de plusieurs types d'isolants à la fois. Il s'agit souvent de laine de verre, laine de roche et



mousse de polyuréthane. L'épaisseur de notre isolation est de 20 cm et reste dans l'ordre de grandeur des épaisseurs d'isolants de centrales comme celle de Solar Two qui possède une double isolation sur le mur par exemple avec une première couche de 46 cm de laine de roche et une seconde de 5 cm en fibres de verre.

VI. CONCLUSION

Au terme de ce travail de mémoire, nous avons pu faire un choix de configuration de notre système et identifier des méthodes de dimensionnement que nous avons mis en œuvre pour concevoir notre stockage de gestion. La méthode utilisée est pluridisciplinaire de par les équations et les connaissances auxquelles elle fait appel. Une approche statistique nous a permis de faire une prédétermination des ensoleillements sur le site de Kamboinsé. L'approche thermodynamique nous a permis d'évaluer la quantité de fluide nécessaire à $2,23 \text{ m}^3$. Nous avons un réservoir de $2,5 \text{ m}^3$ de forme cylindrique avec un toit conique. Le diamètre et la hauteur de la partie cylindrique sont égaux à 1,42 m. Le volume utile est de $2,25 \text{ m}^3$ pour une hauteur du toit conique de 0,2 m. L'étude des transferts thermiques par une méthode itérative nous a permis de déterminer les pertes thermiques et les épaisseurs d'isolations à mettre en œuvre. Nous avons opté pour une isolation de 20 cm en laine de verre. Les pertes thermiques sont de 10,98 kWh par jour. Le recours à l'hydraulique nous a permis de dimensionner nos tuyauteries et nos pompes. Les tuyauteries sont en acier au carbone ASTM A106 Gr B et sont spécifiées pour les applications hautes températures. Les pompes quant à elles sont de marque SALMSON et sont dédiées aux fluides caloporteurs avec une température admissible allant jusqu'à $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Enfin, nous avons utilisé des normes de calcul des réservoirs de stockage (EN 14015) en génie civil pour la détermination du matériau du réservoir qui est de l'acier P235GH EN 10028-2 et de l'épaisseur de sa paroi qui est de 5 mm.

En définitive, ce travail de mémoire sur la conception d'un stockage thermique nous a permis d'approfondir nos connaissances des centrales solaires thermiques. Nous avons aussi revisité et beaucoup appris certaines notions issues de disciplines connexes telles l'hydraulique, le génie civil et la statistique ce qui a contribué à élargir notre champ de vision.

IV. VII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

Nous avons, au terme de notre stage pu faire le dimensionnement du stockage thermique qui nous était demandé et avons pu faire une ébauche dans le sens de la sécurité de l'installation. Toutefois, il conviendrait davantage d'étudier la question du management de la centrale en vue d'en établir une étude de risques. Cela permettra, non seulement d'assurer une gestion optimale de l'installation dans sa globalité, mais aussi d'assurer une sécurité des intervenants sur les équipements. Le volet instrumentation est aussi à étudier en vue d'avoir une mesure des grandeurs témoins de la bonne marche ou pas de l'installation. Le site pilote se trouvant dans un domaine étudiant, cette instrumentation pourra être utile à des fins pédagogiques.

V. BIBLIOGRAPHIE

1. **Nemet A, Klemes II.** Optimising the temperature of heat storage to serve processes with supply and demand - captured solar energy curve. 2011, pp, 605 - 610.
2. **Quijera JA, Alriols MG, Labidi I.** Usage of solar energy in an industrial process. *Chemical Engineering Transactions.* 2011, pp. 875 - 880.
3. **D. Verdier, Q. Falcoz, A. Ferrière.** Design of a protection thermal energy storage using phase change material coupled to a solar receiver. *High Temperature Materials and Processes.* 2014, pp. 1 - 15.
4. **Goran Krajacic, Neven Duic, Antonis Tsikalakis, Manos Zoulias, George Caralis, Eirini Panteri, Maria da Graça Carvalho.** Feed-in tariffs for promotion of energy storage technologies. *Energy Policy.*, 2011, pp. 1410 - 1425.
5. **Laing, Doerte.** Thermal energy storage for concentrated solar power : state of the art and current developments. 2011.
6. **W.B.Stine, R.W.Harrigan.** Power from the sun. 2001.
7. **P., Vitte.** Dynamic simulation of concentrating solar plants. *Chemical engineering transactions.* 2012, Vol. , Vol. 29., 235 - 240.
8. **al., Zohreh Ravaghi-Ardebili et.** Assessment of direct thermal energy storage technologies for concentrating solar power plants. 2013, Vol. Vol 35.
9. **TAMME, Rainer.** German Contribution to the implementation of CSP technology. 2009.
10. **SIEGEL, Nathan P.** Thermal energy storage for solar power production. *Energy and environment.* 2012.
11. **al, Zhiwen Ma et.** Fluidized Bed Technology for Concentrating Solar Power With Thermal Energy Storage. *Solar Energy Engineering* . 2014, Vol. 031014, 136.
12. **John A. Duffie, William A. Beckman.** *Solar engineering of thermal processes.* ohn Wiley and sons, INC,x. John A. Duffie, William A. Beckman. Solar engineering of thermal processes. s.l. : John Wiley and sons, INC, 1980.
13. **Laboratoire PROMES.** *Projet OptiEnR.* 2011.
14. **ECK, Markus.** Thermal Storage for STE Plants. 2012.
15. **Frank Kreith, D. Yogi Goswami.** *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy (Mechanical and Aerospace Engineering Series).* 2007.



16. **Likhendra Prasad, P. Muthukumar.** Design and optimization of lab-scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application . *Solar Energy*. 2013, Vol. Vol. 97, 97.
17. **Peel, et al.** 2011.
18. **Fritz Zaversky, Javier Garcia-Barberena , Marcelino Sanchez , David Astrain.** Transient molten salt two-tank thermal storage modeling for CSP. *Solar Energy* . 2013 , pp. 294 - 311.
19. **Jimmy KUMANA, Samir P. KOTHARI.** Predict storage-tank heat transfer precisely. *Chemical engineering*. 1982.
20. **BUMIGEB.** 2014.
21. **Réservoirs de stockage aériens.** Réservoirs de stockage aériens - Deuxième version test. 2009.
22. **N'TSOUKPOE, Edem.** Proposition de schéma pour la centrale CSP4Africa. 2014.
23. **Climate data.** climatedata.eu. www.climatedata.eu. [En ligne] [Citation : 04 Juin 2014.]



VI. VII. ANNEXES

SOMMAIRE DES ANNEXES

I. Annexe I : Dimensionnement des conduites et des pompes.....	54
II. Annexe II : Analyse fréquentielle des mesures d'ensoleillement.....	56
III. Annexe : Matériaux.....	58

Annexe I : Dimensionnement des conduites et des pompes

Cette annexe expose la démarche de dimensionnement des conduites et des pompes de notre installation.

La démarche est la suivante :

- Calcul de la vitesse d'écoulement : $V = \frac{4 Q}{\pi * D^2}$
- Calcul du nombre de Reynolds : $Re = \frac{\rho * V * D}{\nu}$
- Rugosité de la conduite : $\varepsilon = \frac{k}{D}$
- Détermination du coefficient de perte de charge λ à l'aide de la formule de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \text{Log} \left[\left(\frac{k}{3,71 D} \right) + \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \right]$$

- Calcul des pertes de charge linéaire : $h_r = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$ Formule de Darcy-Weibach (1857)
- Pertes de charge singulières

$$h_s = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

- Pertes de charges totales

$$h = h_s + h_r$$

- Calcul de la HMT

$$HMT = H_{geo} + h_t + NPSH$$

- Calcul de la puissance hydraulique

$$Ph = \rho * g * Q * HMT$$

- Calcul de la puissance électrique

$$Pel = Ph / \eta$$

- Cout de fonctionnement de la pompe

$$P = p * Pel * d + Pa$$

Le tableau de nos calculs a été scindé en deux et exposé ci-dessous.

Tableau 8: Aperçu du calcul du diamètre optimal (1/2)

Tronçon	Longueur (m)	Diamètre (m)	Débit (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Reynolds	Rugosité absolue	Lambda	hr (m)
RC-V	3	0,006	0,00058	20,62	2970892,271	0,00003	0,03035	329,01
		0,008		11,60	2228169,203		0,02792	71,82
		0,01		7,42	1782535,3		0,0262	22,08
		0,015		3,30	1188356,90		0,02355	2,61
		0,02		1,85	891267,68		0,02195	0,57
		0,025		1,18	713014,14		0,02087	0,18
		0,032		0,72	557042,30		0,01986	0,04
		0,04		0,46	445633,84		0,01915	0,01
		0,05		0,29	356507,07		0,01854	0,005

Tableau 9 : Aperçu du calcul du diamètre optimal (2/2)

hs (m)	h (m)	Pompe	Hauteur géométrique	HMT (m)	Puissance hydraulique (kW)	Rendement	Puissance électrique (kW)	Prix kWh (FCFA)
3380,08	3709,10	P1	1,6	3710,70	15,28	0,85	17,98	75
1069,48	1141,30			1142,90	4,70		5,54	
438,05	460,14			461,74	1,90		2,23	
86,53	89,14			90,74	0,37		0,43	
27,37	27,95			29,55	0,12		0,14	
11,21	11,39			12,99	0,05		0,06	
4,17	4,22			5,82	0,02		0,02	
1,71	1,72			3,32	0,01		0,01	
0,70	0,70			2,30	0,009		0,01	

Annexe II : Analyse fréquentielle des mesures d'ensoleillement

Etant donné le volume important des données que nous avons traitées, nous choisissons de ne présenter que quelques-unes dans cette section en guise d'aperçu sur une période de trois heures.

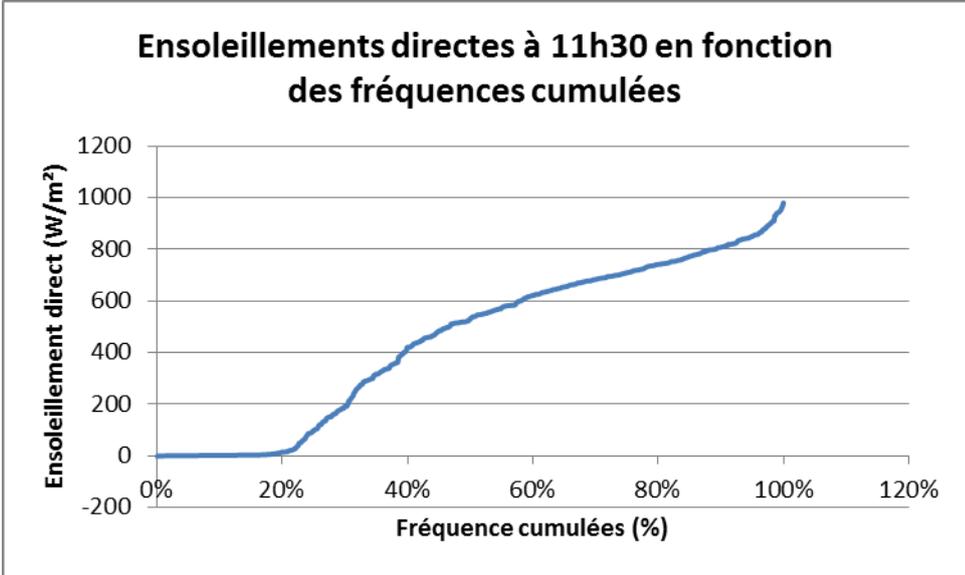


Figure 13: Aperçu des ensoleillements directs en fonction des fréquences cumulées pour 11h30

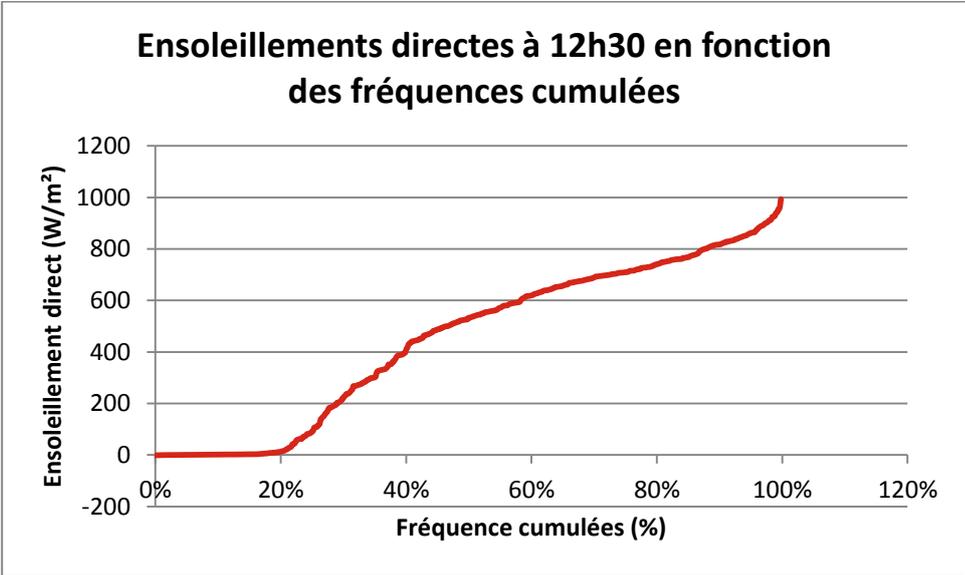


Figure 14: Aperçu des ensoleillements directs en fonction des fréquences cumulées pour 12h30

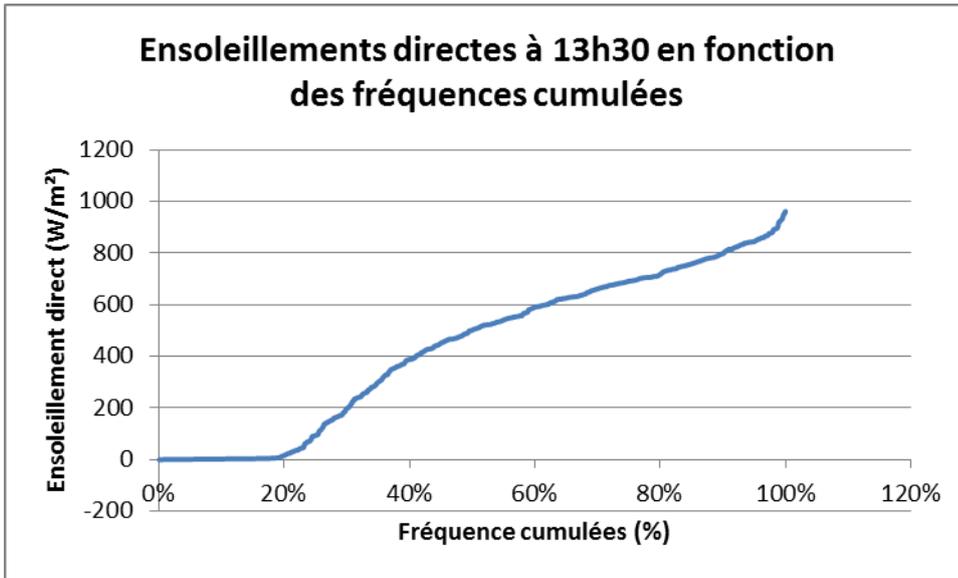


Figure 15: Aperçu des ensoleillements directs en fonction des fréquences cumulées pour 13h30

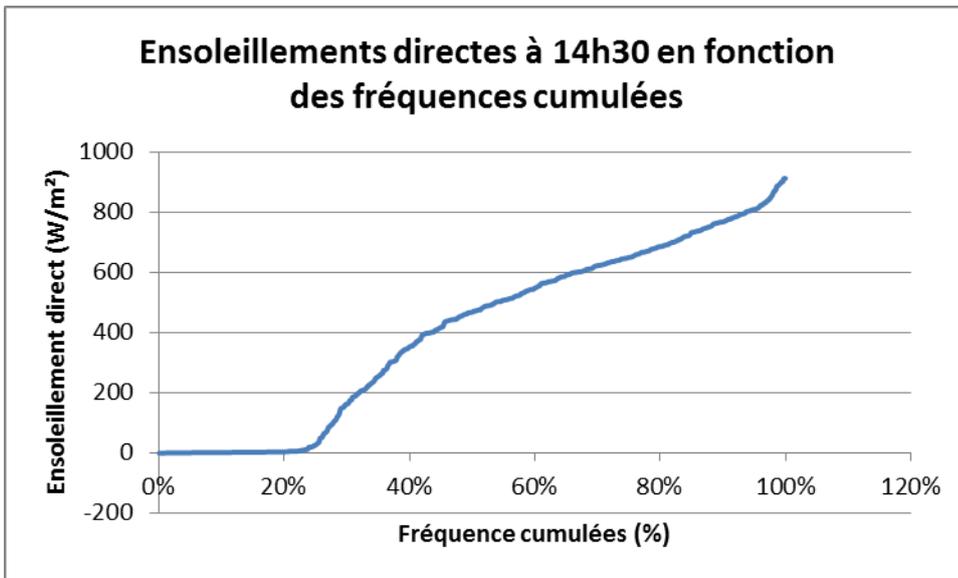


Figure 16: Aperçu des ensoleillements directs en fonction des fréquences cumulées pour 14h30

Annexe III : Matériaux

Tableau 10: Résistances élastiques d'aciers spécifiés hautes températures en fonction de la température (MPa)

Qualité	Epaisseur (mm)	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C
P235GH EN 10028-2	5 < ép. ≤ 16	227	214	198	182	167	153	142	133
P265GH EN 10028-2		256	241	223	205	188	173	160	150
P295GH EN 10028-2		285	268	249	228	209	192	178	167
P355GH EN 10028-2		343	323	299	275	252	232	214	202
16 Mo 3 EN 10028-2		273	264	250	233	213	194	175	159

Le tableau présente des nuances d'aciers selon la norme européenne EN 10028-2. Ces aciers sont dédiés aux applications hautes températures. Le tableau donne pour chaque type d'acier et pour chaque température, la valeur de la contrainte maximale que peut supporter l'acier sans se déformer de façon irréversible ; il s'agit donc de valeurs de résistance élastiques.