



**MISE EN PLACE D'UNE CHAMBRE FROIDE SOLAIRE POSITIVE POUR LE
STOCKAGE DE POMMES DE TERRE DANS LA PROVINCE DU YATENGA REGION
NORD DU BURKINA FASO CAS DE LA VILLE DE OUAHIGOUYA**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE
DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE**

Présenté et soutenu publiquement le 27/01/2025 par

Mariam ANTAR GASSAGAY (2018 0085)

**Encadrant 2iE : Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR)
Maître de Conférences CAMES**

Maître de stage : Seynabou MBENGUE, Ingénieure à NRJ Solaire

Structure (s) d'accueil du stage : NRJ Solaire

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Daniel YAMEGUEU

Membres et correcteurs : Mme. Gaëlle Kafira KO (Examinatrice)
 M. Kamal SAMANDOULOUGU (Examineur)

Promotion [2024 /2025]

DEDICACES

A ma chère maman, BAKO Hannatou,

Pour ton amour inconditionnel et ton soutien constant. Ta patience, tes encouragements et tes sacrifices m'ont permis d'avancer et de réussir. Je te dédie ce mémoire avec une immense gratitude et tout mon amour.

A ma tante, HAMAN BAKO Salamatou,

Pour ton accompagnement et ton engagement sans faille dans ma vie scolaire. Ta présence et tes conseils ont été des piliers tout au long de mon parcours académique. Je te remercie du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi.

A mon grand-père, Mamadou BAKO, décédé,

Pour tes conseils avisés et tes encouragements. Ton influence continue de guider mes pas, et je te dédie ce travail en hommage à ta mémoire et à tout ce que tu m'as appris.

A l'ensemble de ma famille, je ne saurai tous vous citer,

Je vous remercie pour votre amour, votre soutien et vos encouragements. Chacun de vous a joué un rôle essentiel dans cette réussite, et je vous en suis profondément reconnaissante.

Cette dédicace est un témoignage de l'importance de chaque membre de ma famille dans mon parcours académique et personnel.

Merci infiniment à vous tous.

CITATIONS

« l'éducation est notre passeport pour l'avenir, car demain appartient à ceux qui se préparent aujourd'hui. »

Malcolm X

« je viens d'un endroit où les opportunités vous fixent dans les yeux, mais elles cherchent des gens ayant le cœur et le courage de les faire et de bien les faire. »

Ibukun AWOSIKA

REMERCIEMENTS

Ce travail étant le fruit du soutien de plusieurs personnes, cette lucarne est l'occasion pour nous d'exprimer notre profonde gratitude envers elles.

En premier lieu, je suis reconnaissante envers tout le corps administratif et enseignant de l'institut 2iE qui m'a offert l'opportunité et la chance de suivre une formation complète dans le domaine du génie électrique et énergétique.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers le Dr-Ing. Habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE, Maitre de Conférence CAMES, pour son encadrement précieux, ses conseils et recommandations éclairés ainsi que son soutien constant tout au long de ce travail. Son expertise et son dévouement ont été essentiels à l'aboutissement de ce projet.

Un grand merci à l'entreprise NRJ Solaire et particulièrement à Madame Seynabou MBENGUE, Ingénieure au sein de l'entreprise pour son accueil, son accompagnement et sa patience à mon égard durant ce stage. La collaboration et l'expertise de l'ensemble de l'équipe ont enrichi mon expérience professionnelle et académique.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance envers ma marraine, MAGNE TEKAM Falonne, alumnie de 2iE pour ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout le long de mon parcours.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues de promotion, dont les conseils et les suggestions ont été précieux pour le développement de ce mémoire. Je remercie également tous mes amis proches pour leur encouragement et leur soutien.

Enfin, un immense merci à ma famille pour leur amour inconditionnel et leur soutien constant. Leur encouragement a été une source d'inspiration tout au long de cette aventure académique. Je ne saurai terminer sans exprimer ma gratitude envers ALLAH le tout puissant, qui par sa volonté divine a rendu tout cela possible.

Merci du fond du cœur à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

RESUME

Le déficit énergétique et la sécurité alimentaire restent les principaux problèmes auxquels font face de nombreuses régions d'Afrique. En effet, en plus des besoins énergétiques insatisfaits, les populations rencontrent également des problèmes liés à la conservation des produits agricoles. C'est le cas du Burkina Faso où la culture maraîchère est l'une des activités les plus lucratives du pays, cependant cette filière fait face à de nombreuses difficultés dues à la haute périssabilité des produits. Nous avons constaté que ces pertes sont d'autant plus importantes pour la pomme de terre principalement produite en grande quantité dans la province du Yatenga (Nord du pays). Afin de résoudre ce problème majeur, nous avons proposé la mise en place d'une chambre froide alimentée par de l'Energie solaire photovoltaïque. Celle-ci permettra la conservation des produits post récolte plus longtemps et donc une réduction des pertes.

Après les différents travaux de dimensionnement, il ressort qu'il faut pour notre installation un groupe froid de 16 kW, une puissance crête de 58,846 kWc qui sera assurée par un total de 99 panneaux solaires. Le stockage quant à lui sera dimensionné pour une journée d'autonomie afin de satisfaire un besoin de 244,8 kWh grâce à 12 batteries.

Enfin dans un souci d'efficacité énergétique, qui représente un enjeu mondial aujourd'hui, nous avons mis en place des mesures qui permettront à la chambre froide solaire de se rapprocher au maximum de cette efficacité notamment à travers l'utilisation de panneaux sandwichs en polyuréthane par exemple. Après avoir mené toutes les études nécessaires, nous estimons le cout d'un tel projet à 100 000 000 FCFA ce qui conduit au calcul de la Valeur Actuelle Nette (VAN) et à une conclusion selon le résultat qui montre que le projet serait rentable.

Mots Clés :

1 – Pomme de terre

2 – Production de froid

3 – Stockage

4 – Système Solaire photovoltaïque

ABSTRACT

Energy deficit and food security remain the main problems facing many regions of Africa. In fact, in addition to unsatisfied energy needs, populations are also encountering problems linked to the conservation of agricultural produce. This is the case in Burkina Faso, where market gardening is one of the country's most lucrative activities, yet this sector faces numerous difficulties due to the high perishability of the produce. We have observed that these losses are even greater for potatoes, which are mainly produced in large quantities in the Yatenga province (in the north of the country). To solve this major problem, we proposed the installation of a cold room powered by photovoltaic solar energy. This will enable post-harvest produce to be preserved for longer, thereby reducing losses.

After various sizing tests, it emerged that our installation would require a 16 kW chiller with a peak power of 58.846 kWp, which would be provided by a total of 99 solar panels. The storage system will be sized for one day's autonomy, to meet a requirement of 244.8 kWh, thanks to 12 batteries.

Finally, in the interests of energy efficiency, which is a global issue today, we have put in place measures that will enable the solar cold store to get as close as possible to this efficiency, notably through the use of polyurethane sandwich panels, for example. Having carried out all the necessary studies, we estimate the cost of such a project at 100,000,000 FCFA, which leads to the calculation of the Net Present Value (NPV) and a conclusion based on the result that the project would be profitable.

Key words:

1 – Potatoes

2 – Photovoltaic Solar system

3 – Refrigeration production

4 – Storage

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE	Institut International de l'Eau et de l'Environnement
AC	Courant Alternatif
CF	Chambre Froide
CFC	Chloro Fluoro Carbure
DC	Courant Continu
GWP	Global Warming Potential
HCFC	Hydro Chloro Fluoro Carbure
HFC	Hydro Fluoro Carbure
HFOS	Hydro Fluoro Olefines
LED	Light Emitting Diode
ODP	Ozone Depletion Potential
Pf	Puissance frigorifique
PU	Polyuréthane
PV	Photovoltaïque
SONABEL	Société Nationale Burkinabè d'Electricité
TGBT	Tableau General Basse Tension
VAN	Valeur Actuelle Nette

Table des matières

Dédicaces.....	I
Citations	II
Remerciements	III
Résumé.....	IV
ABSTRACT.....	V
liste des abréviations.....	VI
<i>Table des matières</i>	<i>VII</i>
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES	XI
<i>I. Introduction</i>	<i>1</i>
1. Contexte et justification de l'étude	1
2. Objectifs de l'étude.....	2
<i>II. Présentation de l'entreprise et du projet.....</i>	<i>4</i>
1. Présentation de l'entreprise.....	4
2. Présentation du projet	5
2.1. Présentation de la zone d'étude	5
2.2. Description du projet.....	6
2.3. Schéma descriptif de la chambre froide	6
<i>III. Recherches bibliographiques</i>	<i>8</i>
1. Culture de la pomme de terre	8
1.1. Production et récolte.....	8
1.2. Particularité de stockage.....	9
1.2.1. Conditions de stockage.....	9
1.2.2. Étapes de la conservation	9
2. Chambres froides	10
2.1. Chambres froides	10
2.2. Particularité des chambres froides pour pommes de terre	11
2.3. Cahier de charge du projet	11
3. Isolation des chambres froides	12

VII

IV.	Matériels et Méthodes	13
1.	Choix de l'isolant.....	13
2.	Choix du fluide frigorigène.....	15
3.	Dimensionnement de la chambre froide.....	17
3.1.	Capacité de stockage de la chambre froide	17
3.2.	Calcul des différents apports calorifiques	18
3.3.	Calcul de la puissance frigorifique	22
4.	Dimensionnement du système photovoltaïque.....	22
4.1.	Calcul des caractéristiques du système.....	22
4.1.1.	Configuration du champs PV	22
4.1.2.	Caractéristiques de l'onduleur	23
4.1.3.	Configuration du champ photovoltaïque	23
4.1.4.	Stockage	25
4.1.5.	Section de câbles	26
4.1.6.	Organes de protection.....	26
5.	Etude financière.....	28
V.	Résultats de l'étude technique	29
1.	Tonnage de la chambre froide.....	29
2.	Dimensionnement du groupe froid	29
2.1.	Les apports calorifiques	29
2.1.1.	Apports calorifiques externes	29
2.1.2.	Apports calorifiques internes.....	30
2.1.3.	Charges intermédiaires des évaporateurs.....	31
2.2.	La puissance frigorifique.....	31
2.2.1.	La puissance frigorifique prévisionnelle.....	31
2.2.2.	Les charges dues aux moteurs des ventilateurs	31
2.2.3.	La puissance frigorifique effective de l'installation	32
2.2.4.	Choix des équipements de la chambre froide	32
3.	Dimensionnement du système solaire	33
3.1.	Calcul de la puissance crête	35
3.2.	Calcul de la puissance de l'onduleur	35
3.3.	Configuration du champ PV	36
3.4.	Dimensionnement du parc de batteries.....	36
3.5.	Calcul de la section des câbles	37
3.6.	Choix des organes de protection	38

3.7.	Disposition des panneaux et du champs photovoltaïque	39
4.	Mise en place des mesures d'efficacité énergétique.....	40
5.	Schémas de l'installation	41
VI.	Etude financière du projet	43
1.	Détermination du cout d'investissement	43
2.	Calcul de la VAN.....	45
VII.	Analyse des effets du projet sur l'environnement	48
VIII.	Conclusion	60
	Bibliographie	I
	Annexes A. Présentation du projet et recherches bibliographiques.....	III
	Annexes B. Matériels et méthodes	XII
B.1.	Dimensionnement de la chambre froide	XII
B.2.	Dimensionnement du système solaire photovoltaïque	XVIII

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristique de la pomme de terre sahel[6].	9
Tableau 2 : Conditions de stockage de la pomme de terre[6].	9
Tableau 3 : Tableau comparatif des différents types d'isolants.	14
Tableau 4 : Composition du sol de la chambre froide.	15
Tableau 5 : Tableau comparatif des fluides frigorigènes.	16
Tableau 6 : Paramètres et données obtenues sur le diagramme de l'air humide.	17
Tableau 7 : Volume des chambres froides NRJ Solaire.	17
Tableau 8 : Coefficient de transmission thermique K des parois sandwich en polyuréthane [8]..	19
Tableau 9 : Equipements de l'installation.	22
Tableau 10 : Calibre du parafoudre en fonction de FPV.[10]	27
Tableau 11 : Apports calorifiques par les parois.	29
Tableau 12 : Valeurs des apports calorifiques.	31
Tableau 13 : Spécifications techniques du modèle d'évaporateur choisi.	32
Tableau 14 : Principales données techniques du groupe de condensation.	32
Tableau 15 : Données techniques principales du détendeur.	32
Tableau 16 : Bilan de puissance de l'installation.	34
Tableau 17 : Caractéristiques techniques des panneaux solaires.	35
Tableau 18 : Caractéristiques techniques de l'onduleur.	35
Tableau 19 : Calcul de la distance minimale entre les rangées des panneaux.	36
Tableau 20 : Principales caractéristiques techniques des batteries.	37
Tableau 21 : Section de câbles calculée et normalisée.	38
Tableau 22 : Choix des organes de protection du système.	38
Tableau 23 : Calcul du cout total d'investissement du projet.	43
Tableau 24 : Matrice de synthèse de la caractérisation et de l'évaluation des impacts positifs du projet.	51
Tableau 25 : Matrice de synthèse de la caractérisation et de l'évaluation des impacts négatifs du projet.	53
Tableau 26 : Tableau de gestion de l'impact environnemental et social lors de la phase de conception.	57
Tableau 27 : Tableau de gestion de l'impact environnemental et social lors de la phase d'exploitation.	58
Tableau 28 : Tableau de gestion de l'impact environnemental et social lors de la phase de démantèlement.	58

X

LISTE DES FIGURES

Figure 1:Graphe de l'ensemble des besoins en pommes de terre au Burkina Faso.	1
Figure 2 : Organigramme de l'entreprise de NRJ Solaire.....	4
Figure 3 : Localisation géographique de la ville de Ouahigouya [3].	5
Figure 4 : Graphe de températures de la ville de Ouahigouya au cours de l'année[3].	5
Figure 5 : Graphe de l'humidité relative de la ville de Ouahigouya au cours de l'année[3].....	6
Figure 6 : Rayonnement solaire incident quotidien à Ouahigouya[4].	6
Figure 7 : Disposition des étagères à l'intérieur de la CF.....	7
Figure 8 : Aperçu de la conception de la CF.....	7
Figure 9 : Illustration de la distance minimale sans ombrage.	25
Figure 10 : Section de câble en fonction du courant maximum.[10]	38
Figure 11 : Schéma synoptique de l'installation.....	41
Figure 12 : Schéma unifilaire de l'installation.....	42

I. INTRODUCTION

1. CONTEXTE ET JUSTIFICATION DE L'ETUDE

En plus du manque d'électricité fiable dans de nombreuses régions d'Afrique, le continent fait également face à un défi majeur lié à la conservation des produits agricoles. C'est le cas du Burkina Faso où la culture maraichère constitue un secteur important de l'économie avec des cultures prédominantes telles que celle de la pomme de terre. Le pays produit environ 19 633 tonnes de pommes de terre par an en 2019 [1]. Cependant, près de 40% sont perdus à cause des problèmes liés au stockage post-récolte. La majorité des producteurs entreposent leurs récoltes au maximum pendant quelques semaines dans des cases ou des hangars de fortune à même le sol le temps de les écouler. Le pays se retrouve donc dans l'incapacité de satisfaire la consommation nationale au cours de certaines périodes de l'année et importe plus de 15 000 tonnes de pommes de terre (2020) comme l'illustre le graphe de l'ensemble des besoins en pommes de terre du pays.

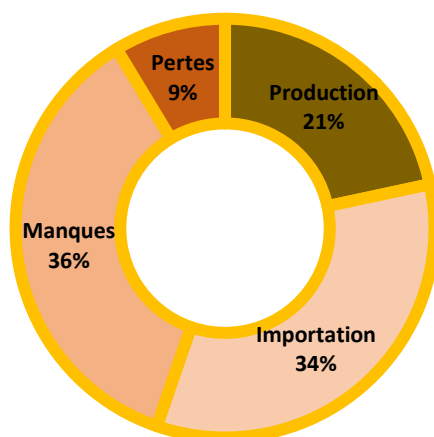


Figure 1: Graphe de l'ensemble des besoins en pommes de terre au Burkina Faso.

Actuellement on note principalement l'utilisation d'une chambre froide pour la conservation des produits maraichers à Loumbila, dans la province de l'Oubritenga, à plus de 200 km de Ouahigouya [2]. Elle a été inaugurée en 2020 et est alimentée par le réseau de la SONABEL. Toutefois, des pertes sont enregistrées notamment durant le transport sous des conditions inadaptées d'acheminement. Les pommes de terre qui arrivent sont stockées dans des sacs posés à même le sol et empilés les uns sur les autres. Ce qui engendrent de la pourriture sur certaines pommes de terre qui finissent par en contaminer d'autres.

Ce mode de stockage n'est pas conforme aux normes, qui exigent une circulation de l'air entre les sacs.

Face à ce problème, l'entreprise NRJ Solaire qui propose des solutions dans le froid solaire veut venir en aide au marché burkinabé. Dans le cadre du stage effectué au sein de l'entreprise, le travail a consisté à concevoir une chambre froide solaire adaptée aux besoins des agriculteurs de la ville de Ouahigouya afin de permettre une conservation meilleure et efficace, à long terme, des pommes de terre post-récoltes.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Le principal objectif de notre travail est la conception d'une chambre froide positive alimentée par du solaire photovoltaïque dans le but de faciliter la conservation des produits agricoles post-récolte tout en lui apportant des mesures d'efficacité énergétique.

Pour aboutir à l'objectif principal de notre projet, les objectifs spécifiques à atteindre sont les suivants :

➡ Réaliser le dimensionnement de la chambre froide à travers :

- ✚ Le calcul des différents apports de chaleur ;
- ✚ La détermination de la puissance frigorifique ;
- ✚ Le choix du fluide frigorigène ;
- ✚ Le choix du compresseur et du groupe froid.

➡ Réaliser le dimensionnement du système solaire photovoltaïque, ce qui passe par :

- ✚ Le calcul de la puissance crête de l'installation ;
- ✚ Le calcul de la puissance de l'onduleur ;
- ✚ Le calcul de la capacité des batteries ;
- ✚ Le choix des différents éléments du système.

➡ Réaliser l'étude financière du projet.

Ainsi le travail s'est articulé autour de ces trois axes principaux.

Dans un premier temps, il a été question d'aborder le projet par un travail de recherche portant sur les particularités de stockage des pommes de terre ainsi que sur le fonctionnement des chambres froides.

Ensuite nous avons abordé la problématique de la conception de la chambre froide solaire à travers les dimensionnements du groupe froid, du système solaire photovoltaïque ainsi que les choix des différents équipements en adoptant des mesures d'efficacité énergétique pour une consommation d'énergie plus responsable.

Enfin, nous avons évalué le coût financier et l'impact environnemental des solutions conceptuelles établies afin de mesurer la viabilité du projet.

II. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET DU PROJET

1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

NRJ Solaire est une entreprise axée sur la conception et la réalisation d'installations électriques solaires. Elle a été fondée en 2010 au Sénégal par son directeur, Monsieur Amadou WADE BANE. Les locaux de l'entreprise sont situés à Derklé cité ASECNA 1, route du front de terre à Dakar. L'entreprise emploie plusieurs personnes suivant l'organigramme :

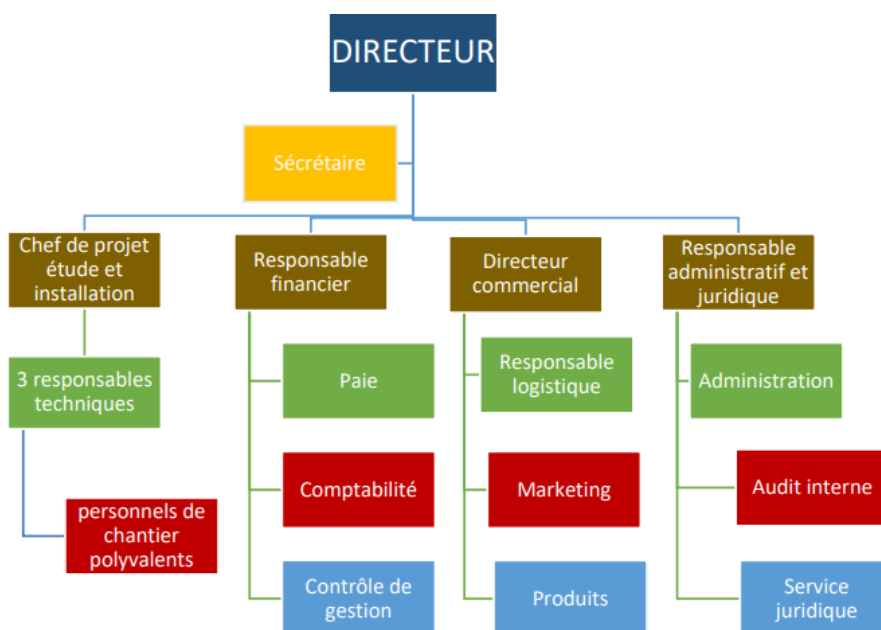


Figure 2 : Organigramme de l'entreprise de NRJ Solaire.

➡ Activités de l'entreprise

Les principaux domaines d'activités couverts par l'entreprise NRJ Solaire sont entre autres :

- ✚ **La commercialisation** de matériels solaires photovoltaïque (panneaux, onduleurs, batteries) ;
- ✚ **L'énergie** à travers la conception et la réalisation d'installations solaires photovoltaïques dans les domaines de l'habitation, du tertiaire, de l'industrie ou encore du froid (systèmes de pompage solaire, chauffe-eau solaire, centrale solaire on-grid et off-grid, chambre froide solaire.);
- ✚ **Le génie civil** par les constructions métalliques telles que les locaux techniques, les guerites, les chambres sous-terraines (L3T-L5T-L6T-M2T).

A côté de ces domaines d'activités spécifiques, l'entreprise œuvre également dans les audits et réparation d'appareils, les télécommunications, l'électrification et les métiers de l'eau.

2. PRESENTATION DU PROJET

2.1. Présentation de la zone d'étude

La zone choisie pour la mise en place de la chambre froide est la ville de Ouahigouya chef-lieu de la région nord du Burkina Faso. Ce choix se justifie par le fait que la pomme de terre est majoritairement produite dans cette partie du pays.

La ville de Ouahigouya est localisée à une latitude de 13°35'00"Nord et une longitude de 2°25'00"Ouest.



Figure 3 : Localisation géographique de la ville de Ouahigouya [3].

➡ Conditions climatiques de la zone d'étude

Les Figure 4, 05 et 06 résument les conditions climatiques de la ville de Ouahigouya :

- ✚ La température moyenne annuelle de la ville est estimée à 38°C avec respectivement une température maximale et minimale de 42°C et 19°C ;
- ✚ L'humidité relative annuelle quant à elle est de l'ordre de 40% avec respectivement une humidité maximale et minimale de 77% et 17% ;
- ✚ Enfin, le rayonnement solaire incident journalier varie entre 5,2 et 6,8 kWh/m²/jr.

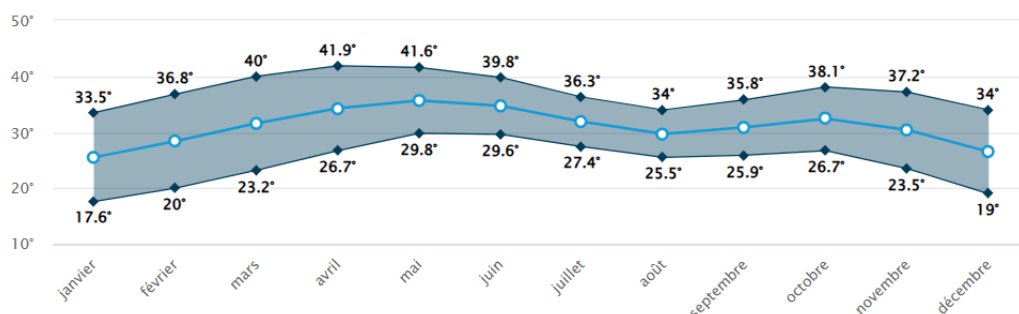


Figure 4 : Graphe de températures de la ville de Ouahigouya au cours de l'année[3].

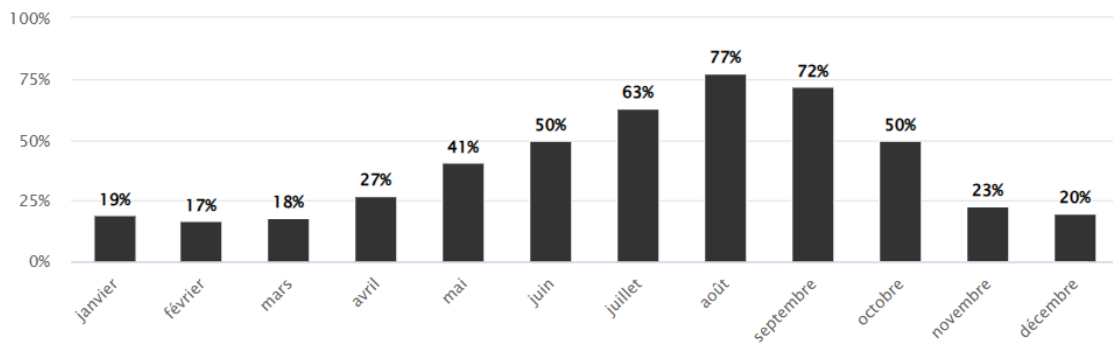


Figure 5 : Graphe de l'humidité relative de la ville de Ouahigouya au cours de l'année[3].

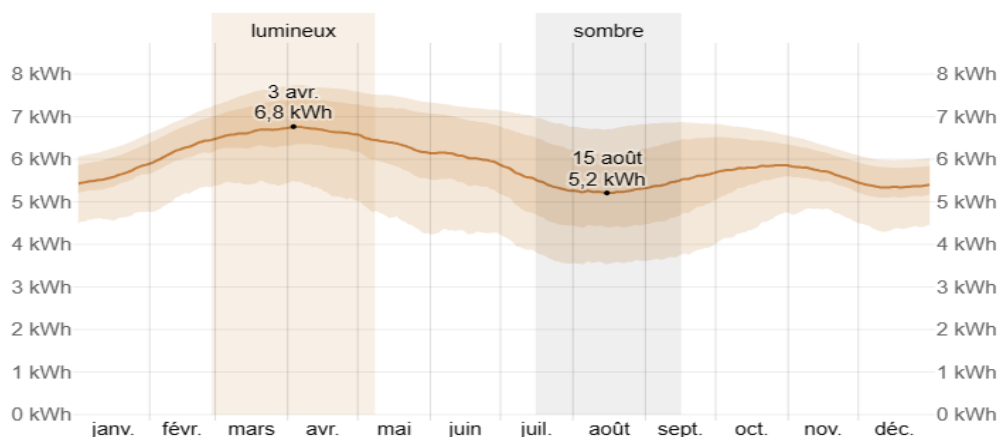


Figure 6 : Rayonnement solaire incident quotidien à Ouahigouya[4].

2.2. Description du projet

L'objectif principal du projet est la conception d'une chambre froide positive alimentée par du solaire photovoltaïque dans le but de faciliter la conservation des produits agricoles post-récolte tout en lui apportant des mesures d'efficacité énergétique.

2.3. Schéma descriptif de la chambre froide

Dans le but d'assurer une bonne conservation des produits, les mesures suivantes ont été proposées:

- ✚ La mise en place d'étagères rack pour le rangement des sacs de pommes de terre de sorte à faciliter la circulation de l'air

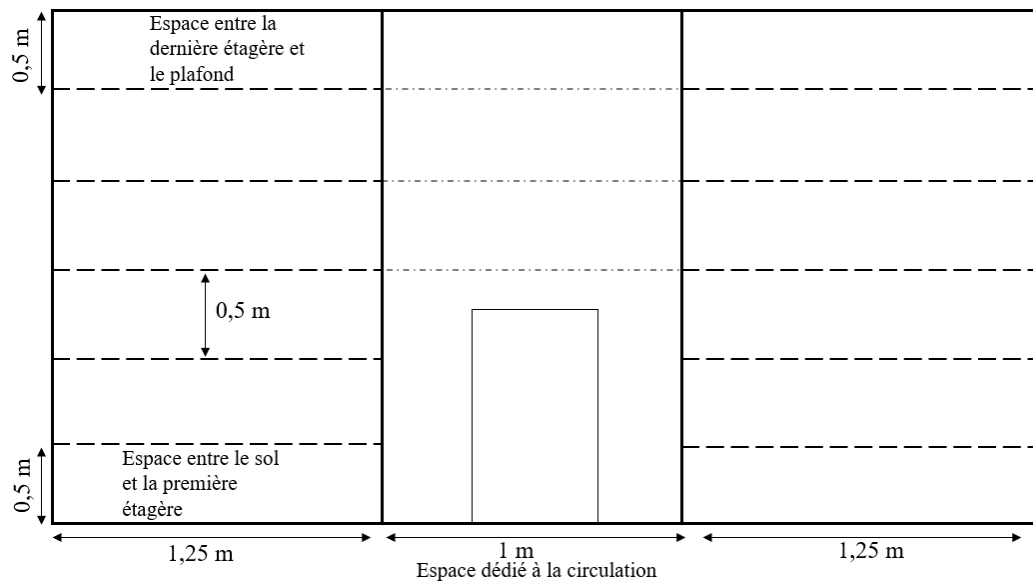


Figure 7 : Disposition des étagères à l'intérieur de la CF.

✚ La chambre froide sera placée sous un hangar comme l'illustre la Figure 8 afin de la protéger des rayonnements directs du soleil qui peuvent constituer un apport de chaleur important et jouer sur la capacité du groupe froid à fournir le refroidissement nécessaire pour conserver les pommes de terre. L'autre avantage de l'utilisation de ce hangar est que les panneaux solaires seront posés en toiture de ce dernier, des deux côtés. Ainsi, ils capteront directement le rayonnement solaire et cela permettra d'optimiser l'occupation de l'espace.

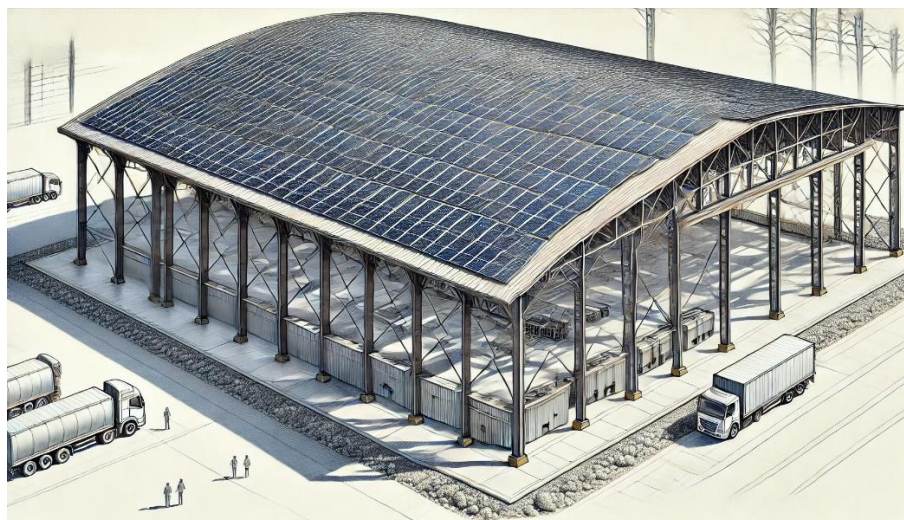


Figure 8 : Aperçu de la conception de la CF.

III. RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

1. CULTURE DE LA POMME DE TERRE

1.1. Production et récolte

Production


L'agriculture représente un secteur important de l'économie du Burkina Faso. Les cultures les plus rentables sont l'oignon, la tomate, la pomme de terre, les choux, l'aubergine, la carotte, le concombre et le haricot vert [5]. De toutes ces cultures, celle de la pomme de terre est celle qui engendre le plus de pertes à cause de la haute périssabilité des produits.

La pomme de terre est essentiellement produite dans la région Nord où elle occupe 77% des superficies et fournit 80% de la production nationale de pommes de terre. La principale saison de culture est la saison sèche et fraîche, les plantations sont effectuées d'octobre à décembre. On enregistre une production totale d'environ 19 500 t par an, cependant à cause des pertes importantes cette production est négligeable face aux quantités importées.

Récolte

La durée du cycle de culture est variable de 65 à 90 jours après plantation selon la destination de la production, la demande du marché mais surtout selon la variété de pommes de terre cultivée. La variété majoritairement cultivée au Burkina Faso est la pomme de terre de type sahel. Les agriculteurs font une plantation de pommes primeur qui est récoltée en fin décembre (pomme de terre récoltées avant complète maturité) ainsi qu'une plantation contre saison dont les récoltes se font en mars.

Tableau 1 : Caractéristique de la pomme de terre sahel[6].

Variété	Photo	Cycle	Rendement	Calibre	Conservation	Production (En nombre de jours)	Récolte (En nombre de jours)
Sahel		Précoce	Bon	Gros	Très bonne	Prégermination : 14 Levée : 7 Périodes de culture : 70 à 80	Petits tubercules : 2 Moyens tubercules : 4 Gros tubercules : 5

1.2. Particularité de stockage

1.1.1. Conditions de stockage

Chaque denrée possède des particularités de stockage qui lui sont spécifiques. Pour le cas de la pomme de terre, la réussite de la conservation frigorifique se mesure à travers le pourcentage de pertes en eau. Ce dernier ne doit pas excéder 3% par déshydratation et 2% par pourritures. Afin de respecter ces conditions il est nécessaire de maintenir des valeurs de température et d'humidité relative précises comme mentionné dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Conditions de stockage de la pomme de terre[6].

Durée de stockage	Destination de la production	Température de stockage	Humidité relative de stockage	Renouvellement d'air
Moins de 3 mois	Consommation Transformation Semence	8 à 10 °C 8 à 10 °C 5 à 12 °C	85 à 90%	3 à 5 m ³ /h
Plus de 3 Mois	Consommation Transformation Semence	4 à 7 °C 7 à 8 °C 2 à 4 °C		

Ainsi, à partir de ces données, nous fixons la température, l'humidité relative ainsi que le taux de renouvellement d'air de stockage à respectivement 4°C, 90% et 4 m³/h.

1.1.2. Étapes de la conservation

Avant de conserver les pommes de terre dans la chambre froide, certaines étapes doivent être

respectées. Il s'agit entre autres :

- ✚ Du séchage : il n'est pas nécessaire pour les pommes de terre de saison arrachées en conditions sèches mais plutôt pour les pommes de terre récoltées en période humide soit en arrière-saison;
- ✚ De la cicatrisation des blessures : l'arrache mécanique occasionne des blessures qui doivent être subérisées afin de prévenir les pourritures dues aux champignons ou aux bactéries.
- ✚ Du refroidissement : cette étape succède à la cicatrisation et consiste à abaisser la température de façon graduelle à raison de 0,5 à 1 °C par jour jusqu'au niveau préconisé (ici, 4 °C);
- ✚ Du reconditionnement avant le déstockage : étant conservées au froid, les pommes de terre sont très sensibles aux blessures, aux chocs ainsi qu'au noircissement interne. Aussi, un réchauffement préalable à une température de 15 °C pendant 7 à 10 jours est nécessaire avant le déstockage.

2. CHAMBRES FROIDES

1.3. Chambres froides

Il existe deux types de chambres froides en fonction de la température de stockage :

✚ *Chambres froides positives*

Les chambres froides positives sont des chambres froides dans lesquelles la température avoisine les 0°C en restant le plus souvent légèrement au-dessus avec une température généralement référente de 3°C mais qui peut aller au-delà en fonction du produit à stocker. Elles maintiennent les produits frais et sont pour la plupart utilisées pour la conservation des fruits et des légumes.

✚ *Chambres froides négatives*

Les chambres froides négatives quant à elles sont des chambres froides au sein desquelles la température est maintenue en dessous de 0°C, généralement aux alentours de -18°C dépendamment du type de produits conservés. Elles sont indiquées pour la congélation des produits tels que les viandes ou encore les poissons.

Qu'elle soit positive ou négative, la chambre froide doit être le mieux isolée possible afin de limiter au maximum les transferts thermiques avec le milieu extérieur.

1.4. Particularité des chambres froides pour pommes de terre

Les légumes en général et les pommes de terre en particulier sont conservés dans des chambres froides de types positives. Cependant leur conservation nécessite le respect de certaines conditions :

- La chambre froide doit être correctement isolée afin de maintenir les conditions internes le plus stables possibles et éviter les fluctuations ;
- La température doit être maintenue entre 4 et 10°C;
- L'humidité devra être comprise entre 85 et 95% afin d'éviter le phénomène de transpiration qui est responsable de près de 90% de la perte de poids et qui peut entraîner la dépréciation de la qualité des tubercules ;
- Une bonne circulation de l'air à l'intérieur de la chambre froide notamment grâce aux ventilateurs.

La chambre froide devra être équipée d'appareils de contrôle de température et de pression afin de toujours s'assurer que les conditions de conservation soient respectées.

1.5. Cahier de charge du projet

Afin de mener à bien ce projet, il a fallu dans un premier temps établir un cahier de charges en se basant sur les conditions du milieu extérieur ainsi que celles attendues à l'intérieur de la CF.

✚ Les conditions internes de stockage la chambre froide

La conservation de pommes de terre doit respecter un certain nombre de conditions notamment en ce qui concerne la température de stockage et l'humidité relative. Il est recommandé de maintenir une température comprise entre 4 et 10°C et une humidité relative comprise entre 85 et 90% à l'intérieur de la chambre froide [7].

✚ Conditions du milieu extérieur

Pour ce qui est du milieu extérieur, les Figure 4 et 05 nous donnent les températures et les humidités relatives pour chaque mois de la ville de Ouahigouya. Nous travaillerons avec les conditions du mois le plus défavorable (qui est ici le mois d'avril avec une température de presque 42°C et une humidité relative de 27%).

✚ Sources d'énergies

La chambre froide sera alimentée par la ressource solaire. Cependant vue le caractère intermittent de cette dernière nous prévoyons des solutions pour compenser les jours de faible

ensoleillement notamment à travers la mise en place d'un système de stockage ainsi que l'utilisation d'un onduleur de type hybride capable de fonctionner avec le réseau électrique en plus de l'énergie des panneaux et des batteries.

3. ISOLATION DES CHAMBRES FROIDES

Les isolants thermiques sont des matériaux qui résistent aux passages de l'énergie. Ils créent une barrière qui empêchent les transferts d'énergie avec le milieu extérieur et maintiennent ainsi constante la température du milieu intérieur. Le choix du type et de la matière de l'isolant est donc une étape essentielle de la conception d'une chambre froide et se fait en fonction de nombreux critères (la conductivité thermique, la densité de l'isolant, les propriétés acoustiques, l'inflammabilité, l'impact sur l'environnement ainsi que le coût) . Plusieurs formes d'isolation sont disponibles sur le marché, cependant on assiste à l'essor des panneaux sandwich qui offre un haut niveau de résistance idéal pour les chambres froides.

IV. MATERIELS ET METHODES

Dans cette partie il est question de présenter toutes les méthodes de travail qui ont été utilisées afin de réaliser le projet. Il s'agit des différentes équations, formules employées ainsi que des logiciels utilisés.

2. CHOIX DE L'ISOLANT

Comme mentionné plus haut, le choix de l'isolant est une étape cruciale de la conception de notre chambre froide, afin d'effectuer le meilleur choix nous avons comparé plusieurs types d'isolants selon de nombreux critères.

Tableau 3 : Tableau comparatif des différents types d'isolants.

Types d'isolants	Pouvoir isolant (W/m.K)	Inflammabilité (A à E)	Isolation acoustique	Recyclabilité	Prix	Avantages	Inconvénients
Ouate de cellulose	0,038 à 0,042	B	Bonne	Difficile	Bas	Bon marché	Sujette au tassement
Laine de bois	0,036 à 0,046	E	Bonne	Facile	Bas	Bonne longévité	Sensible à l'humidité
Liège expansé	0,037 à 0,041	E	Très bonne	Facile	Elevé	Bonne longévité	Prix élevé
Laine de verre	0,032 à 0,046	A	Bonne	Difficile	Bas	Facile à installer	Sujette au tassement
Vermiculite	0,060 à 0,080	A	Bonne	Facile	Bas	Bonne longévité	Sensible à la vapeur d'eau
Polyuréthane	0,022 à 0,028	E	Faible	Moyen	Bas	Resistance élevée à l'humidité	Irritation en cas de contact prolongé
Polystyrène extrudé	0,027 à 0,040	E	Faible	Difficile	Bas	léger	Gaz toxique

Justification du choix de l'isolant

Nous nous sommes tournés vers le polyuréthane pour assurer l'isolation des murs et du plafond de notre chambre froide. Bien qu'il présente quelques inconvénients de par les risques d'irritabilité en cas de contact prolongé ou encore à travers le recyclage moins évident, le polyuréthane n'en reste pas moins un des meilleurs isolants existants sur le marché. Ceci s'explique par sa faible conductivité thermique (une des plus faibles, de l'ordre de $0,022 \text{ kW/m}^2$ comme l'indique le Tableau 3) qui lui octroie une grande résistance thermique R et ne nécessite donc qu'une très faible épaisseur d'isolant.

De plus il s'agit d'un matériau particulièrement résistant à l'humidité et aux moisissures. La pomme de terre étant une denrée dont le stockage se fait à humidité élevée (de l'ordre de 80 à 90%), cela représente alors un atout non négligeable.

Nous observons également de plus en plus l'utilisation de panneaux sandwichs en polyuréthane pour l'isolation des chambres froides. Ces derniers sont composés de 3 couches au total ; d'une couche d'isolant en mousse polyuréthane (PU) entouré de 2 feuilles en inox ou en acier galvanisé appelé parements. Il est 5 fois plus léger et 2 fois moins épais que les isolants de nature différente à performance équivalente.

Pour ce qui est du sol, il sera composé d'une superposition de prédalle en béton sur terre-plein, d'une barrière d'étanchéité (en bitume), d'une couche de mousse rigide de polyuréthane, d'une dalle de compression, d'une chape et d'un pavage tel que résumé dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Composition du sol de la chambre froide.

	e (m)	λ (W/m.K)	e/λ (m.K/W)
Prédalle en béton sur terre-plein	0,15	1,279	0,1173
Barrière d'étanchéité en bitume	0,015	0,16	0,0938
Mousse rigide de polyuréthane	0,10	0,03	3,333
Dalle de compression	0,10	1,279	0,0782
Chape	0,05	1,924	0,026
Résine en polyuréthane	0,015	0,24	0,0625
Total	$e/\lambda = 3,7108 \text{ m.K/W}$		

3. CHOIX DU FLUIDE FRIGORIGÈNE

Le choix du fluide frigorigène est une étape importante du dimensionnement de tout système de froid en général. Pour le choix de celui de la chambre froide nous avons comparé dans un

tableau plusieurs fluides afin d'être sûr de choisir le mieux adapté .

Tableau 5 : Tableau comparatif des fluides frigorigènes.

Propriétés physiques	Fluides					
	R513a	R134a	R410a	R32	R22	R404a
Poids moléculaire (g/mol)	108,4	102	72,6	52,04	86,5	97,61
Température d'ébullition à 1,013 bar (°C)	-29,2	-26,1	-51,58	-51,7	-40,8	-46,45
Température critique (°C)	96,5	101,1	72,13	78,35	96,1	72,07
Pression critique (bar)	37,67	40,67	49,26	58,11	49,9	37,31
Pression de vapeur à 25°C (bar)	516,75	508	488,90	429	523	484
Densité critique (kg/m ³)	7,06	6,657	16,5	16,897	10,45	12,42
Inflammabilité	Non	Non	Non	Peu inflammable	Non	Non
ODP	0	0	0	0	0,55	0
GWP	631	1430	2088	675	1760	3922

Après avoir comparé les différents fluides, le choix final c'est porté sur le R404A. C'est un mélange zéotropique de fluoroéthane : R143a (1,1,1-trifluoroéthane, 52 %), de R125 (pentafluoroéthane, 44 %) et de R134a (1,1,1,2-tétrafluoroéthane, 4 %), qui se comporte comme un fluide quasi-azéotropique, de type HFC. Bien que son GWP soit assez élevé comparé aux autres, le choix se justifie :

- ✚ Il s'agit d'un fluide disponible et répandu sur le marché au Burkina Faso, il sera donc facile de s'en procurer contrairement à certains fluides tels que le R513A ;
- ✚ Du fait de sa popularité, les techniciens locaux sont plus familiers à ce fluide ce qui facilitera les opérations de maintenance ;
- ✚ Il possède de bonnes capacités thermodynamiques ce qui offre une efficacité de refroidissement adéquate pour une large gamme de températures ;
- ✚ Il est compatible avec une large gamme de matériaux ce qui offre une grande flexibilité quant aux choix des équipements ou en cas de panne nécessitant un remplacement de composants ;
- ✚ Malgré son GWP élevé, il est encore utilisé dans de nombreuses applications.

4. DIMENSIONNEMENT DE LA CHAMBRE FROIDE

Afin de déterminer les différents apports calorifiques de la chambre froide il a fallu dans un premier temps fixer certains paramètres tels que la température et l'humidité relative de stockage. Placer ces paramètres sur le diagramme de l'air humide, a permis d'obtenir les enthalpies internes, externes ainsi que les volumes spécifiques de nos points (Figure B. 1 de l'annexe B). Les données obtenues grâce au diagramme sont répertoriés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Paramètres et données obtenues sur le diagramme de l'air humide.

Paramètres	Conditions externes	Conditions internes
Température (° C)	42	4
Humidité relative (%)	27	90
Enthalpie lue sur le diagramme de l'air humide (kJ/kg)	77,8	15,4
Volume spécifique (m ³ /kg _{as})	0,912	0,790

4.1. Capacité de stockage de la chambre froide

L'entreprise NRJ Solaire propose une gamme de chambre froides de volume différents comme le montre le Tableau 7. Des étagères, des compartiments et d'autres équipements peuvent y être installés afin d'optimiser l'utilisation de l'espace et l'organisation des produits mais aussi en fonction des besoins et des spécifications de l'utilisateur.

Tableau 7 : Volume des chambres froides NRJ Solaire.

Chambres froides	Volume (m ³)	Dimensions (m)
Standard	10	2,5×2×2
Modèle 2	20	3×3×2,5
Modèle 3	30	3,5×3,5×2,45

Afin de garantir une capacité de stockage maximale, le dimensionnement se fera selon le volume maximal de 30 m³.

Tonnage de la chambre froide

Il s'agit de la quantité que pourra contenir la chambre froide. On l'obtient à travers la formule :

$$Q_{\text{stockage}} = V_{\text{utile}} \times \text{densité entreposage} \quad (1)$$

Avec

Q_{stockage} : la quantité de stockage de la chambre froide [t] ;

V_{utile} : le volume utile (volume brut auquel on soustrait les espaces dédiés à la circulation) [m^3];

Densité d'entreposage = 400 kg/m^3 pour les pommes de terre en sacs [8].

4.2. Calcul des différents apports calorifiques

Les apports calorifiques peuvent être regroupés en charges thermiques externes et internes comme suit :

Charges thermiques externes

- Apport de chaleur par les parois

Il s'agit de la quantité de chaleur dégagée à travers les parois de la chambre froide (murs, plafond, sol) due aux phénomènes de transferts thermiques que sont la convection, la conduction et le rayonnement.

$$Q_1 = K \times S \times \Delta T \quad (2)$$

Avec

Q_1 : la quantité de chaleur produite par les parois [W] [8];

K : le coefficient d'échange thermique [$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$];

S : la surface de la paroi [m^2];

ΔT : la différence de température entre le milieu extérieur et le local [$^\circ\text{C}$].

Le coefficient d'échange global s'obtient grâce à la relation [8]

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}} \quad (3)$$

Avec

h_{int} : le coefficient de convection intérieur [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$];

h_{ext} : le coefficient de convection extérieur [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$];

e_i : l'épaisseur de la paroi [m];

λ_i : la conductivité thermique de la paroi i [$\text{W/m. } ^\circ\text{C}$].

Il existe des tableaux qui donnent les coefficients de transmission thermique des parois de type sandwich utilisés pour la construction des chambres froides.

Tableau 8 : Coefficient de transmission thermique K des parois sandwich en polyuréthane [8].

Epaisseur d'isolants (mm)	Coefficient K (W/m ² °C)	Ecart de température conseillé (°C)
50	0,39	20
60	0,32	-
70	0,26	34
80	0,24	-
100	0,19	45
125	0,15	56
150	0,13	70
160	0,12	-
180	0,11	-
200	0,10	-

- Apport de chaleur par le renouvellement d'air

Il est nécessaire de renouveler l'air dans la chambre froide afin d'éviter tout confinement, cependant ce renouvellement d'air engendre de la chaleur que le système doit évacuer. Cette quantité de chaleur s'obtient à travers la formule

$$Q_2 = \frac{n \times V \times \rho_{aa} \times \Delta_h}{86400} \quad (4)$$

Avec

Q_2 : la quantité de chaleur produite par renouvellement d'air [W] [8];

n : taux de renouvellement d'air par jour ;

$n = 17$ [8] ;

V : volume intérieur de la chambre froide [m³] ;

ρ_{aa} : la masse volumique de l'air dans la chambre froide [kg/m³] ;

Δ_h : la différence d'enthalpie entre le milieu extérieur et le milieu ambiant de la CF [J/kg].

Charges thermiques internes

- Apport de chaleur par la respiration des denrées

Etant des organismes vivants, les denrées stockées telles que la pomme de terre dans ce cas

respirent en dégageant de la chaleur. Cette quantité de chaleur se détermine par

$$Q_3 = \frac{m \times q_r}{86400} \quad (5)$$

Avec

Q_3 : la quantité de chaleur produite par respiration de denrées [W] [8];

m : la masse de denrées [kg];

q_r : la chaleur de respiration de denrées [J/kg/24h] ;

$q_r = 7,54 \text{ kJ kg } 24\text{h}$ [9].

- Apport de chaleur du à l'introduction des denrées

Cet apport de chaleur s'explique par le fait que les denrées introduites dans la chambre froide sont presque toujours à une température supérieure à celle de consigne de la chambre froide. Ils dégagent une quantité de chaleur aussi longtemps que leur température n'est pas redescendue à celle de stockage. Cet apport de chaleur se calcule par :

$$Q_4 = \frac{m \times c \times \Delta_T}{86400} \quad (6)$$

Avec

Q_4 : la quantité de chaleur produite par introduction des denrées [W] [8] ;

m : la masse de denrées introduite [kg] ;

C : la chaleur spécifique [J/kg °C] ;

$C = 3,44 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ [9];

Δ_T : la différence de température entre le sas de refroidissement et la chambre froide en [°C].

- Apport de chaleur du aux personnes

Il s'agit de la quantité de chaleur dégagée par l'activité du personnel dans la chambre froide en fonction de l'activité menée. Elle est calculée par la formule

$$Q_5 = \frac{n \times q \times t}{24} \quad (7)$$

Avec

Q_5 : la quantité de chaleur émise par le personnel [W] [8];

q : la chaleur dégagée par personne et par heure [W] ;

$q = 372 \text{ W}$ pour un travail intense (Tableau B. 1) ;

t : la durée de la présence [h] ;

n : le nombre de personne dans la chambre froide.

- Apport de chaleur du à l'éclairage

Cet apport correspond à la quantité de chaleur dégagée par l'éclairage à l'intérieur de la chambre froide. Pour une conception on prévoit généralement un niveau d'éclairage de 6 W/m²[8], on procède au calcul à travers la formule

$$Q_6 = \frac{P \times S \times t}{24} \quad (8)$$

Avec

Q_6 : la quantité de chaleur émise par l'éclairage [W] ;

t : le temps d'éclairage [h] ;

P : la puissance de chaque luminaire [W/m²] [8] ;

S : la surface de la chambre froide.

Puissance frigorifique intermédiaire

A ce stade, on détermine la puissance intermédiaire que les évaporateurs devront gérer afin d'assurer le bon fonctionnement du système et de couvrir les charges thermiques intermédiaires.

$$P_{int} = \frac{Q_{int} \times 24}{t_{inst}} \quad (9)$$

Avec

P_{int} : la puissance frigorifique intermédiaire [W] [8];

t_{inst} : la durée de marche de l'installation qui correspond à 16h [8] ;

Q_{int} représente la charge thermique intermédiaire et s'obtient en faisant la somme des charges tel que :

$$Q_{int} = \sum_{i=1}^n Q \quad (10)$$

Puissance frigorifique prévisionnelle

Elle permet de déterminer de façon provisoire la puissance des évaporateurs et s'obtient en ajoutant 20% à la puissance frigorifique intermédiaire [8].

$$P_{prev} = 1,2 \times P_{int} \quad (11)$$

Charges thermiques dues aux moteurs des ventilateurs

Cette charge s'explique par le fait que les moteurs des ventilateurs devant les faire fonctionner pendant 24 h, ils dégagent une chaleur supplémentaire à évacuer du local.

$$Q_{vent} = \frac{n \times P \times t_{evap}}{24} \quad (12)$$

Avec

Q_{vent} : la quantité de chaleur émise par les moteurs des ventilateurs en [W] [8] ;

t_{evap} : la durée de fonctionnement des moteurs des ventilateurs [h/jour] ;

P : la puissance des moteurs de ventilateurs [W] ;

n : le nombre de moteurs de ventilateurs.

4.3. Calcul de la puissance frigorifique

Il s'agit de la puissance effective. Elle s'obtient en ajoutant à la puissance intermédiaire la puissance des moteurs des ventilateurs.

$$P_{eff} = P_{prev} + Q_{vent} \quad (13)$$

5. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Afin de déterminer la puissance crête, il a fallu dans un premier temps estimer le besoin journalier de l'installation en fonction des équipements listés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Equipements de l'installation.

Equipements	Nombre
Lampes LED	10
Groupe froid	1
Moteur des ventilateurs du groupe froid	1
Moteur des ventilateurs des évaporateurs	4

5.1. Calcul des caractéristiques du système

Le dimensionnement du système PV passe par le calcul de la puissance crête des panneaux à installer, de la puissance de l'onduleur ainsi que de la capacité des batteries de stockage.

5.1.1. Configuration du champs PV

Puissance crête

Elle désigne la puissance maximale que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.

$$P_C = \frac{E_j}{R_P \times E_S} \quad (14)$$

Avec

P_c : la puissance crête [kWc] ;

E_j : le besoin énergétique journalier [kWh] ;

R_p : le ratio de performance qui varie généralement entre 70 et 95%, pour ce travail une valeur de 80% sera retenue. Il prend en compte les pertes dues à divers facteurs comme l'orientation des panneaux, les ombrages, l'efficacité de l'onduleur, etc. Le ratio de performance permet donc de modéliser les pertes en performance du système par rapport à l'idéal;

E_s : l'ensoleillement [kWh/m²] .

Nombre de panneaux solaires

$$\text{Nombre panneaux} = \frac{P_c}{P_n} \quad (15)$$

Avec

P_n : la puissance nominale d'un panneau [Wc] .

5.1.2. Caractéristiques de l'onduleur

Puissance de l'onduleur

Elle est déterminée par l'équation :

$$0,90 \times P_c \leq P_{ond} \leq 1,1 \times P_c \quad (16)$$

Avec

0,90 et 1,1 étant des coefficients de sécurité ;

P_{ond} : la puissance de l'onduleur [kVA] ;

P_c : la puissance crête installée [kW] .

5.1.3. Configuration du champ photovoltaïque

Nombre de modules par strings

$$\frac{V_{min_{MPP_{ond}}}}{V_{min_{mod}}} \times 1,1 < N_s < \frac{V_{max_{MPP_{ond}}}}{V_{max_{mod}}} \times 0,95 \quad (17)$$

Où $V_{min_{ond}}$ et $V_{max_{ond}}$ se calculent respectivement par les formules ci-après

$$V_{min_{mod}} = V_{mp_{mod}} + \frac{K_{T,mp}}{100} (T_{max_{mod}} - T_{stc}) \quad (18)$$

$$V_{max_{mod}} = V_{oc_{mod}} - \frac{KT, V_{oc}}{100} (T_{min_{mod}} - T_{stc}) \quad (19)$$

Avec

N_s : le nombre de modules par strings ;

$V_{\min_{MPP_{ond}}}$ et $V_{\max_{MPP_{ond}}}$: respectivement les tensions minimales et maximales de la plage MPPT de l'onduleur [V];

K_{tmp} : le coefficient de température à puissance maximale [%/°C] ;

$V_{\min_{mod}}$ et $V_{\max_{mod}}$: respectivement les tensions minimales et maximales du module [V] ;

$T_{\min_{mod}}$ et $T_{\max_{mod}}$: respectivement les températures minimales et maximales des panneaux [°C] ;

T_{stc} : la température en conditions standard égale à 25°C.

 **Le nombre de modules en parallèle**

$$N_p \leq \frac{I_{DC_{max_{ond}}}}{I_{SC_{mod}}} \quad (20)$$

Avec

N_p : le nombre de modules en parallèle;

$I_{DC_{max_{ond}}}$: le courant maximal de l'onduleur [A];

$I_{SC_{mod}}$: le courant de court-circuit du module [A].

 **Distance minimale sans ombrage entre les rangées de panneaux**

Il s'agit de la distance minimale à respecter entre les rangées de panneaux afin d'éviter le phénomène d'ombrage qui peut engendrer une perte d'efficacité des panneaux. Cette distance se calcule suivant la formule :

$$D = \frac{L \times \sin[180 - \alpha - \beta]}{\sin \beta} \quad (21)$$

Avec

β : angle solaire incident calculé par la formule $\beta = 90 - Lat \pm 23,45$ selon la position du midi solaire dans l'hémisphère Nord ou Sud;

Lat : latitude du lieu en ;

α : l'angle d'inclinaison des panneaux;

L : la longueur d'un panneau [m].

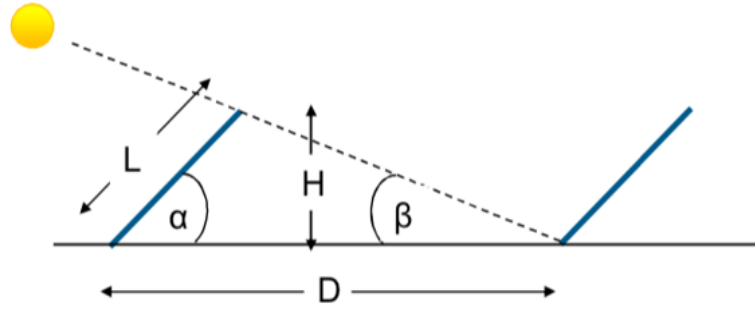


Figure 9 : Illustration de la distance minimale sans ombrage.

5.1.4. Stockage

La capacité des batteries

Elle désigne la capacité qu'à la batterie à restituer l'énergie qu'elle a stockée après avoir été chargée dans les normes requises. On détermine la capacité d'une batterie à travers la formule

$$C_{tb} = \frac{E_j \times J_{aut}}{d_p \times U_s \times R_g} \quad (22)$$

Avec

E_j : le besoin énergétique journalier [kWh];

J_{aut} : le nombre de jour d'autonomie;

d_p : la profondeur de décharge de la batterie;

U_s : la tension du système [V];

R_g : le rendement global incluant le rendement de l'onduleur, des batteries ainsi que les pertes au niveau des câbles.

Le nombre de batteries en série

$$N_s = \frac{U_s}{U_{batt}} \quad (23)$$

Avec

N_s : le nombre de batterie en série;

U_s : la tension du système [V];

U_{batt} : la tension d'une batterie [V].

Le nombre de batteries en parallèle


$$N_p = \frac{C_{tb}}{C} \quad (24)$$

Avec

N_p : le nombre de batteries en parallèle;

C_{tb} : la capacité des batteries;


C : la capacité d'une batterie.

 **Le nombre total de batteries**

$$N_t = N_s \times N_p \quad (25)$$

5.1.5. Section de câbles

La section de câble renvoie à la taille du conducteur qui permet de faire passer le courant électrique. Elle se calcule selon plusieurs paramètres comme l'illustre l'équation

 **Côté AC et DC**

$$S_{min} = b \times \frac{\rho \times l \times I_b}{\Delta U \times V_n} \quad (26)$$

Avec

S_{min} : la section du câble [mm];

V_n : la tension nominale [V];

ρ : la résistivité du câble en cuivre [$\Omega\text{m}/\text{mm}^2$] = 0,017 $\Omega\text{m}/\text{mm}^2$;

l : la longueur [m];

ΔU : la chute de tension (généralement considérée comme égal à 1% et 3% respectivement qu'on soit en AC et en DC);

b : respectivement égal à 1 et 2 en AC et DC.

I_b : la valeur maximale du courant transitant dans le câble [A] obtenue par la formule

$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_n \times \cos\phi} \quad (27)$$

P : la puissance de l'installation [W] ;

V_n : la tension considérée [V] ;

$\cos \phi$: facteur de puissance qui est de 0,9.

5.1.6. Organes de protection

 **Parafoudre AC et DC**

Il permettra de protéger l'installation des surtensions transitoires causées par la foudre ou par des perturbations électromagnétiques. Son calibre est choisi en fonction du niveau d'exposition de la zone qui est déterminé par la formule

$$FPV = N_K \times (1 + \emptyset + \delta) \quad (28)$$

Avec

FPV : le niveau d'exposition de la zone;

N_K : le niveau kéraunique en fonction de la zone;

\emptyset : le coefficient dépendant du niveau kéraunique;

δ : le coefficient dépendant de la situation de la ligne BT, du bâtiment ou du champ.

Une fois le niveau d'exposition calculé, le calibre du parafoudre est choisi dans un tableau de valeurs spécifiques.

Tableau 10 : Calibre du parafoudre en fonction de FPV.[10]

Estimation du risque FPV	Calibre du parafoudre I_n en [kA]
$FPV \leq 40$	5
$40 < FPV \leq 80$	10
$FPV > 80$	20

Fusibles gPV

Ils assurent la protection de l'installation photovoltaïque des surintensités pouvant être causées par des courants inverses. Afin de choisir le fusible le mieux adapté il est nécessaire de déterminer sa tension de fonctionnement ainsi que son calibre respectivement à travers les formules ci-après

$$U > Voc \times 1,15 \times N_{\text{mod/string}} \quad (29)$$

$$1,4 \times I_{sc} \leq \text{calibre du fusible} \leq 2 \times I_{sc} \quad (30)$$

Avec

V_{OC} : la tension en circuit ouvert [V];

$N_{\text{ond/string}}$: le nombre de module en série;

I_{sc} : le courant de court-circuit [A].

Disjoncteurs différentiels

C'est un organe de protection qui assure la protection de l'installation contre les surcharges ou les courts-circuits, il est en mesure de couper le circuit lorsqu'il détecte un défaut de courant qui peut représenter un danger pour les personnes. Le choix de son calibre dépend alors de la

puissance de l'installation.

$$I = \frac{P}{V} \quad (31)$$

Avec

I : le calibre du disjoncteur [A];

P : la puissance à satisfaire par l'installation [W];

V : la tension [V].

6. ETUDE FINANCIERE

La Valeur Actuelle Nette, est un indicateur utilisé dans la finance afin d'évaluer la rentabilité d'un projet. Elle représente la différence entre les valeurs entrantes (revenus) et les valeurs sortantes (dépenses) sur une période donnée, actualisée selon un taux spécifié. Elle se calcule selon la formule

$$VAN = -CI + \frac{R_1}{1+r} + \frac{R_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{R_n}{(1+r)^n} \quad (32)$$

Avec

R : les flux de trésoreries;

CI : le cout d'investissement;

r : le taux d'actualisation ici 10%; il est lié au risque du projet. Plus le projet présente un haut risque plus le taux d'actualisation est élevé. Généralement pour les projets de ce type le taux utilisé est de 10% alors que ceux de type immobilier le taux utilisé est de 8% ainsi de suite pour les différents types d'investissements [11].

n : la durée de vie du projet généralement estimée à 25 ans pour les installations photovoltaïques.

V. RESULTATS DE L'ETUDE TECHNIQUE

Cette partie est dédiée aux résultats obtenus conformément aux matériels et méthodes expliqués dans la partie précédente.

1. TONNAGE DE LA CHAMBRE FROIDE

La chambre froide pourra contenir 6,25 tonnes. Selon les dimensions données dans le Tableau 7, la quantité que peut stocker la chambre froide est calculée comme suit :

$$Q_{stockage} = V_{utile} \times \text{densité entreposage}$$

$$Q_{stockage} = [(3,5 - 1) \times (3,5 - 1) \times 2,4] \times 0,4$$

$$Q_{stockage} = 6,25 \text{ t}$$

2. DIMENSIONNEMENT DU GROUPE FROID

2.1. Les apports calorifiques

2.1.1. Apports calorifiques externes

🔧 Charges dues aux échanges par les parois .

Dans un premier temps il faut déterminer les différentes valeurs de K. Pour les parois, elles sont données dans le Tableau 8. Pour ce qui est du sol, le calcul est effectué selon l'équation :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}}$$

Avec respectivement h_{int} et h_{ext} du sol égal à 20 W/m²°C et 10 W/m²°C.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{1}{10} + 3,71}$$

$$K = 0,25$$

Le Tableau 11 résume les apports par les différentes parois et donne l'apport total Q_1 . Les valeurs des coefficients thermiques K étant donné dans le Tableau 8.

Tableau 11 : Apports calorifiques par les parois.

Parois	Valeur de K (W m ⁻² K ⁻¹)	Applications numériques	Résultats(W)
Murs	0,24	$0,24 \times 55 \times 38$	501,6
Plafond	0,24	$0,24 \times 9,74 \times 38$	88,83
Sol	0,25	$0,25 \times 9,74 \times 38$	96,23
Q₁ (W)	688,32		

 **Charges dues au renouvellement d'air**

$$Q_2 = \frac{n \times V \times \rho_{aa} \times \Delta_h}{86400}$$
$$AN = \frac{17 \times 30 \times 1,271 \times (77,8 - 15,4)}{86400}$$
$$Q_2 = 468,152 \text{ W}$$

2.1.2. Apports calorifiques internes

 **Charges dues à la respiration des denrées**

$$Q_3 = \frac{m \times q_r}{86400}$$
$$AN = \frac{6250 \times 7450}{86400}$$
$$Q_3 = 545,30 \text{ W}$$

 **Charges dues à l'introduction des denrées à l'intérieur de la chambre froide**

$$Q_4 = \frac{m \times c \times \Delta_T}{86400}$$
$$AN = \frac{6250 \times 3440 \times 26}{86400}$$
$$Q_4 = 6496 \text{ W}$$

 **Charges dues au travail du personnel à l'intérieur de la chambre froide**

$$Q_5 = \frac{n \times q \times t}{24}$$
$$AN = \frac{4 \times 372 \times 4}{24}$$
$$Q_5 = 248,67 \text{ W}$$

 **Charges dues à l'éclairage à l'intérieur de la chambre froide**

$$Q_6 = \frac{P \times S \times t}{24}$$
$$AN = \frac{6 \times 9,74 \times 8}{24}$$
$$Q_6 = 20 \text{ W}$$

A ce stade, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des apports calorifiques intermédiaires qui servira à choisir les évaporateurs du système. Les résultats des différents apports calculés

ainsi que leur sommes sont répertoriés dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Valeurs des apports calorifiques.

Apports calorifiques intermédiaires	Valeurs(W)
Apports calorifiques par les parois Q_1	688,32
Apports calorifiques par renouvellement d'air Q_2	468,152
Apports calorifiques par respiration des denrées Q_3	546,30
Apports calorifiques par introduction des denrées Q_4	6496
Apports calorifiques par la présence du personnel Q_5	248,67
Apports calorifiques par l'éclairage à l'intérieur de la chambre froide Q_6	20
Apports calorifiques intermédiaires	8468

2.1.3. Charges intermédiaires des évaporateurs

$$P_{int} = \frac{Q_{int} \times 24}{t_{inst}}$$

$$AN = \frac{8468 \times 24}{16}$$

$$P_{int} = 12702 \text{ W}$$

2.2. La puissance frigorifique

2.2.1. La puissance frigorifique prévisionnelle

A partir de cette puissance prévisionnelle, les évaporateurs pourront être choisis et ajoutés aux différents apports calorifiques. Pour cela une majoration de 20% est nécessaire :

$$P_{prev} = 1,2 \times P_{int}$$

$$AN = 1,2 \times 12702$$

$$P_{prev} = 15242 \text{ W soit } 15,25 \text{ kW}$$

2.2.2. Les charges dues aux moteurs des ventilateurs

Des résultats obtenus il faut choisir des évaporateurs capables de satisfaire la demande de refroidissement du système. Le choix des évaporateurs se porte sur le modèle ECO-Luvata de 7,94 kW de capacité de refroidissement. Afin d'assurer la charge demandée par notre système, il sera nécessaire d'installer deux modèles similaires en parallèle.

Tableau 13 : Spécifications techniques du modèle d'évaporateur choisi.

Capacité de refroidissement (kW)	Nombre de ventilateurs	Consommation électrique des moteurs des ventilateurs (W)
7,94	2	370

A partir des informations techniques du Tableau 13, les apports induits par les moteurs des ventilateurs peuvent être intégrés aux apports déterminés au préalable.

$$Q_{vent} = \frac{n \times P \times t_{evap}}{24}$$

$$Q_{vent} = 987 \text{ W}$$

2.2.3. La puissance frigorifique effective de l'installation

Il s'agit de la puissance finale que le système devra satisfaire afin d'assurer un fonctionnement optimal et répondre aux besoins de ce dernier.

$$P_{eff} = P_{int} + Q_{vent}$$

$$AN = 12,702 + 0,987$$

$$P_{eff} = 13,689 \text{ kW}$$

2.2.4. Choix des équipements de la chambre froide

✚ Choix du groupe de condensation

Le choix du groupe froid s'est porté sur la marque Danfoss. Les principales caractéristiques techniques sont données dans le Tableau 14 :

Tableau 14 : Principales données techniques du groupe froid.

Puissance de refroidissement	Consommation électrique	Moteurs électriques des ventilateurs
16,07 kW	13,09 Kw	680 W

✚ Détendeur

A l'aide du logiciel de choix d'équipements de Danfoss, CoolSelector, nous avons pu entrer les caractéristiques du détendeur qui était recherché. Celui proposé par le logiciel est le détendeur TE 5-3.

Tableau 15 : Données techniques principales du détendeur.

Puissance nominale	Puissance minimale	Différence de pression
17,40 kW	4,350 kW	20,41 bars

3. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME SOLAIRE

A partir du Tableau 16 le bilan de puissance de l'installation a été établie afin d'estimer la puissance que le système solaire devra supporter.

Tableau 16 : Bilan de puissance de l'installation.

Equipements	Nombre	Puissance unitaire (W)	Puissance totale (W)	Temps de fonctionnement (h)	Energie consommée (Wh)	Energie totale consommée par le système (Wh)
Lampes LED	10	10	100	8	800	244800
Groupe froid	1	13090	13090	16	209440	
Moteur des ventilateurs du groupe froid	1	680	680	16	10880	
Moteur des ventilateurs des évaporateurs	4	370	1480	16	23680	

3.1. Calcul de la puissance crête

Une fois le besoin énergétique du système estimé, la puissance crête de l'installation peut être déterminée et le champs PV configuré.

$$P_c = \frac{E_j}{R_p \times E_s}$$
$$AN = \frac{244800}{0,8 \times 5,2}$$
$$P_c = 58846 \text{ Wc}$$

Choix des panneaux solaires

Afin de satisfaire les besoins de l'installation, le choix des panneaux solaires se porte sur ceux de Jinko Solar. Les caractéristiques principales du panneau sont données dans le Tableau 17 et la fiche technique complète en annexe.

Tableau 17 : Caractéristiques techniques des panneaux solaires.

Puissance nominale (W)	595
Tension à puissance maximale Vmpp (V)	42.81
Courant à puissance maximale Impp (A)	13,90
Tension en circuit ouvert Voc (V)	51,41
Courant de court-circuit Isc (A)	14,71

3.2. Calcul de la puissance de l'onduleur

A partir de la relation $0,90 \times P_c \leq P_{ond} \leq 1,1 \times P_c$, la plage de puissance de l'onduleur devrait se situer entre :

$$53550 \text{ W} \leq P_{ond} \leq 65450 \text{ W}$$

Choix de l'onduleur

L'onduleur choisi est de la marque Huawei. Les principales caractéristiques techniques sont résumées dans le Tableau 18 et la fiche technique en annexe du document.

Tableau 18 : Caractéristiques techniques de l'onduleur.

Puissance nominale (kW)	60
Tension d'entrée maximale (V)	1100
Plage de tension MPPT (V)	200 – 1000
Courant d'entrée maximal MPPT (A)	22
Nombre de trackers MPPT	6

3.3. Configuration du champ PV

Afin d'optimiser au maximum le fonctionnement de l'installation photovoltaïque et d'assurer une utilisation optimale et efficace de l'énergie produite, la configuration a été faite selon un modèle bien défini en s'assurant du respect des limites de courants et de tension du système :

3 strings de 16 panneaux solaires et 3 strings de 17 panneaux repartis sur les 6 MPPT (soit 1 string/MPPT). Ainsi le nombre total de panneaux du système est de 99.

Justification de la configuration du champs PV :

- Chaque string de panneaux génère une puissance significative ce qui assure une production énergétique maximale de 58,905 kWc ;
- La plage de tension de l'onduleur (200 V – 1000 V) est respectée par chaque string ;
- Le courant total par string est de 14,71 A, ce qui est en dessous de la limite des 26 A/MPPT de l'onduleur.

Distance minimale entre rangées de panneaux

$$D = \frac{L \times \sin[180 - \alpha - \beta]}{\sin \beta}$$

Comme le présente le Tableau 19, il faudra une distance minimale de 2,7 m entre 2 rangées de panneaux afin d'éviter le phénomène d'ombrage qui affecterait l'efficacité de production des panneaux.

Tableau 19 : Calcul de la distance minimale entre les rangées des panneaux.

Latitude du point	Angle solaire incident β	Angle d'inclinaison des panneaux : α	Longueur d'un panneau solaire : L	Distance minimale afin d'éviter le phénomène d'ombrage : D
13 °35'00''	$\beta = 54^\circ$	15 °	2,285 m	2,7 m entre chaque rangée de panneaux.

3.4. Dimensionnement du parc de batteries

L'étape suivante consiste à dimensionner le parc de stockage du système afin de s'assurer que la chambre froide puisse fonctionner même pendant les jours de faibles production énergétique, ce qui peut être lié à un faible ensoleillement ou tout autre facteur. À la vue du grand besoin énergétique à couvrir (244 800 Wh/jour) le choix des batteries s'est porté vers des batteries de

très grande puissance afin de limiter leur nombre et ainsi donc le cout d'investissement. Il s'agit des batteries de 24 kWh de la marque BYD.

Les calculs ont été fait en termes de kWh au lieu des Ah parce que pour le projet ce qui était recherché était surtout la quantité d'énergie consommée ; c'est également ce qui est généralement conseillé pour les installations solaires de grande capacité.

Configuration du parc de batteries

$$C_{tb} = \frac{E_j \times J_{aut}}{d_p \times U_s \times R_g}$$
$$AN: C_{tb} = \frac{244\,800 \times 1}{0,9 \times 51,2 \times 0,95}$$
$$C_{tb} = 5592\,Ah$$
$$C_{tb} = 286,32\,kWh$$

Pour couvrir cette capacité il faudra 12 batteries au total.

Afin de s'assurer du respect des limites de courant et de tension de l'installation, la configuration suivante a été adoptée :

12 batteries de 24 kWh montées en parallèle.

Les spécifications techniques principales des batteries sont données dans le Tableau 20 et le reste en annexe du document.

Tableau 20 : Principales caractéristiques techniques des batteries.

Puissance nominale (kWh)	24
Courant de sortie maximal (A)	250
Tension nominale (V)	51,2
Efficacité	95%

3.5. Calcul de la section des câbles

Les sections des câbles coté AC et DC ainsi qu'au niveau des batteries, sont obtenus à travers la formule

$$S_{min} = b \times \frac{\rho \times l \times Ib}{\Delta U \times Vn}$$

Et les valeurs sont données dans le Tableau 21

Tableau 21 : Section de câbles calculée et normalisée.

Sections	Cote AC Onduleur- TGBT	Cote DC Module- onduleur	Batteries
Section câbles calculée (mm ²)	L = 10 m	I _{max} = 30 A	L = 10 m
	I _b = 160,38 A		I = 2550 A
	V = 400 V		V = 51.2 V
	S ≥ 7,02		S ≥ 886,52
Section câbles normalisée (mm ²)	S = 10	S = 6	3 câbles de 300 mm ² montés en parallèle.

Section des câbles (mm ²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
Courant maximum (A)	13	21	28	36	46	61	81	99	125	160	195	220

Figure 10 : Section de câble en fonction du courant maximum.[10]

3.6. Choix des organes de protection

Cette partie est importante afin d'assurer la protection de l'installation mais aussi des individus. L'ensemble des organes de protection nécessaire ont été résumés dans le Tableau 22

Tableau 22 : Choix des organes de protection du système.

Élément protégé	Type d'organe de protection	Calibre	Nombre
String de panneaux solaires	Disjoncteurs DC	20 A	6
	Fusibles DC	20 A	6
Surtension des panneaux	Parafoudre DC de type 2	20 kA	1
String de batteries	Disjoncteurs DC	300 A	2
	Fusibles DC	300A	2
Parc global de batteries	Disjoncteur DC	1000 A	1

Surtension des batteries	Parafoudre DC de type 2	20 kA	1
Onduleur cote entrée DC	Disjoncteur DC	600 A	1
Onduleur cote sortie AC	Disjoncteur triphasé	160 A	1
Surtension onduleur AC	Parafoudre AC de type 2	20 kA	1
Distribution électrique charge AC	Disjoncteur différentiel triphasé	160 A/30 mA de type A	1
Surtension charge AC	Parafoudre AC de type 2	20 kA	1

3.7. Disposition des panneaux et du champs photovoltaïque

Comme mentionné dans la partie description du projet, les panneaux solaires seront disposés sur les deux côtés du toit du hangar abritant la chambre froide. Il s'agit dans cette partie de répondre aux questions techniques que cette configuration pourrait poser.

Sachant que le champ photovoltaïque fonctionne avec 166 panneaux, il faut dimensionner le hangar de sorte à ce que le toit puisse accueillir l'ensemble des panneaux solaires de façon optimale.

✚ Détermination de la surface de toiture nécessaire

Selon la fiche technique des panneaux, ceux-ci sont de dimensions 2278 mm × 1134 mm

Surface de toit nécessaire = Longueur × largeur × nombre de panneaux

$$AN = 2,278 \times 1,134 \times 99$$

$$Surface\ de\ toit\ nécessaire = 256\ m^2$$

A cette surface nous affectons un facteur de sécurité de 10% afin de prendre en compte les espaces :

$$Surface\ de\ toit = Surface\ de\ toit\ nécessaire \times 1,1$$

$$AN = 256 \times 1,1$$

$$Surface\ de\ toit = 282\ m^2$$

Ainsi, il faudrait une surface de toit de 282 m² pour placer les 99 panneaux. Sachant qu'ils sont repartis sur les deux pans du toit, il faudrait alors une surface de 141 m² de chaque côté.

✚ Estimation des dimensions du hangar

Nous posons la largeur = 10 m, la longueur nécessaire sera donc

$$\text{Longueur} = \frac{\text{Surface}}{\text{largeur}}$$

$$AN = \frac{141}{10}$$

$$\text{Longueur} = 14,1 \text{ m}$$

Il est ensuite important de déterminer la pente que le toit du hangar aura afin de procurer aux panneaux une inclinaison optimale nécessaire capter au mieux le rayonnement solaire. Généralement une inclinaison des panneaux de 15° est conseillée. La longueur inclinée est alors déterminée :

$$\text{Longueur inclinée} = \frac{\text{largeur}}{2 \times \cos 15^\circ}$$

$$AN = \frac{10}{2 \times \cos 15^\circ}$$

$$\text{Longueur inclinée} = 5,18 \text{ m}$$

Donc chaque pan du toit devra faire environ 10 m de large, 14,1 m de long et 5,18 m de longueur inclinée.

Robustesse de la structure

Il faut pouvoir garantir que le toit soit assez robuste pour supporter le poids des 166 panneaux. Pour cela les matériaux utilisés devront avoir une forte capacité de résistance. Pour assurer cette résistance le matériel préconisé pour les poutres est de l'acier de section allant jusqu'à 300 mm de section. Les fondations devront également être profondes jusqu'à 1,5 m de profondeur avec des piliers renforcés afin de supporter la structure.

4. MISE EN PLACE DES MESURES D'EFFICACITE ENERGETIQUE

L'efficacité énergétique se définit comme étant le fait d'utiliser des équipements ou de mettre en place des installations qui consomment moins d'énergie en garantissant les mêmes performances. Ainsi, l'énergie produite est mieux utilisée sans gaspillage des ressources pour une production optimale. Elle est nécessaire d'autant plus que nous évoluons dans un monde où la demande en énergie est de plus en plus forte et couteuse avec un impact non négligeable sur l'environnement. C'est pour ces raisons qu'il était important de penser à la mise en place de mesures d'efficacité énergétiques dans la conception de la chambre froide. Ces mesures sont :

- ✚ L'utilisation de panneaux sandwich de minimum 80 mm² d'épaisseur : ces panneaux offrent une excellente performance thermique pour les chambres froides à travers une isolation optimale pour des épaisseurs minimales et donc des couts réduits ;
- ✚ L'installation de lampes LED : elles offrent l'avantage de consommer moins d'énergie ainsi que de générer moins de chaleur ce qui est un critère intéressant pour notre chambre froide ;
- ✚ L'utilisation d'une porte hermétique afin d'éviter les déperditions thermiques en isolant thermiquement la zone réfrigérée du milieu extérieur ;
- ✚ L'isolation du sol afin de réduire au maximum les apports de chaleur.

5. SCHEMAS DE L'INSTALLATION

Schéma synoptique de l'installation

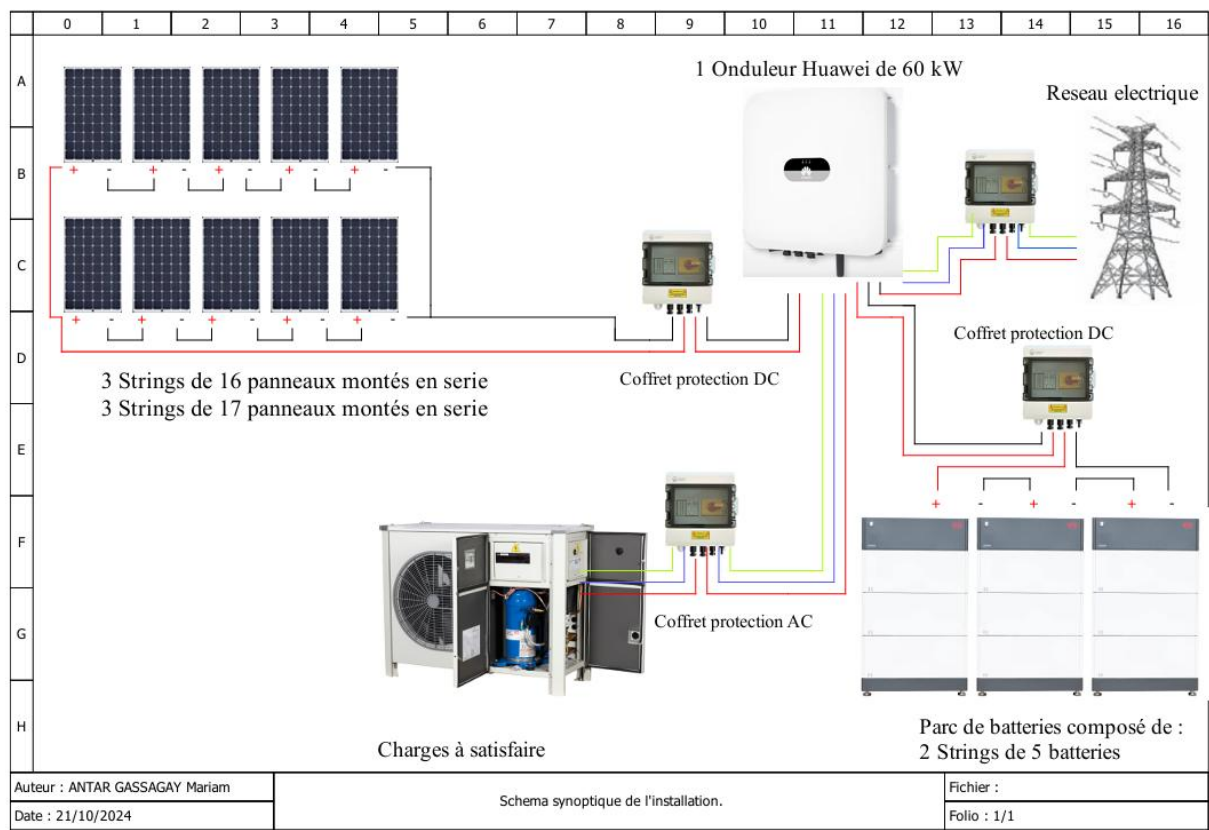


Figure 11 : Schéma synoptique de l'installation.

Schéma unifilaire de l'installation

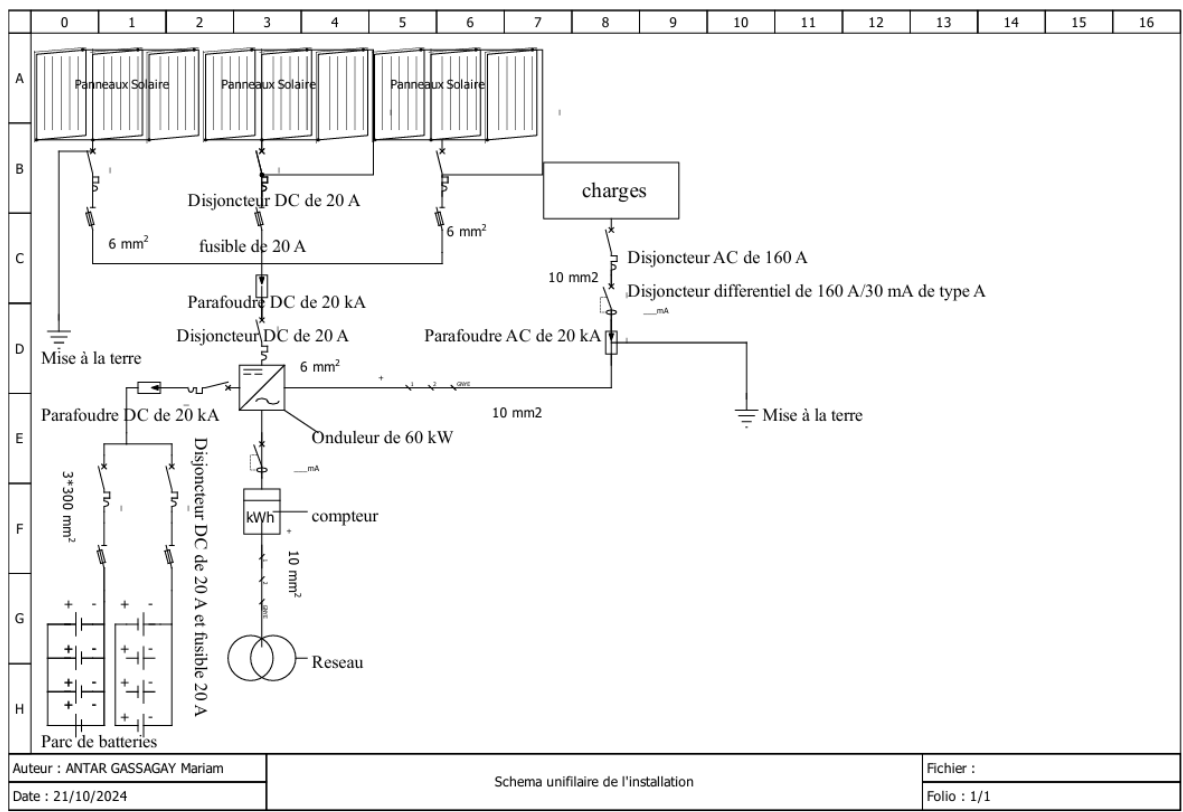


Figure 12 : Schéma unifilaire de l'installation.

VI. ETUDE FINANCIERE DU PROJET

Il s'agit ici de justifier la pertinence de notre projet.

1. DETERMINATION DU COUT D'INVESTISSEMENT

Afin de mener à bien l'étude financière du projet, il est important de déterminer dans un premier temps le cout d'investissement en se basant sur les prix du marché mais aussi de quelques sites de vente en ligne.

Tableau 23 : Calcul du cout total d'investissement du projet.

Désignation	Reference	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Montant total (FCFA)	Sources
Composants de la chambre froide					
Groupe froid	MTZ160A02	1	4 151 906	4 151 906	Site Danfoss
Détendeur	TE5-3	1	75 000	75 000	Site Danfoss
Evaporateur	Eco luvata GCE	2	1 310 679	2 621 358	Site Danfoss
Transmetteur de pression	-	1	18 000	18 000	Prix du marché
Soupape de sécurité 1/4 , 6,8 mm	-	1	11 500	11 500	Prix du marché
Sondes de température	-	1	16 000	16 000	Prix du Marché
Filtre / Déshydrateur 3/8	-	1		13 000	Prix du marché
Panneaux sandwichs	-	300 m ²	10 000	3 000 000	Prix du marché
Conduites frigorifiques en cuivre	-	100 m ²		1 000 000	Prix du marché
Portes hermétiques	-			327 000	Site de vente en ligne
Rack de stockage	-			500 000	Site de vente

					en ligne
Lampes LED	-	8	2000	16 000	Prix du marché
Sous-total (FCFA)	11 749 764				
Equipements du champ solaire photovoltaïque					
Panneaux solaires	Jinko Solar	100	61 285	6 128 500	Site Ali Baba
Onduleur	Huawei SUN-2000-100KTL-M2	1	3 279 785	3 279 785	Site de vente en ligne
Batteries	LVS24.0 Premium battery-box	12	4 801 010	57 612 120	Prix du marché
Disjoncteur	-	10	3500	35 000	Prix du marché
Disjoncteur différentiel	-	1	5000	5000	Prix du marché
Parafoudre AC	-	2	20 000	40 000	Prix du marché
Parafoudre DC	-	2	25 000	50 000	Prix du marché
Sectionneur porte fusible + fusibles	-	10	5200	52 000	Prix du marché
Câble 2 × 10 mm ²	-	10 m	3500	35 000	Prix du marché
Cable 1× 6 mm ² rouge	-	20 m	2000	40 000	Prix du marché
Cable 1× 6 mm ² noir	-	20 m	2000	40 000	Prix du marché
Cable 3 × 300 mm ² noir	-	5 m	3500	17 500	Prix du marché

Cable 3× 300 mm ² rouge	-	5 m	3500	17 500	Prix du marché
Hangar pour CF				15 000 000	Estimation après discussion avec des entrepreneurs du secteur
Sous total système photovoltaïque (FCFA)	82 352 405				
Cout d'investissement (FCFA)	100 000 000				

2. CALCUL DE LA VAN

Ayant obtenu le cout d'investissement du projet, il est tout aussi important de déterminer la Valeur Actuelle Nette (VAN) afin de s'assurer de la rentabilité du projet.

Avant il est primordial pour effectuer ce calcul de calculer les flux de trésoreries :

$$CF = \text{revenus} - \text{depenses}$$

Revenus

- Le premier revenu engendré par la mise en place du projet est la vente des pommes de terre stockées dans la CF. Sachant que la chambre froide peut stocker 6,25 tonnes de pommes de terre (6250 kg) et que le prix le plus défavorable du kg de pommes de terre sur le marché burkinabé est de 600 FCFA, nous estimons les revenus dus à la vente de pommes de terre à

$$\text{Revenus dus à la vente de pommes de terre} = 6250 \times 600$$

$$\text{Revenus dus à la vente de pommes de terre} = 3\,750\,000 \text{ FCFA}$$

- Le second revenu engendré par la mise en place de la chambre froide solaire est l'espace disponible autour de celle-ci. Il peut être utilisé comme une location d'espace pour le stockage de produits agricoles, la transformation alimentaire, la petite production ou le commerce, la location à des petites entreprises ou encore une location pour centre logistique. Ainsi avec ces activités, les revenus sont estimés à environ 10 000 000 FCFA/an.

Ainsi les revenus sont estimés à 13 750 000 FCFA.

Dépenses

- La première dépense à prendre en compte dans le calcul de la VAN est le coût de production des pommes de terre. La mise en place de la chambre froide engendrera une augmentation de la production. Une estimation du coût d'une telle augmentation a été faite. Il comprend entre autres le coût des semences, de l'engrais et des fertilisants, de la main d'œuvre ainsi que des procédés agricoles tels que l'irrigation. Ainsi, le coût de production s'estime à environ 2 000 000 FCFA ;
- Une autre dépense engendrée par la mise en place du projet est la maintenance de la chambre froide. Le coût moyen de cette maintenance s'élèverait à hauteur de 300 000 FCFA et serait programmée pour être réalisée 2 fois au courant de l'année, soit un total de 600 000 FCFA. Ce prix comprend entre autres le nettoyage de la chambre froide mais aussi l'intervention d'un frigoriste afin de vérifier ou de dépanner les machines [12] ;
- Ensuite, il est important de prendre en compte le coût de la maintenance du système solaire photovoltaïque. De façon générale, le coût de la maintenance des systèmes PV représente 1 à 3% du coût du CAPEX (dépenses d'investissement du capital) en fonction de l'ampleur et de l'importance du projet [13]. Vu qu'ici le projet est relativement important, le coût de maintenance a été déterminé comme représentant 2% du CAPEX. Soit un montant de 2 800 000 FCFA pour les 13 premières années de vie du projet.

Ainsi, les dépenses représentent au total un montant de 5 400 000 FCFA

$$AN = 13\,750\,000 - 5\,400\,000$$

$$R = 8\,350\,000 \text{ FCFA}$$

La prochaine étape constitue le calcul de la VAN. Il est toutefois important de préciser que pour le calcul de cette valeur, le remplacement de certains équipements a été pris en compte. Il s'agit des équipements de froid tels que le groupe froid, les évaporateurs mais aussi les panneaux sandwichs chargés de l'isolation de la chambre froide. Ces remplacements sont prévus pour être effectués durant la 13^e année du projet. Pendant cette même année une opération de maintenance importante est prévue afin de permettre au système photovoltaïque de continuer à fonctionner de façon optimale.

$$VAN = -CI + \frac{R_1}{1+r} + \frac{R_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{R_n}{(1+r)^n}$$

$$AN = -100\,000\,000 + \frac{8\,350\,000}{1+10\%} + \frac{8\,350\,000}{(1+10\%)^2} + \dots + \frac{13\,501\,736}{(1+10\%)^{13}} + \dots + \frac{8\,350\,000}{(1+10\%)^{25}}$$

$$VAN = 22\,195\,761 \text{ FCFA}$$

Avec cette valeur de la VAN positive, nous pouvons dire que le projet est rentable.

VII. ANALYSE DES EFFETS DU PROJET SUR L'ENVIRONNEMENT

Il s'agit dans cette partie d'évaluer l'ensemble des effets positifs mais aussi négatifs du projet sur l'environnement mais aussi sur la société. Cet impact est généralement étudié durant les 3 phases principales du projet que sont les phases de conception, d'exploitation et de démantèlement. Afin de mener le mieux possible cette étude l'outil utilisé est la matrice de Luna Leopold. Il s'agit d'une méthode qualitative d'évaluation de l'impact environnemental développée en 1971 par Luna Leopold et ses collaborateurs pour l'United State Geological Survey (USGS). C'est une matrice d'interrelation qui met en relation les impacts du projet source avec les composantes de l'environnement du projet. Les différents éléments sur lesquels s'appuient la matrice de Luna sont :

La durée du projet

Elle se réfère à la période pendant laquelle se font sentir les effets d'une intervention sur le milieu. On distingue ainsi les variantes suivantes :

- *longue* : la durée est longue lorsque la perturbation se prolonge même après la fin du sous-projet. Quand l'impact se manifeste au-delà de 5 ans après les travaux.
- *moyenne* : la durée est moyenne lorsque la perturbation se prolonge après la fin de l'activité et peut atteindre environ 5 ans;
- *courte ou temporaire* : l'impact est limité à la durée de construction du sous-projet ou moins. Cela signifie que la perturbation est bien circonscrite dans le temps et s'arrête avec la fin de l'activité source d'impact.

L'intensité du projet

Elle traduit l'ampleur des modifications observées sur la composante affectée.

- *forte* : l'activité affecte lourdement l'intégrité de la composante ou son utilisation et compromet sa pérennité. Cela signifie que l'activité altère ou améliore de façon significative un ou plusieurs éléments environnementaux, remettant en cause leur intégrité ou diminuant considérablement leur utilisation, leur caractéristique ou leur qualité ;
- *moyenne* : l'activité affecte sensiblement l'intégrité de la composante ou son utilisation, mais sans compromettre sa pérennité ;

- *faible* : l'activité affecte peu l'intégrité de la composante ou son utilisation c'est à dire que l'activité altère ou améliore de façon peu perceptible un ou deux éléments environnementaux, sans modifier significativement leur utilisation, leur caractéristique ou leur qualité.

L'étendue du projet

Elle traduit la portée de l'impact et elle exprime la portée spatiale des effets générés par une intervention dans le milieu et se réfère à la distance ou à la surface sur laquelle sera ressentie la perturbation. On distingue trois niveaux d'étendue :

- *Régionale* : l'impact s'étend sur une portion importante ou la totalité d'un élément du milieu dans région d'étude ;
- *Locale* : l'impact s'étend sur un territoire ou une communauté à l'échelle du quartier à la ville ;
- *Ponctuelle* : l'impact s'étend uniquement sur le site ou un territoire relativement réduit, ou très peu d'individus.

On peut aussi intégrer dans l'analyse les éléments suivants :

L'occurrence ou probabilité d'apparition

Elle exprime les chances que peut avoir un impact de se réaliser. L'impact peut ainsi être de réalisation certaine ou de réalisation probable. C'est ainsi que trois (3) classes d'occurrence ont été considérées : certaine, probable et peu probable.

De façon générale nous pouvons dire que ce projet aura pour principal avantage de réduire les pertes alimentaires après récolte et de permettre ainsi une meilleure sécurité alimentaire. Avant de réaliser la matrice de Luna il était important d'évaluer dans un premier temps les émissions de CO₂ dues notamment à l'installation photovoltaïque.

Estimation des émissions de CO₂ évitées par la mise en place du projet

Afin d'estimer cette quantité la formule ci-dessous a été utilisée en sachant que la quantité de CO_{2PV} pour une installation utilisant des panneaux solaires au Burkina Faso est de 0,606 kgCO₂/kWh.

$$Emission^{CO_2} = CO_{2PV} \times \text{Energie produite par le champ PV}$$

Avec

$CO_{2_{PV}}$: l'émission de CO_2 en $[kgCO_2/kWh]$.

Ainsi,

$$\text{Emission}^{CO_2} = 0,606 \times 244,8 \times 365$$

$$\text{Emission}^{CO_2} = 54126,2 \text{ kgCO}_2/\text{an}.$$

Une fois l'émission de CO_2 évitée déterminée, la matrice de Luna peut être mise sur pied. Dans un premier temps il est question de réaliser la matrice de synthèse de la caractérisation et de l'évaluation des impacts positifs du projet, ensuite celle des impacts négatifs et enfin la proposition des mesures d'atténuations des impacts négatifs.

- Matrice de synthèse de la caractérisation et de l'évaluation des impacts positifs du projet.

Tableau 24 : Matrice de synthèse de la caractérisation et de l'évaluation des impacts positifs du projet.

Phase	Zone concernée	Activités sources d'impact	Composante du milieu affectée		Impact Identifié	Nature de l'impact			Importance
						Intensité	Etendue	Durée	
Pré-construction et Construction	Site du projet	<ul style="list-style-type: none"> Travaux préliminaires Assemblage et montage de la chambre froide Installation et montage du système photovoltaïque 	Milieux physique, biologique et humain		Réalisation des études d'impact environnemental et social	Forte	Régionale	Longue	Majeure
			Milieu humain	Emplois	Création d'emplois directs et indirects	Moyenne	Régionale	Moyenne	Moyenne
				Activités économiques	Développement des activités commerciales et génération de revenus	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne
					Renforcement des compétences locales	Faible	Locale	Courte	Mineure
Exploitation et Entretien	Site du projet	<ul style="list-style-type: none"> Operations de maintenance sur 	Milieu humain	Emplois	Recrutement et formation des agents	Moyenne	Régionale	Longue	Majeure
				Populations	Augmentation de la	Forte	Régionale	Longue	Majeure

Phase	Zone concernée	Activités sources d'impact	Composante du milieu affectée	Impact Identifié	Nature de l'impact			Importance
					Intensité	Etendue	Durée	
		les différentes machines <ul style="list-style-type: none">Entretien des panneaux solaires (nettoyage et maintenance)	communautés	sécurité alimentaire des populations				
				Amélioration du cadre et des conditions de vie des populations	Forte	Régionale	Longue	Majeure
			Activités économiques	Amélioration des investissements	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne
				Amélioration du chiffre d'affaires de la CIE	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne

- Matrice de synthèse de la caractérisation et de l'évaluation des impacts négatifs du projet

Tableau 25 : Matrice de synthèse de la caractérisation et de l'évaluation des impacts négatifs du projet.

Phase	Zone concernée	Activités sources d'impact	Composante du milieu affectée		Impact Identifié	Nature de l'impact			Importance
						Intensité	Etendue	Durée	
Pré-construction et Construction	Site du projet	• Travaux préliminaires	Milieu physique	Sols / Sous-sols	Fragilisation et contamination	Moyenne	Locale	Court	Moyenne
				Air	Dégradation de la qualité de l'air	Moyenne	Locale	Court	Moyenne
				Environnement acoustique	Nuisances sonores	Moyenne	Locale	Court	Moyenne
		• Assemblage et montage de la chambre froide	Milieu biologique	Flore	Perte de la flore et de la végétation	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne
				Faune	Perturbation de la faune	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne
				Paysage	Modification du paysage	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne
			Milieu humain	Santé et sécurité au travail	Accidents de travail et blessures corporelles	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
					Risque de contraction de maladies par exposition à la poussière	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
					Risque de contraction de	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne

Phase	Zone concernée	Activités sources d'impact	Composante du milieu affectée		Impact Identifié	Nature de l'impact			Importance
						Intensité	Etendue	Durée	
					maladies par exposition au bruit				
				Populations / communautés	Pertes de cultures agricoles	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne
				Déchets	Dégradation du cadre de vie	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
				Infrastructures et mobilité	Dégradation des routes	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
					Augmentation des accidents de circulation	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
Exploitation et Entretien	Site du projet	<ul style="list-style-type: none">Operations de maintenance sur les différentes machinesEntretien des panneaux solaires (nettoyage et maintenance)	Milieu physique	Sol	Contamination du sol par les déchets produits	Faible	Ponctuelle	Courte	Mineure
			Milieu humain	Santé et sécurité au travail	Accidents de travail	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne
					Risque d'électrocution et d'électrification	Moyenne	Locale	Moyenne	Moyenne
				Populations communautés	Risques d'interruption de la fourniture d'électricité et de désagréments aux populations	Faible	Locale	Courte	Mineure
				Déchets	Détérioration du cadre de	Faible	Ponctuelle	Courte	Mineure

Phase	Zone concernée	Activités sources d'impact	Composante du milieu affectée		Impact Identifié	Nature de l'impact			Importance
						Intensité	Etendue	Durée	
					vie par les rejets des déchets issus des travaux d'entretien				
Démantèlement	Site du projet	<ul style="list-style-type: none">Travaux préliminairesAssemblage et montage de la chambre froide Installation et montage du système photovoltaïque	Milieu physique	Sol/sous-sol	Le démantèlement laissera une portion de terre qui a été préalablement déforestée donc qui a perde sa faune et sa flore	Moyenne	Ponctuelle	Moyenne	Moyenne
				Air	Les travaux d'excavation pourront émettre des poussières	Faible	Ponctuelle	Courte	Faible
				Environnement acoustique	Les travaux de démantèlement engendreront des nuisances sonores	Moyenne	Ponctuelle	Moyenne	Moyenne
			Milieu humain	Travail	Le démantèlement de la chambre froide provoquera une perte	Forte	Locale	Moyenne	Forte

Phase	Zone concernée	Activités sources d'impact	Composante du milieu affectée		Impact Identifié	Nature de l'impact			Importance
						Intensité	Etendue	Durée	
					d'emplois au sein de la population locale				
				Humain/comm unauté	Avec le démantèlement de la CF, les populations n'auront plus de moyens de stockage de leurs produits post- récoltes et donc il y'a risque d'insécurité alimentaire	Forte	Régionale	Longue	Forte
				Déchets	Le démantèlement engendrera des déchets tels que les panneaux usagers, les batteries ainsi que les autres équipements	Faible	Ponctuelle	Courte	Faible

- Mesures d'atténuations des impacts négatifs

Tableau 26 : Tableau de gestion de l'impact environnemental et social lors de la phase de conception.

Impact potentiel	Description	Mesures d'atténuation	Moyen de contrôle
Utilisation des terres	La mise en place du champ PV ainsi que de la chambre froide nécessitera une certaine surface de terrain qui sera possiblement habité par les populations locales	Réinstaller les populations et servies présents sur le site si nécessaire	Signature d'accord avec les populations concernées
Impact sur la circulation	Le transport des équipements sur le chantier qui pourra gêner le Traffic	Organiser et programmer les heures de passage des véhicules	Supervision du chantier
Impact sur la qualité de l'air	Les travaux d'excavation pourront émettre des poussières	Porter des masques afin d'éviter d'inhalier les poussières	Supervision du chantier
Impact sonore	La mise en place de l'installation pourra occasionner des bruits notamment à travers l'usage des machines	L'utilisation des équipements de protection sonore pour protéger l'ouï des ouvriers	Supervision du chantier

Tableau 27 : Tableau de gestion de l'impact environnemental et social lors de la phase d'exploitation.

Impact potentiel	Description	Mesures d'atténuation	Moyen de contrôle
Impact sur l'environnement	Le nettoyage des modules devra nécessiter une certaine quantité d'eau	Prévoir un moyen d'évacuation des eaux usées afin d'éviter la stagnation et ainsi les maladies liées aux eaux stagnantes	Visite et supervision du chantier
Risques liés à la santé et la sécurité du travail	L'installation de certains équipements ainsi que l'utilisation de certains produits tels que le fluide frigorigène peut nécessiter des mesures de précaution	Respecter et veiller au respect des normes de sécurité	Formation et sensibilisation du personnel

Tableau 28 : Tableau de gestion de l'impact environnemental et social lors de la phase de démantèlement.

Impact potentiel	Description	Mesures d'atténuation	Moyen de contrôle
Impact sur la faune et la flore	La mise en place devra possiblement nécessiter une déforestation de la zone et donc un déplacement de la faune et une destruction de la flore	La zone devra être reforestée	Supervision du chantier
Déchets	Le démantèlement engendrera des déchets tels que les panneaux	Procéder au recyclage des équipements	Supervision du chantier

	usagers, les batteries ainsi que les autres équipements		
Impact sur la circulation	Le transport des équipements sur le chantier qui pourra gêner le Traffic	Organiser et programmer les heures de passage des véhicules	Supervision du chantier
Impact sur la qualité de l'air	Les travaux d'excavation pourront émettre des poussières	Porter des masques afin d'éviter d'inhaler les poussières	Supervision du chantier
Perte d'emploi	Le démantèlement de la chambre froide provoquera une perte d'emplois au sein de la population locale	Prévoir un programme de réinsertion professionnelle	Rencontre avec les autorités locales

VIII. CONCLUSION

Au terme de ce travail, qui a consisté à étudier la mise en place d'une chambre froide solaire destinée à la conservation de pommes de terre, il était question de répondre aux différents objectifs spécifiques et principaux du projet. Afin d'y répondre, le travail a été divisé en plusieurs étapes. Dans un premier temps nous avons mené une recherche bibliographique sur les spécificités des pommes de terre, ensuite nous avons réalisé les dimensionnements de la chambre froide ainsi que du système solaire photovoltaïque, enfin la dernière étape a consisté à faire une étude financière et environnementale du projet. De plus, nous avons veillé à ce que la chambre froide comporte des mesures d'efficacité énergétique tels que l'utilisation de lampes de types LED pour l'éclairage interne. Nous avons donc travaillé avec le R404A surtout à cause de sa disponibilité sur le marché et de la familiarité des techniciens locaux avec ce dernier. Enfin, dans le souci de réaliser une étude des plus complète possible, nous avons proposé l'utilisation d'un onduleur hybride qui est capable d'alterner différentes sources d'énergie selon le besoin (panneaux, batteries, réseau) afin de palier au problème d'intermittence de l'énergie solaire. Tous ces éléments pris en compte, le projet reviendrait à un investissement de 100 000 000 FCFA.

Cette chambre froide serait une solution efficace et rentable au problème de stockage des produits post-récoltes. Elle peut être adaptée pour des plus grandes capacités et pour une diversité de produits à stocker.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] O. Obi, « CPF - ATELIER D'INFORMATION ET DE LANCEMENT DE L'INITIATIVE POMME DE TERRE ET DE LA PATATE DOUCE AU BURKINA FASO ». Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://cpf-bf.org/index.php/actualite/item/97-atelier-d-information-et-de-lancement-de-l-initiative-pomme-de-terre-et-de-la-patate-douce-au-burkina-faso>
- [2] « Agriculture : Une chambre froide inaugurée à Loumbila pour la conservation des produits maraîchers - leFaso.net ». Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://lefaso.net/spip.php?article97111>
- [3] D. C. Nomades, « Ouahigouya : Climat, Température, Quand partir, Météo... | Burkina Faso », Où et Quand. Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ou-et-quand.net/partir/quand/afrique/burkina-faso/ouahigouya/>
- [4] « Climat, météo par mois, température moyenne pour Ouahigouya (Burkina Faso) - Weather Spark ». Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.weatherspark.com/y/38168/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Ouahigouya-Burkina-Faso-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>
- [5] « 1. Les productions vivrières au Burkina Faso [Géographie 3eme_Leçon 3 : AGRICULTURE ET DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE] ». Consulté le: 3 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://fasoeducation.bf/cours_esu/postprimaire/troisieme/hg/geographie/agriculture_developpement_economique_bf/co/grain_productionsvivrieres.html
- [6] « fiche_tech_stockage_frigo_fr.pdf ». Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://www.ctpta.tn/medias/files/fiche_tech_stockage_frigo_fr.pdf
- [7] « Cantek Group ». Consulté le: 23 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cantekgroup.com/fr/2/entrepot-frigorifique-de-pommes-de-terre>
- [8] J. F. SEMPORE, *Techniques frigorifiques*. 2006.
- [9] « Conditions de conservation des denrées – Formation CIEL ». Consulté le: 27 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.tfca.fr/2-p-o-p/conditions-de-conservation-des-denrees/>
- [10] A. TOSSA, « Systèmes PV connectés réseau ».
- [11] « Exemples Réels De Calculs De Van », FasterCapital. Consulté le: 26 octobre 2024.

[En ligne]. Disponible sur: <https://fastercapital.com/keyword/exemples-réels-de-calculs-de-van.html>

[12] R. & Travaux, « Prix d'entretien d'une chambre froide en 2024 », Rénovation et Travaux. Consulté le: 26 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.renovationettravaux.fr/prix-entretien-chambre-froide>

[13] « Quel est le coût de la maintenance photovoltaïque ? Voltania », Voltania. Consulté le: 26 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://voltania.com/votre-projet/cout-maintenance/>

[14] S. SIDIBE et K. E. N'TSOUKPOE, « Cours de production de froid ». 2019.

[15] « Évaporateur ECO - Luvata GCE 352A8ED, 7,94 kW (dT 8 st., R404) avec dégivrage ». Consulté le: 4 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://fastcooling-solution.com/evaporateur-eco-luvata-gce-352a8ed-7-94-kw-dt-8-st-r404-avec-degivrage.html>

ANNEXES A. PRESENTATION DU PROJET ET RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Production de froid

Produire du froid revient à extraire de la chaleur d'un milieu donné afin de créer une ambiance particulière en fonction de l'utilisation visée (domaine médical, conservation des aliments, conditionnement des locaux).

Le principe de fonctionnement des chambres froides est le même que pour tout système de production de froid, il s'agit d'un circuit articulé autour de 4 organes de bases dans lequel circule un fluide frigorigène responsable du transfert de chaleur dans le circuit.

Fluide frigorigène

Il s'agit d'une substance chimique dont la température d'évaporation à la pression atmosphérique est inférieure à la température ambiante, en d'autres termes, le fluide devient liquide une fois à cette ambiance. Il est pour le fluide d'avoir une température d'évaporation peu élevée afin que le passage de la phase liquide à la phase vapeur puisse se faire et qu'on assiste donc à un échange de chaleur.

Les fluides frigorigènes encore appelés réfrigérant sont divisés en 2 grandes familles à savoir :



Les composés organiques

Les fluides organiques sont des dérivés du méthane CH_4 et de l'éthane C_2H_6 . Ils se subdivisent en 3 sous familles :

Tableau A. 1 : Fluides frigorigènes de type organique.

	Les corps purs	Les mélanges de corps purs	Les hydrocarbures
Types de composés organiques	<ul style="list-style-type: none"> - Les CFC (Chloro-Fluoro-Carbure) qui sont complètement halogénées. <p>Exemple : R-11, R-115</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les HCFC (Hydro- Chloro-Fluoro-Carbure) dont certains atomes de chlore sont remplacés par des atomes d'hydrogène. <p>Exemple : R-22, R-123</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les HFC (Hydro-Fluoro-Carbure) qui ne contiennent aucun atome de chlore. <p>Exemple : R-134a, HP-80</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les mélanges azéotropes se comportant comme des corps purs et appartenant à la série des 500, les 2 derniers chiffres indiquant le numéro d'ordre d'apparition des fluides qui composent le mélange. <p>Exemple : R-502</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les mélanges zéotropiques n'étant pas des corps purs, ils appartiennent à la série des 400. <p>Exemple : R-404A</p>	<p>Les fluides frigorigènes de cette sous famille sont issus du raffinage du pétrole mais aussi du dégazolinage du gaz naturel.</p> <p>Exemple : R600 (butane), R290 (propane)</p>

Les composés inorganiques

Il s'agit des fluides de la série 700, généralement nommée R7X. Avec **R** qui représente le réfrigérant, le **7** des centaines désignant la série 700 et le **X** la masse molaire du corps utilisé qui peut être de l'ammoniac NH_3 (R717), de l'eau H_2O (R718) ou encore du dioxyde de carbone CO_2 (R744).

Les caractéristiques d'un bon fluide frigorigène

Le fluide frigorigène de par son rôle de transférer la chaleur possède des caractéristiques physiques, thermodynamiques et chimiques qui font de lui un bon fluide ou pas, toutefois, nous insistons sur le fait qu'aucun fluide ne possède l'ensemble de ces propriétés :

- Ne pas détruire la couche d'ozone;
- Avoir un faible potentiel d'effet de serre ;
- Avoir une grande chaleur latente de vaporisation ;
- Être non toxique et sans effet sur la santé du personnel;
- Avoir un faible rapport de compression, c'est à dire faible rapport entre les pressions de refoulement et d'aspiration ;
- Avoir un point d'ébullition sous pression atmosphérique assez bas (de sorte que la température d'évaporation soit toujours à un niveau plus élevé que la température correspondant à la pression atmosphérique) ;
- Avoir une température critique assez élevée (de sorte que la température de condensation dans les conditions d'utilisation soit bien inférieure à cette température critique);
- Être non toxique et non inflammable en mélange avec l'air;
- Être sans action sur les denrées à conserver;
- Être sans odeur ou avoir une odeur non désagréable;
- Être de faible cout et d'approvisionnement facile;
- Être non corrosif pour les éléments du circuit.

Nous notons que les fluides frigorigènes font face à de nouvelles réglementations ainsi qu'à une attention particulière notamment sur les aspects du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PAO) et du potentiel d'action global sur l'effet de serre à 100 ans (PAES₁₀₀).

En effet des études ont démontré que l'utilisation de certains types de fluides frigorigènes telles

que les CFC, les HFC ou les BrFC contribue fortement à la diminution de la couche d'ozone supposée nous protéger contre les rayons ultraviolets. Parmi les réglementations mises en place nous avons le règlement (UE) n° 517/2014 du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 relatif aux gaz à effet de serre fluorés ou GES-F (JOUE L 150 du 20 mai 2014), remplaçant le règlement (CE) n° 842/2006. Il vise à réaliser des réductions supplémentaires importantes de ces gaz de synthèse utilisés dans les applications industrielles. Ainsi d'ici quelques années les fluides fortement utilisés aujourd'hui tels que le R410a ou encore le R134a seront interdits. C'est ainsi qu'une nouvelle génération de réfrigérant voit le jour, on parle notamment des HFOS (hydrofluoro-olefines) dit fluides inorganiques ou naturels. On peut présenter à titre d'exemple :

- L'eau ou R718 qui ne permet pas encore la production de froid en dessous de 0 °C et dont les applications sont assez limitées;
- Le CO₂ ou R744, il présente des performances intéressantes pour les domaines du froid bien qu'il présente quelques contraintes telle que la nécessité d'une pression élevée, allant au-delà de 100 bars, pour le faire fonctionner. Ce qui implique forcément l'utilisation de composants adaptés pour des raisons de sécurité;
- Les hydrocarbures tels que le propane (R290), le butane (R600a) ou encore l'isobutane (R600) qui présentent d'excellentes propriétés thermodynamiques mais qui sont également extrêmement inflammables. Ils ne conviennent donc pas à de grandes installations;
- L'ammoniac (NH₃ ou R717) offre de meilleures propriétés de transfert de chaleur et s'avère très économe en énergie. Son potentiel de réchauffement global est égal à zéro, ce qui en fait un fluide frigorigène très écologique. Les coûts de l'ammoniac et de son exploitation sont moins élevés comparés à ceux des HFC. Cependant, son utilisation demande de se soumettre à des réglementations et à des normes de sécurité très strictes.

En plus de toutes ces contraintes, nous notons que ces fluides frigorigènes de nouvelle génération ne sont pas facile d'approvisionnement surtout pour nos pays d'Afrique ce qui peut constituer un frein à leur emploi.

Cycle du fluide frigorigène

Le fluide frigorigène décrit un cycle fermé à 4 étapes :

- La compression du fluide gazeux;
- La condensation du fluide gazeux;
- La détente du fluide liquide;
- La vaporisation du fluide liquide qui correspond à la production du froid.

Ces étapes se déroulent dans les 4 organes principaux du circuit frigorifique :

- ***L'évaporateur***

Au niveau de cet organe, le fluide frigorigène entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur qui est l'air ambiant. On parle de surchauffe à ce niveau car le gaz formé est légèrement réchauffé par l'air ambiant.

- ***Le compresseur***

Ici, le fluide frigorigène gazeux qui provient de l'évaporateur à basse température et pression est aspiré et comprimé à une température et une pression plus élevée avant de l'envoyer au niveau du condenseur.

- ***Le condenseur***

Le gaz chaud provenant du compresseur va céder sa chaleur à l'air. On assiste donc à un refroidissement appelé désurchauffe avant la condensation qui va s'effectuer jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur. Le fluide devenu liquide va alors subir un sous refroidissement de quelques degrés avant de passer à l'organe suivant.

- ***Le détendeur***

Il sert à abaisser la pression et la température dans le circuit en vaporisant partiellement le fluide frigorigène.

- ***Les organes annexes du circuit frigorifique***

En plus des organes de base qui constituent le circuit frigorifique, il existe d'autres composants qui permettent de réguler, contrôler mais aussi d'assurer la sécurité de l'installation. Nous les avons regroupé dans le tableau ci- après :

Tableau A. 2 : Organes annexes d'un circuit frigorifique et leur rôle.

Organes annexes	Rôle
Bouteille liquide ou	Stockage du fluide frigorigène lors des manipulations sur le

réservoir de liquide	circuit. Elle permet également de réguler le système frigorifique lorsque les charges thermiques sont importantes. On la place à la sortie du condenseur.
Filtres déshydrateur	Élimination de l'humidité et des impuretés présentes dans le circuit frigorifique. On les retrouve généralement à l'entrée des compresseurs ou en amont des pompes de circulation du fluide frigorigène.
Voyants	On le place après le filtre déshydrateur et avant le détendeur, il permet de déceler la présence éventuelle de bulles de vapeur et d'humidité dans la tuyauterie. Ils peuvent également servir à apprécier le niveau de charge du fluide frigorigène.
Électrovanne ou vanne solénoïde ou vanne électromagnétique	Elle permet l'ouverture et la fermeture du circuit mais aussi d'éviter l'accumulation de fluide frigorigène dans l'évaporateur ainsi que sa migration vers le carter du compresseur.
Pompes	Elles assurent la circulation du fluide frigorigène ou de l'eau de refroidissement du condenseur.
Bouteille anti-coups de liquide	Il est placé entre l'évaporateur et le compresseur et protège ce dernier d'une éventuelle aspiration de fluide frigorigène.
Thermostats	Ils permettent de réguler la température lorsque celle-ci atteint la valeur de consigne, d'arrêter les résistances électriques de l'évaporateur lorsque la température d'évaporation est trop élevée ou l'arrêt du compresseur lorsque la température de refoulement est élevée.
Pressostats	Ils assurent une fonction de régulation de la pression dans le circuit mais aussi de sécurité en arrêtant le compresseur en cas de pression de refoulement trop élevée.

L'ensemble du cycle peut être représenté dans un diagramme enthalpie-pression comme l'illustre la figure ci- dessous.

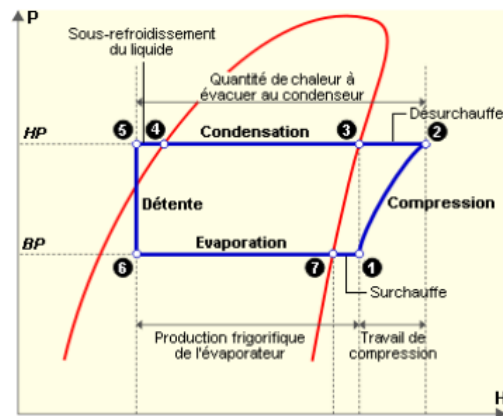


Figure A. 1 : Diagramme enthalpie-pressure d'un cycle frigorifique.[14]

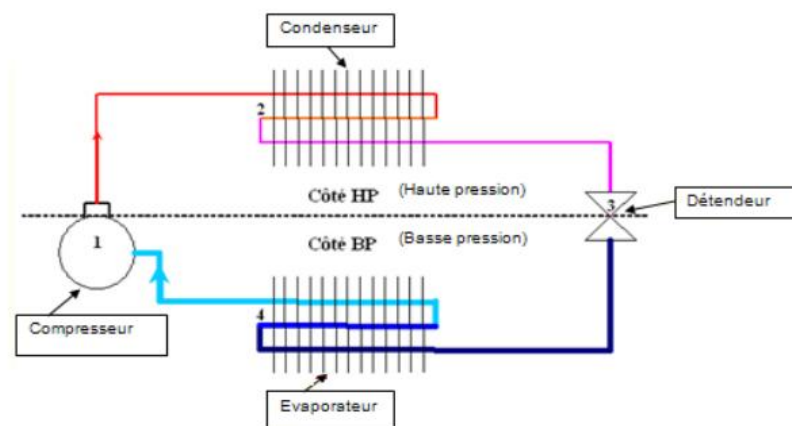


Figure A. 2 : Cycle de production du froid.[14]

➡ Systèmes solaires photovoltaïques

Présentation et principe de fonctionnement

Un système solaire photovoltaïque est un ensemble d'éléments qui ont pour but la production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Il s'agit d'une source d'énergie renouvelable donc inépuisable et disponible en quantité illimitée. Elle capte le rayonnement solaire à travers les cellules photovoltaïques des panneaux solaires et le convertit en électricité de type continue, qui est transformée en courant alternatif grâce à un onduleur.

Les différentes parties d'un système PV varient selon le type d'installation choisie. On distingue principalement les installations de types autonomes et connectés réseau :

🔌 Les systèmes connectés réseau

Pour ce type de systèmes, l'électricité produite est fournie au réseau électrique général pour être

distributed, this type of system is generally installed in urban areas where the network is present. The surplus production not being stored, it can be sold according to the *feed in tariff* model (all the production of the PV is sold to the grid distributor) or *net metering* (the energy produced by the PV is directly consumed and if there is a surplus, this is injected into the grid).

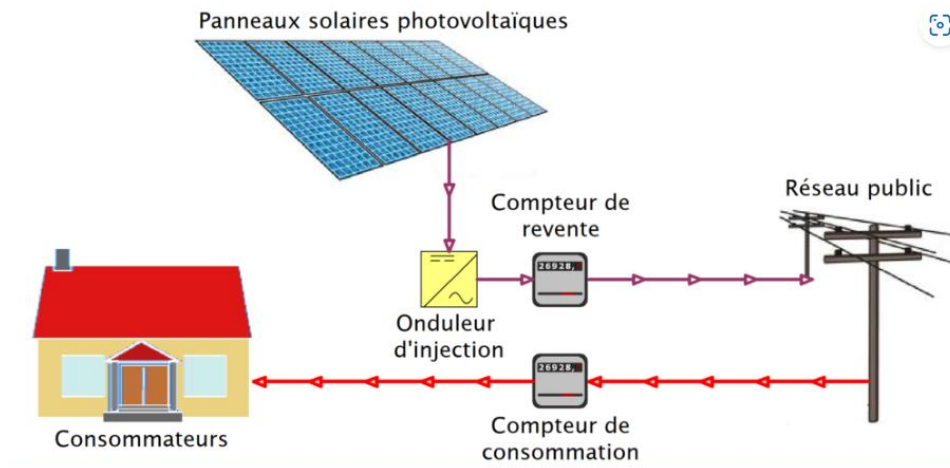


Figure A. 3 : Illustration d'un système PV connecté au réseau.

Les systèmes autonomes

Autonomous solar systems are characterized by the presence of storage, notably thanks to solar batteries. Thus, these systems are entirely independent of the electrical network in place and are ideal for remote areas not having access to the distribution network.

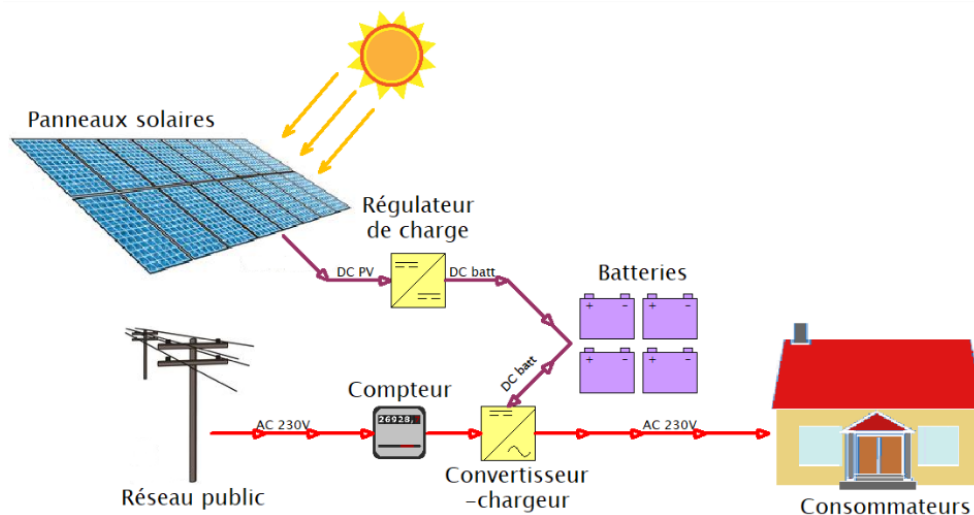


Figure A. 4 : Illustration d'un système PV autonome.

Les éléments composants les systèmes PV

Les panneaux solaires

Il s'agit de l'élément de base de tout système solaire photovoltaïque. Ils sont composés de cellules photovoltaïques encore appelés cellule solaire qui sont chargées de capter le rayonnement solaire et de le transformer en électricité de type continue à travers l'effet photovoltaïque. Ce dernier se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre 2 semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux d'une longueur d'onde adéquate.

Les onduleurs solaires

Il s'agit d'un appareil électronique chargé de convertir le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif afin d'alimenter les différentes charges. Il est choisi en fonction du type d'installation, connecté réseau ou autonome. Une fois installé et programmé il fonctionne de façon permanente. Bien qu'il existe une multitude de types d'onduleurs, nous nous sommes intéressés aux onduleurs hybride pour notre projet.

En effet, il présente l'avantage de pouvoir gérer plusieurs sources d'énergies autres que les panneaux photovoltaïques telles que les batteries, le réseau ou encore un groupe électrogène. De plus, il est intelligent et est capable de déterminer de lui-même quelle source est la mieux adaptée pour satisfaire les charges en assurant ainsi une alimentation électrique constante.

Les batteries solaires

Les batteries solaires sont une partie obligatoire pour un système PV de type autonome. De façon générale, à cause du caractère intermittent de la ressource solaire, l'énergie générée par les panneaux solaires n'est pas toujours suffisante pour satisfaire les besoins en électricité raison pour laquelle on prévoit des batteries. Ce composant permet de stocker l'énergie lorsqu'elle est produite sous forme chimique et à la garder pour une utilisation ultérieure (nuits, journées à faible ensoleillement). Elles sont composées d'accumulateurs électrochimiques réversibles et peuvent être soit reliées à un onduleur indépendant soit à un onduleur directement intégré. Le courant est ainsi converti en courant alternatif pour être utilisé pour l'alimentation des charges.

ANNEXES B. MATERIELS ET METHODES

B.1. Dimensionnement de la chambre froide

➡ Calcul des apports calorifiques

✚ Apports calorifiques par les parois

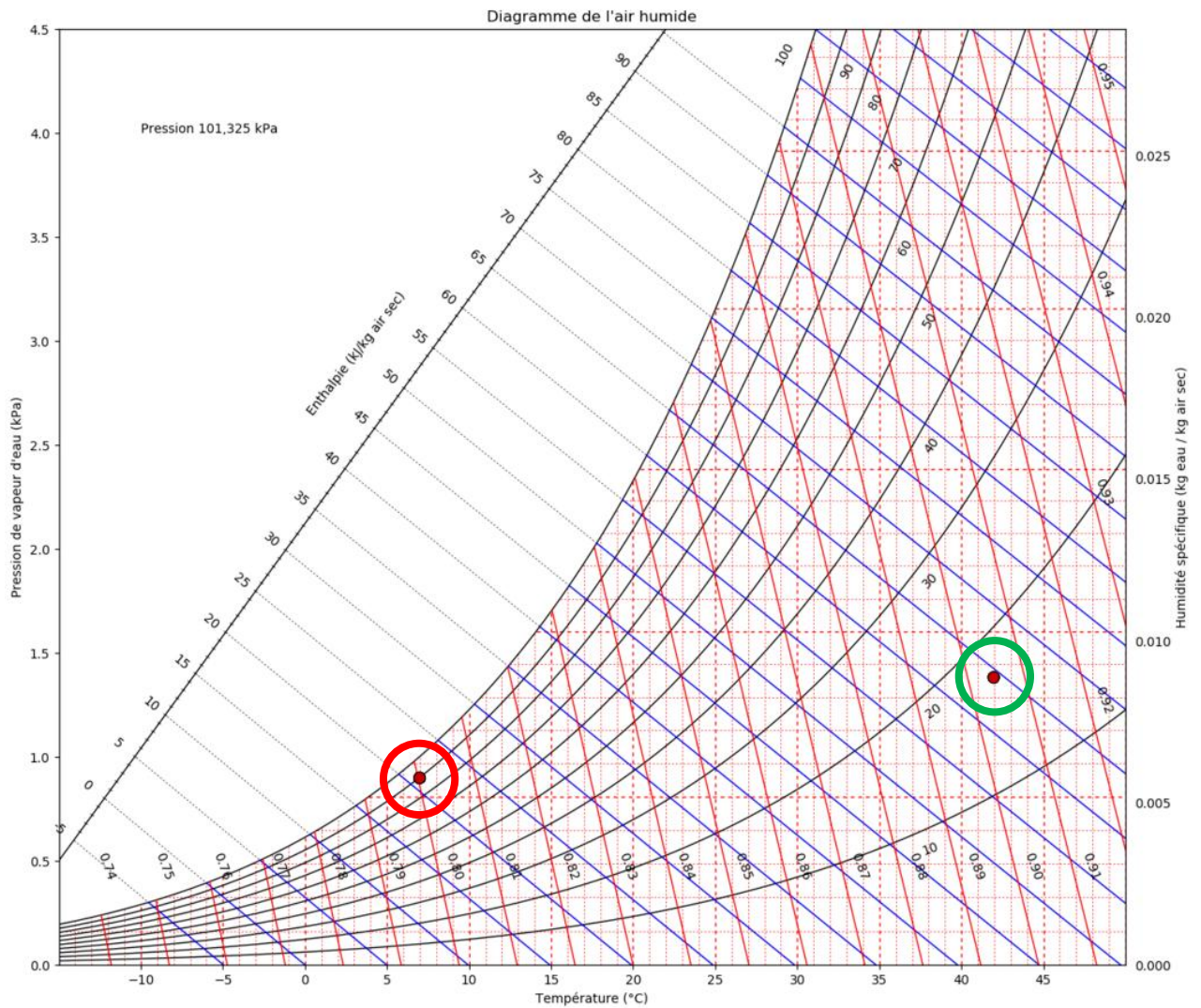


Figure B. 1 : Représentation des points extérieur (vert) et intérieur (rouge) sur le diagramme de l'air humide.

 Apports calorifiques par les personnes

Tableau B. 1 : Quantité de chaleur dégagée par personne et par heure.

Température de la chambre froide (° C)	Chaleur dégagée par personne et par heure q en (W)		
	Travail dur	Travail moyen	Travail léger
+10 C	372	244	186
+7 C	372	250	198
+4 C	372	256	209
+2 C	372	267	221
0 C	372	273	233
-7 C	384	314	279
-12 C	395	337	291
-18° C	407	372	326
-23 C	419	407	349

➡ **Fluide frigorigène**

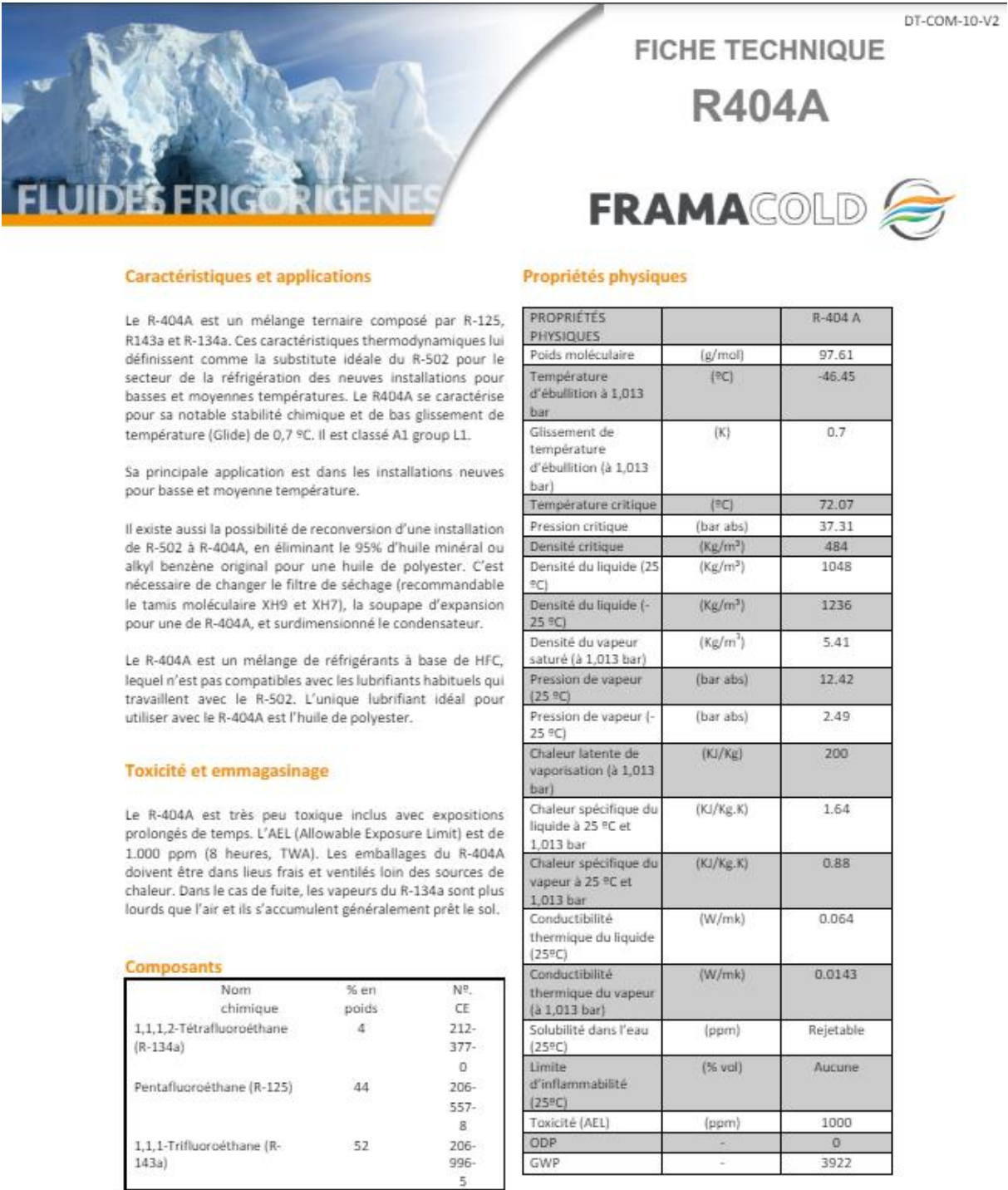


Figure B. 2 : Propriétés du fluide R404A.

➔ Fiches techniques des équipements



Groupe froid

Spécifications électriques

Phase	3
Code électrique	E
Alimentation du compresseur [V]	400/3/50
Fréquence [Hz]	50 Hz
Alimentation du ventilateur [V/Ph/Hz]	230/1/50
Faible valeur de tension nominale à 50 Hz [V]	400
Consommation électrique du ventilateur à 50 Hz [W]	680
Valeur élevée de tension nominale à 50 Hz [V]	400
Consommation électrique du ventilateur à 60 Hz [W]	890
Tension du ventilateur à 50 Hz (max.) [V] [Max]	230
Tension du ventilateur à 50 Hz (max.) [V] [Min]	230
Intensité du ventilateur à 50 Hz [A]	3.00
Intensité du ventilateur à 60 Hz [A]	3.92
Nombre de phases (ventilateur)	1
Nombre de phases (compresseur)	3
Tension 50 Hz [V] [max.]	400
Tension 50 Hz [V]	400

Figure B. 3 : Fiche technique du groupe froid.

Toutes les valeurs sont calculées sur la base des conditions de fonctionnement fournies.

The selected compressor or condensing unit capacity is used to calculate mass flows.

Débit massique dans le compresseur : 578,2 kg/h

Point	Description	Température [°C]	Pression (a) [bar]	Densité [kg/m ³]	Enthalpie [kJ/kg]	Entropie [kJ/(kg·K)]
1	Aspiration du compresseur	-2,0	4,342	21,06	367,6	1,639
2	Refoulement du compresseur (estimé)	71,9	20,60	91,51	417,2	1,69
2s	Point de rosée de condensation	45,3	20,60	118,4	381,3	1,581
3s	Point bulle de condensation	45,0	20,60	935,7	268,4	1,227
3a	Sortie du condenseur	44,9	20,60	935,8	268,4	1,227
3	Sous-refroidissement additionnel inclus	44,9	20,60	935,8	268,4	1,227
4	Après le détendeur	-10,3	4,342	45,55	268,4	1,262
4s	Point bulle d'évaporation	-10,6	4,342	1190	185,6	0,9468
1s	Point de rosée d'évaporation	-10,0	4,342	22,05	360,1	1,611
1a	Sortie de l'évaporateur	-2,0	4,342	21,06	367,6	1,639

Figure B. 4 : Details de performance du groupe froid.

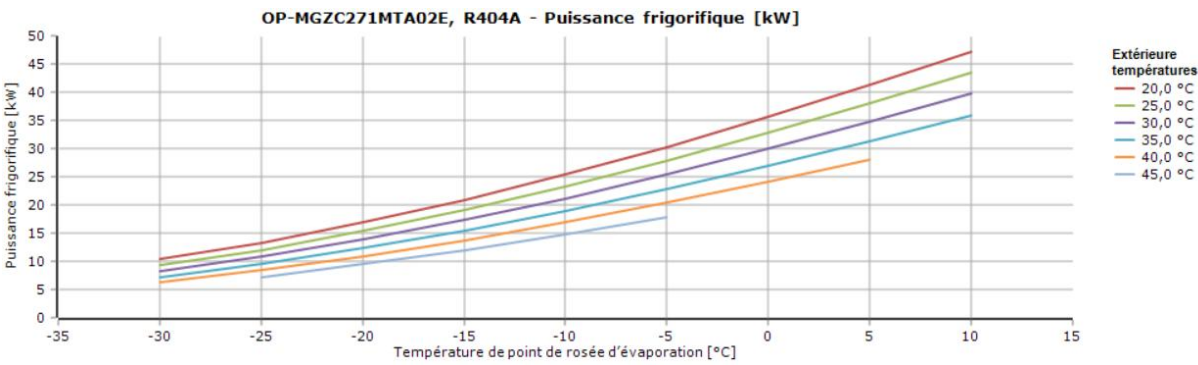


Figure B. 5 : Graphe de puissance frigorifique du groupe froid en fonction de la température extérieure.

Evaporateur

Tableau B. 2 : Données techniques évaporateurs [15].

Evaporateur ECO-LUVATA	
Puissance	7,94 kW
Débit d'air	5000 m³/h
Ventilateur	2*350 mm
Consommation électrique	370 W
Dégivrage*	4950 W
Pression d'utilisation max	21 bars
Pression test max	40 bars
Fluide frigorigène	R404A

Conditions de fonctionnement			
Fluide frigorigène :	R404A	Puissance frigorifique :	7,940 kW
Débit massique dans la conduite :	284,8 kg/h	Puissance calorifique :	12,49 kW
Température de point de rosée d'évap	-10,0 °C	Température de point de rosée de conde	44,6 °C
Pression d'évaporation :	4,342 bar	Pression de condensation :	20,27 bar
Température moyenne d'évaporation :	-10,2 °C	Sous-refroidissement :	0 K
Surchauffe utile :	8,0 K	Sous-refroidissement additionnel :	0 K
Surchauffe additionnelle :	0 K		
Température de refoulement :	78,0 °C		

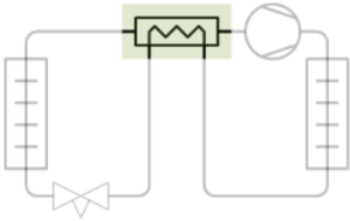


Figure B. 6 : Conditions de fonctionnement de l'évaporateur.

✚ Détendeur

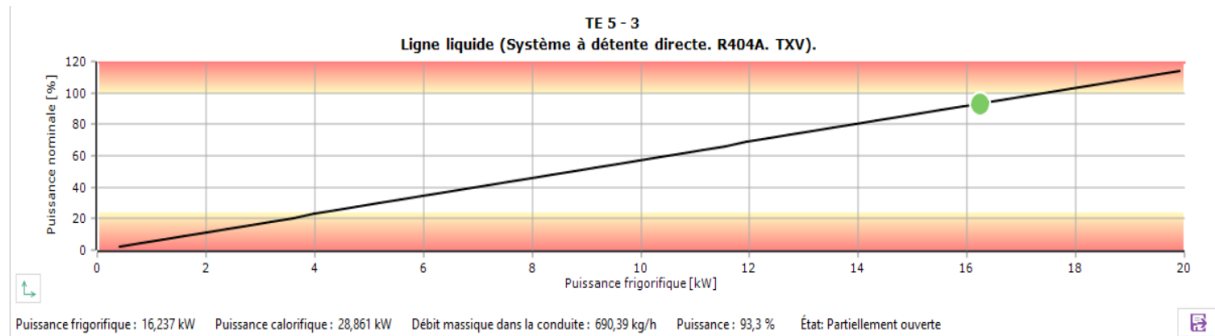


Figure B. 7 : Graphe du point de fonctionnement du détendeur TE5-3.

B.2. Dimensionnement du système solaire photovoltaïque

➔ *Fiches techniques des équipements*

🚦 Panneaux solaires

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM575N-72HL4 JKM575N-72HL4-V		JKM580N-72HL4 JKM580N-72HL4-V		JKM585N-72HL4 JKM585N-72HL4-V		JKM590N-72HL4 JKM590N-72HL4-V		JKM595N-72HL4 JKM595N-72HL4-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	575Wp	432Wp	580Wp	436Wp	585Wp	440Wp	590Wp	444Wp	595Wp	447Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	42.22V	39.60V	42.37V	39.69V	42.52V	39.81V	42.67V	39.90V	42.81V	40.02V
Maximum Power Current (Imp)	13.62A	10.92A	13.69A	10.99A	13.76A	11.05A	13.83A	11.12A	13.90A	11.18A
Open-circuit Voltage (Voc)	50.88V	48.33V	51.02V	48.46V	51.16V	48.60V	51.30V	48.73V	51.41V	48.83V
Short-circuit Current (Isc)	14.39A	11.62A	14.47A	11.68A	14.55A	11.75A	14.63A	11.81A	14.71A	11.88A
Module Efficiency STC (%)	22.26%		22.45%		22.65%		22.84%		23.03%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/ 1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficient of Pmax	-0.29%/°C									
Temperature coefficient of Voc	-0.25%/°C									
Temperature coefficient of Isc	0.045%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

*STC:

Irradiance 1000W/m²

Cell Temperature 25°C

AM=1.5

NOCT:

Irradiance 800W/m²

Ambient Temperature 20°C

AM=1.5

Wind Speed 1m/s

©2022 Jinko Solar Co., Ltd. All rights reserved.

Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

JKM575-595N-72HL4-(V)-F3C1-EU-EN

Figure B. 8 : Fiche technique des panneaux solaires.

Onduleur

Spécifications techniques		SUN2000-60KTL-M0
Rendement		
Rendement max.		98.9% @480 V; 98.7% @380 V / 400 V
Rendement énergétique européen pondéré		98.7% @480 V; 98.5% @380 V / 400 V
Entrée		
Tension d'entrée max. ¹		1,100 V
Courant d'entrée max. par MPPT		22 A
Max. Courant de court-circuit par MPPT		30 A
Tension de démarrage		200 V
MPPT Tension de fonctionnement ²		200 V ~ 1,000 V
Tension nominale d'entrée		600 V @380 Vac / 400 Vac; 720 V @480 Vac
Nombre d'entrées		12
Nombre de trackers MPP		6
Sortie		
Puissance active CA nominale		60,000 W
Max. Puissance apparente AC		66,000 VA
Max. Puissance active CA (cosφ = 1)		66,000 W
Tension de sortie nominale		220 V / 380 V, 230 V / 400 V, default 3W + N + PE; 3W + PE optional in settings; 277 V / 480 V, 3W + PE
Fréquence nominale réseau AC		50 Hz / 60 Hz
Courant nominal de sortie		91.2 A @380 V, 86.7 A @400 V, 72.2 A @480 V
Max. Courant de sortie		100 A @380 V, 95.3 A @400 V, 79.4 A @480 V
Facteur de puissance réglable		0.8 captatif ... 0.8 inductif
Distorsion totale d'harmonique max.		< 3%
Protection		
Dispositif de déconnexion côté entrée		Oui
Protection anti-îlotage		Oui
Protection contre la surintensité AC		Oui
Protection contre l'inversion de polarité DC		Oui
Surveillance des défauts de la chaîne PV		Oui
Parafoudre DC		Type II
Parafoudre AC		Type II
Détection de résistance d'isolement DC		Oui
Surveillance du courant résiduel		Oui







Figure B. 9 : Données techniques fiche technique de l'onduleur.

Communication	
Écran	Voyants LED; Bluetooth/WLAN + APP
RS485	Oui
USB	Oui
BUS de surveillance (MBUS)	Oui
Données GENERALES	
Dimensions (L x H x P)	1,075 x 555 x 300 mm
Poids (support de montage compris)	74 kg
Plage de température de fonctionnement	-25°C ~ 60°C
Refroidissement	Convection naturelle
Max. Altitude de fonctionnement	4,000 m
Humidité relative de fonctionnement	0 ~ 100%
Connecteur DC	Amphenol Helios H4
Connecteur AC	Terminal PG étanche + pince de terminal
Indice de protection	IP65
Topologie	Transformerless
Consommation nocturne	< 2 W
Conformité aux normes (plus disponible sur demande)	
Sécurité	EN 62109-1/-2, IEC 62109-1/-2, EN 50530, IEC 62116, IEC 60068, IEC 61683
Normes de connexion au réseau	IEC 61727, VDE-AR-N4105, VDE 0126-1-1, BDEW, VDE 4120, UTE C 15-712-1, CEI 0-16, CEI 0-21, RD 661, RD 1699, P.O. 12.3, RD 413, EN-50438-Turkey, EN-50438-Ireland, C10/11
La tension d'entrée maximale est la limite supérieure de la tension continue. Toute tension CC d'entrée plus élevée endommagerait probablement l'onduleur. Toute tension d'entrée CC en dehors de la plage de tension de fonctionnement peut entraîner un dysfonctionnement de l'onduleur.	

Figure B. 10 : Données générales fiche technique de l'onduleur.

Batteries

TECHNICAL PARAMETERS PREMIUM LVS

						
	LVS 4.0	LVS 8.0	LVS 12.0	LVS 16.0	LVS 20.0	LVS 24.0
Battery Module	LVS (4 kWh, 51.2 V, 45 kg)					
Number of Modules	1	2	3	4	5	6
Usable Energy [1]	4 kWh	8 kWh	12 kWh	16 kWh	20 kWh	24 kWh
Max Cont. Output Current [2]	65 A	130 A	195 A	250 A	250 A	250 A
Peak Output Current [2]	90 A, 5 s	180 A, 5 s	270 A, 5 s	360 A, 5 s	360 A, 5 s	360 A, 5 s
Dimensions (H/W/D)	528 x 650 x 298 mm	761 x 650 x 298 mm	994 x 650 x 298 mm	1227 x 650 x 298 mm	1460 x 650 x 298 mm	1693 x 650 x 298 mm
Weight	64 kg	109 kg	154 kg	199 kg	244 kg	289 kg
Nominal Voltage	51.2 V					
Operating Voltage	40-57.6 V					
Operating Temperature	-10 °C to +50°C					
Battery Cell Technology	Lithium Iron Phosphate (cobalt-free)					
Communication	CAN / RS485					
Enclosure Protection Rating	IP55					
Round-Trip Efficiency	≥95%					
Scalability [3]	Max. 64 Modules in Parallel (256 kWh)				Single Tower Only	
Certification	VDE2510-50 / IEC62619 / CE / CEC / UN38.3					
Applications	ON Grid / ON Grid + Backup / OFF Grid					
Warranty [4]	10 Years					
Compatible Inverters	Refer to BYD Battery-Box Premium LVS Minimum Configuration List					

[1] DC Usable Energy, Test conditions: 100% DOD, 0.2C charge & discharge at + 25 °C. System Usable Energy may vary with different inverter brands
 [2] Charge derating will occur between -10 °C and +5 °C

Figure B. 11 : Fiche technique des batteries.