



**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 (Examinateur)

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 |
| Table des matières | VII |
| LISTE DES TABLEAUX..... | X |
| LISTE DES FIGURES | XI |
| I. <i>Introduction</i> | 1 |
| 1. Contexte et justification de l'étude | 1 |
| 2. Objectifs de l'étude..... | 2 |
| II. <i>Présentation de l'entreprise et du projet.....</i> | 4 |
| 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 |
| III. <i>Recherches bibliographiques</i> | 8 |
| 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. | <i>Matériels et Méthodes</i> | 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 frigorigène | 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. | <i>Résultats de l'étude technique</i> | 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 frigorigène | 31 |
| 2.2.1. | La puissance frigorigène prévisionnelle | 31 |
| 2.2.2. | Les charges dues aux moteurs des ventilateurs | 31 |
| 2.2.3. | La puissance frigorigène 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. | <i>Etude financière du projet</i> | 43 |
| 1. | Détermination du cout d'investissement..... | 43 |
| 2. | Calcul de la VAN..... | 45 |
| VII. | <i>Analyse des effets du projet sur l'environnement.....</i> | 48 |
| VIII. | <i>Conclusion</i> | 60 |
| <i>Bibliographie</i> | | 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 |

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 maraîchère 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 écouter. 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.

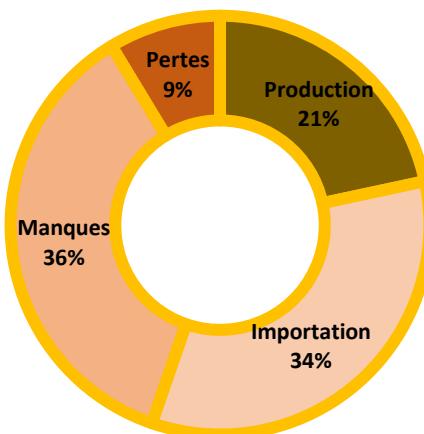


Figure 1:Graphe de l'ensemble des besoins en pommes de terre au Burkina Faso.

Actuellement on note principalement l'utilisation d'une chambre froide pour la conservation des produits maraîchers 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. PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE ET DU PROJET

1. PRÉSENTATION 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 Dérklé cité ASECNA 1, route du front de terre à Dakar. L'entreprise emploie plusieurs personnes suivant l'organigramme :

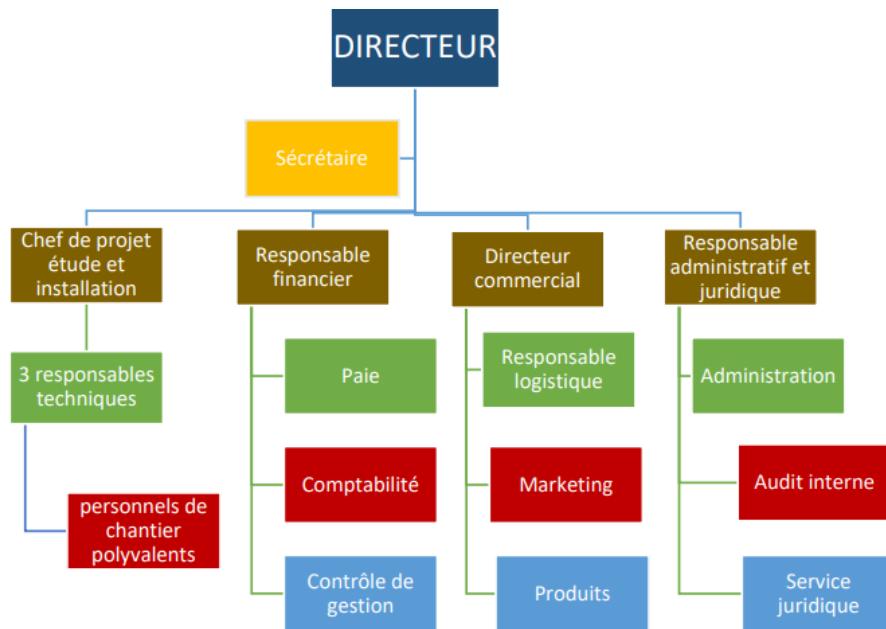


Figure 2 : Organigramme de l'entreprise de NRJ Solaire.

→ 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 Figures 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.

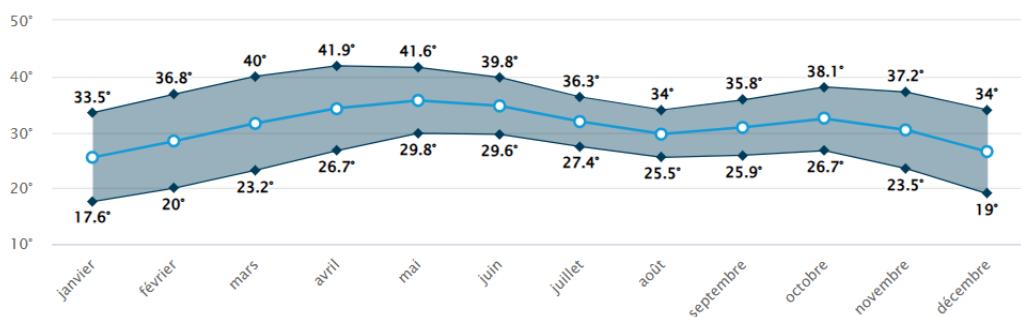


Figure 4 : Graphe de températures de la ville de Ouahigouya au cours de l'année[3].

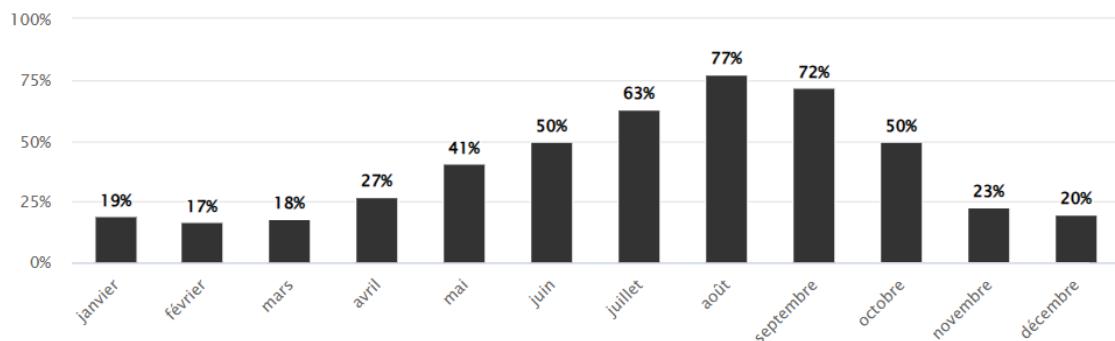


Figure 5 : Graphe de l'humidité relative de la ville de Ouahigouya au cours de l'année[3].

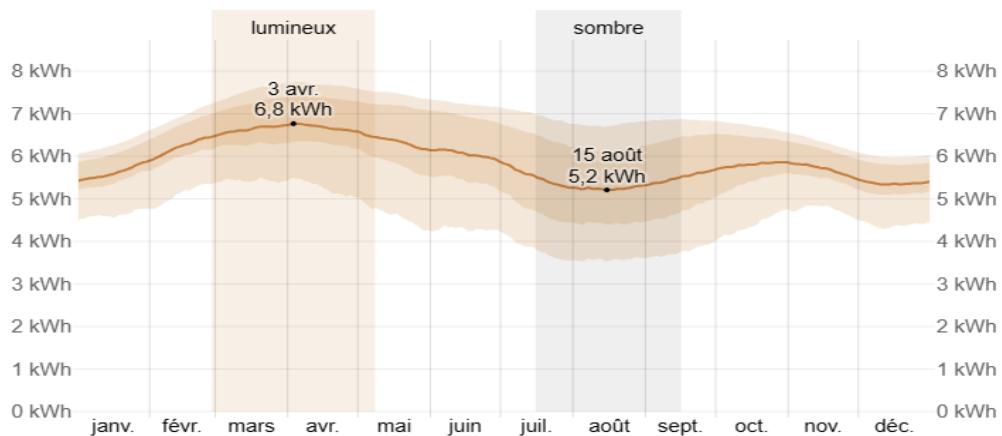


Figure 6 : Rayonnement solaire incident quotidien à Ouahigouya[4].

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

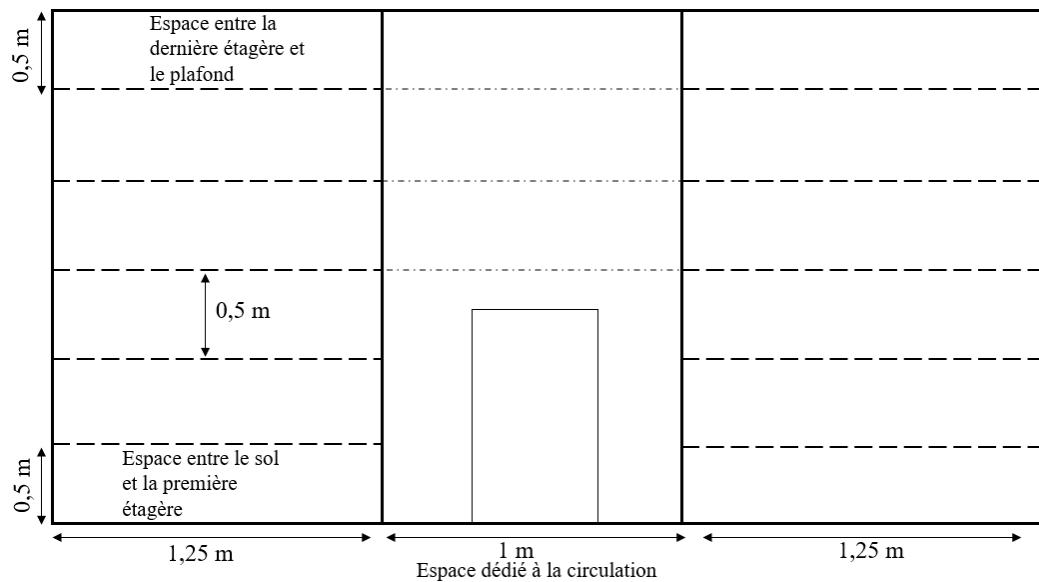


Figure 7 : Disposition des étagères à l'intérieur de la CF.

- 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.

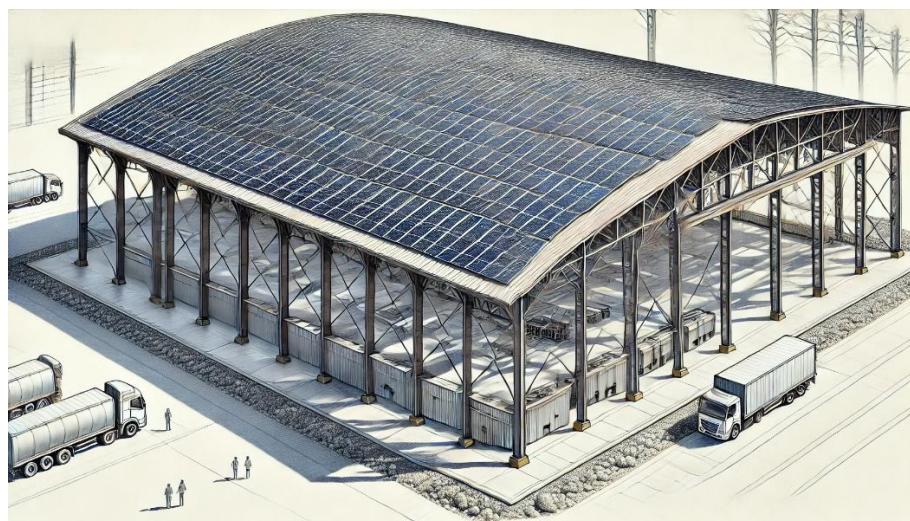


Figure 8 : Aperçu de la conception de la CF.

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 d e 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 cout) . 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 tastement |
| 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 tastement |
| 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 FRIGORIGENE

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 |

Apres avoir comparé les différents fluides, le choix final c'est porté sur le R404A. C'est un mélange zéotropique de fluoroéthanes : 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 :

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

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) [m³] ;

Densité d'entreposage = 400 kg/m³ 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 [W/m² °C];

S : la surface de la paroi [m²];

ΔT : la différence de température entre le milieu extérieur et le local [°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 [W/(m² °C)];

h_{ext} : le coefficient de convection extérieur [W/ (m² °C)];

e_i : l'épaisseur de la paroi [m];

λ_i : la conductivité thermique de la paroi i [W/m. °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] ;

$q_r = 7,54 \text{ kJ kg}^{-1} 24\text{h}$ [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] ;

$C = 3,44 \text{ kJ/kg}^{-1} \text{ °C}$ [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

À 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**

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

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].

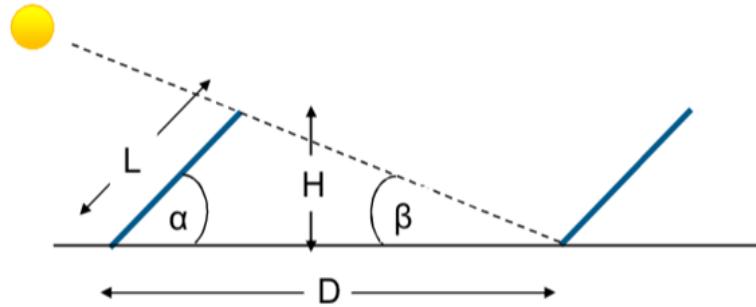


Figure 9 : Illustration de la distance minimale sans ombrage.

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

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

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

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

Avec

25

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

 **Coté 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

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

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

Avec

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

$N_{mod/string}$: 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 × 55 × 38 | 501,6 |
| Plafond | 0,24 | 0,24 × 9,74 × 38 | 88,83 |
| Sol | 0,25 | 0,25 × 9,74 × 38 | 96,23 |
| Q ₁ (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 choisi et ajouté 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 sont portés 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.

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

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

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

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 | |
| 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 | 244800 |

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 strings/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: $C_{tb} = \frac{244\,800 \times 1}{0,9 \times 51,2 \times 0,95}$

$$C_{tb} = 5592 \text{ Ah}$$
$$C_{tb} = 286,32 \text{ kWh}$$

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

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

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 | 56 | 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 protège | 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 \times 1134 mm

$$\text{Surface de toit nécessaire} = \text{Longueur} \times \text{largeur} \times \text{nombre de panneaux}$$

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

$$\text{Surface de toit nécessaire} = 256 \text{ m}^2$$

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

$$\text{Surface de toit} = \text{Surface de toit nécessaire} \times 1,1$$

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

$$\text{Surface de toit} = 282 \text{ m}^2$$

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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

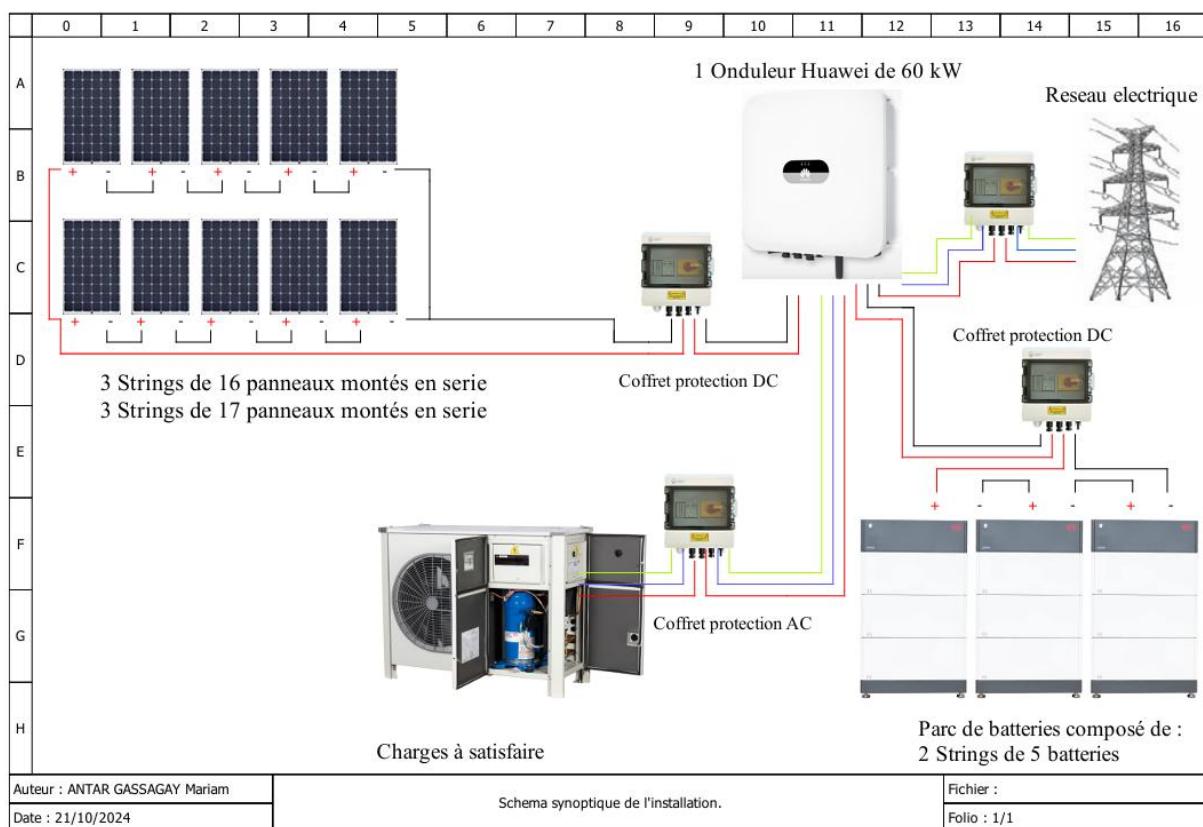


Figure 11 : Schéma synoptique de l'installation.

Schéma unifilaire de l'installation

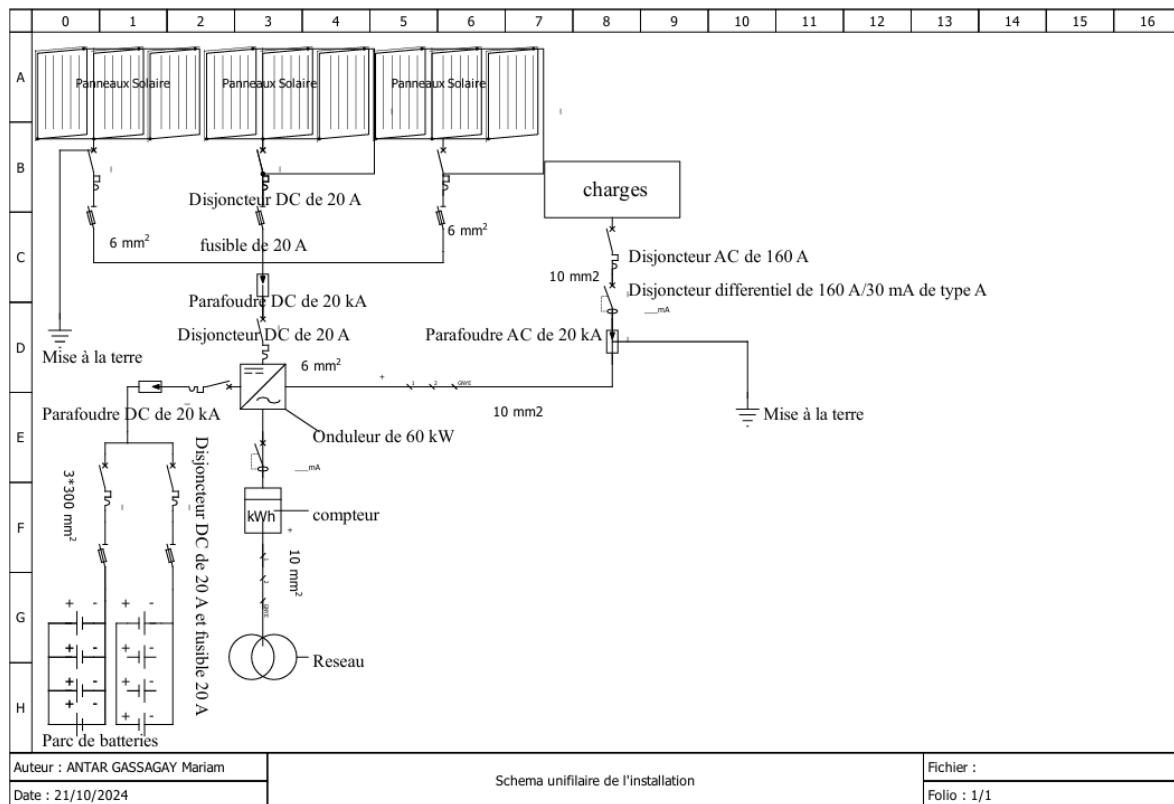


Figure 12 : Schéma unifilaire de l'installation.

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 :

$$CF = revenus - dépenses$$

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

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

$$Revenus dus à la vente de pommes de terre = 3 750 000 FCFA$$

- 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 cout de production des pommes de terre. La mise en place de la chambre froide engendrera une augmentation de la production. Une estimation du cout d'une telle augmentation a été faite. Il comprend entre autres le cout des semences, de l'engrais et des fertilisants, de la main d'œuvre ainsi que des procédés agricoles tels que l'irrigation. Ainsi, le cout 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 cout 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 cout de la maintenance du système solaire photovoltaïque. De façon générale, le cout de la maintenance des systèmes PV représente 1 à 3% du cout du CAPEX (dépenses d'investissement du capital) en fonction de l'ampleur et de l'importance du projet [13]. Vue qu'ici le projet est relativement important, le cout 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.

$$VAN = -CI + \frac{R_1}{1+r} + \frac{R_2}{(1+r)^2} + \cdots + \frac{R_n}{(1+r)^n}$$
$$AN = -100\ 000\ 000 + \frac{8\ 350\ 000}{1+10\%} + \frac{8\ 350\ 000}{(1+10\%)^2} + \cdots + \frac{13\ 501\ 736}{(1+10\%)^{13}} + \cdots + \frac{8\ 350\ 000}{(1+10\%)^{25}}$$

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

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 CO₂_{PV} pour une installation utilisant des panneaux solaires au Burkina Faso est de 0,606 kgCO₂/kWh.

$$Emission^{CO2} = CO_{2_{PV}} \times Energie \text{ produite par le champ PV}$$

Avec

CO_{2PV} : l'émission de CO₂ en [kgCO₂/kWh].

Ainsi,

Emission^{CO2} = $0,606 \times 244,8 \times 365$

Emission^{CO2} = 54126,2 kgCO₂/an.

Une fois l'émission de CO₂ 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 |
| | | | | Création d'emplois directs et indirects | Moyenne | Régionale | Moyenne | Moyenne |
| | | | Milieu humain | Activités économiques | Développement des activités commerciales et génération de revenus | Moyenne | Locale | Longue |
| | | | | Renforcement des compétences locales | Faible | Locale | Courte | Mineure |
| Exploitation et Entretien | Site du projet | • Operations de maitenance sur | Milieu humain | Recrutement et formation des agents | Moyenne | Régionale | Longue | Majeure |
| | | | Populations | Augmentation de la | Forte | Régionale | Longue | Majeure |

Mise en place d'une chambre froide solaire positive pour le stockage de pommes de terre

| Phase | Zone concernée | Activités sources d'impact | Composante du milieu affectée | Impact Identifié | Nature de l'impact | | | Importance |
|-------|----------------|---|-------------------------------|--|--------------------------------------|-----------|--------|------------|
| | | | | | Intensité | Etendue | Durée | |
| | | <ul style="list-style-type: none"> les différentes machines • 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 |
| | | | | 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 | <ul style="list-style-type: none"> • Travaux préliminaires • Assemblage et montage de la chambre froide • Installation et montage du système photovoltaïque | 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 |
| | | | 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 |

Mise en place d'une chambre froide solaire positive pour le stockage de pommes de terre

| 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 |
| | | | | Déchets | Dégradation du cadre de vie | Moyenne | Locale | Courte |
| | | | | Infrastructures et mobilité | Dégradation des routes | Moyenne | Locale | Courte |
| | | | | | Augmentation des accidents de circulation | Moyenne | Locale | Courte |
| Exploitation et Entretien | Site du projet | <ul style="list-style-type: none"> Operations de maintenance sur les différentes machines Entretien des panneaux solaires (nettoyage et maintenance) | Milieu physique | Sol | Contamination du sol par les déchets produits | Faible | Ponctuelle | Courte |
| | | | Milieu humain | Santé et sécurité au travail | Accidents de travail | Moyenne | Locale | Longue |
| | | | | | Risque d'électrocution et d'électrisation | Moyenne | Locale | Moyenne |
| | | | Milieu humain | Populations communautés | Risques d'interruption de la fourniture d'électricité et de désagréments aux populations | Faible | Locale | Courte |
| | | | | Déchets | Détérioration du cadre de | Faible | Ponctuelle | Courte |

Mise en place d'une chambre froide solaire positive pour le stockage de pommes de terre

| 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 préliminaires Assemblage et montage de la chambre froide | Milieu physique | Sol/sous-sol | Le démantèlement laissera une portion de terre qui a été préalablement déforestée donc qui a perdu 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 |
| | | Installation et montage du système photovoltaïque | Milieu humain | Travail | Le démantèlement de la chambre froide provoquera une perte | Forte | Locale | Moyenne | Forte |

Mise en place d'une chambre froide solaire positive pour le stockage de pommes de terre

| 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/communaute | 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 |
| | | | | Déchets | Le démantèlement engendrera des déchets tels que les panneaux usagers, les batteries ainsi que les autres équipements | Faible | Ponctuelle | Courte |

- 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'inhaler 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'ouïe 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 capacité 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-reels-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 CH₄ et de l'éthane C₂H₆. Ils se subdivisent en 3 sous familles :

Tableau A. 1 : Fluides frigorigènes de type organique.

| Types de composés organiques | Les corps purs | Les mélanges de corps purs | Les hydrocarbures |
|------------------------------|--|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> - Les CFC (Chloro-Fluoro-Carbure) qui sont complètement halogénées. Exemple : R-11, R-115 - Les HCFC (Hydro- Chloro-Fluoro-Carbure) dont certains atomes de chlore sont remplacés par des atomes d'hydrogène. Exemple : R-22, R-123 - Les HFC (Hydro-Fluoro-Carbure) qui ne contiennent aucun atome de chlore. Exemple : R-134a, HP-80 | <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. Exemple : R-502 - Les mélanges zéotropiques n'étant pas des corps purs, ils appartiennent à la série des 400. Exemple : R-404A | <p>Les fluides frigorigènes de cette sous famille sont issus du raffinage du pétrole mais aussi du dégazolinage du gaz naturel. 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 NH₃ (R717), de l'eau H₂O (R718) ou encore du dioxyde de carbone CO₂ (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 coût 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 économique 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.

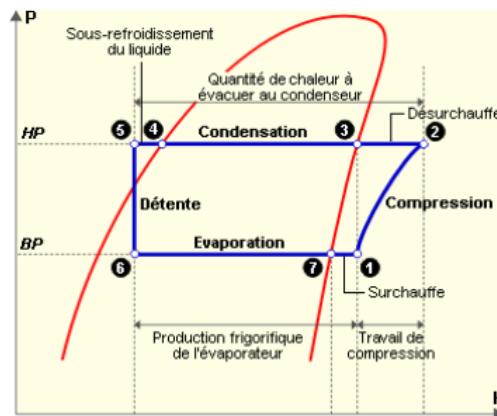


Figure A. 1 : Diagramme enthalpie-pression d'un cycle frigorifique.[14]

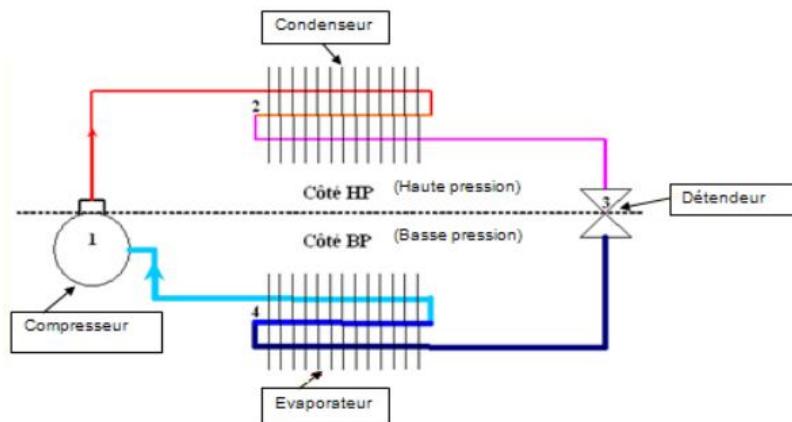


Figure A. 2 : Cycle de production du froid.[14]

➤ 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 continu, 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

distribué, ce type de système est généralement installé en zone urbaine où le réseau est présent. Le surplus de production n'étant pas stocké, il peut être vendu selon le modèle *feed in tariff* (toute la production du PV est vendue au distributeur réseau) ou *comptage net* (l'énergie produite par le PV est directement consommée et s'il y'a surplus, celui-ci est injecté sur le réseau).

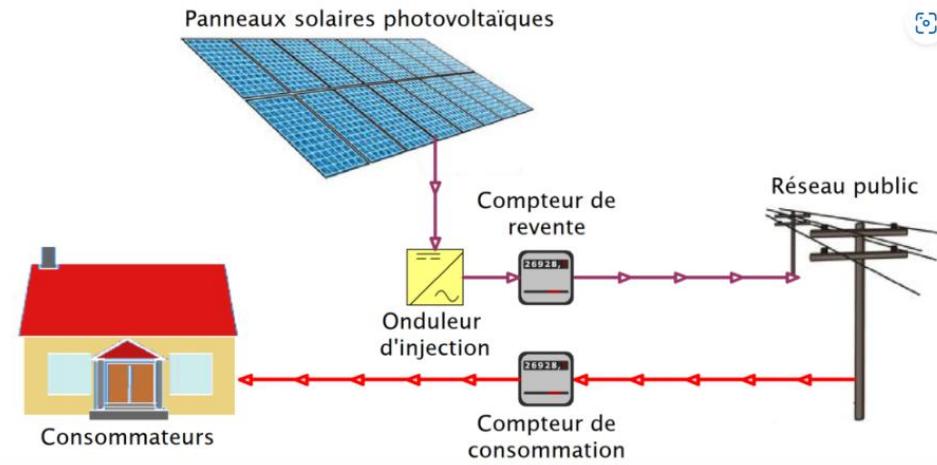


Figure A. 3 : Illustration d'un système PV connecté au réseau.

✚ Les systèmes autonomes

Les systèmes solaires autonomes sont caractérisés par la présence de stockage notamment grâce aux batteries solaires. Ainsi, ces systèmes sont entièrement indépendants du réseau électrique en place et sont idéals pour les zones reculées n'ayant pas d'accès au réseau de distribution.

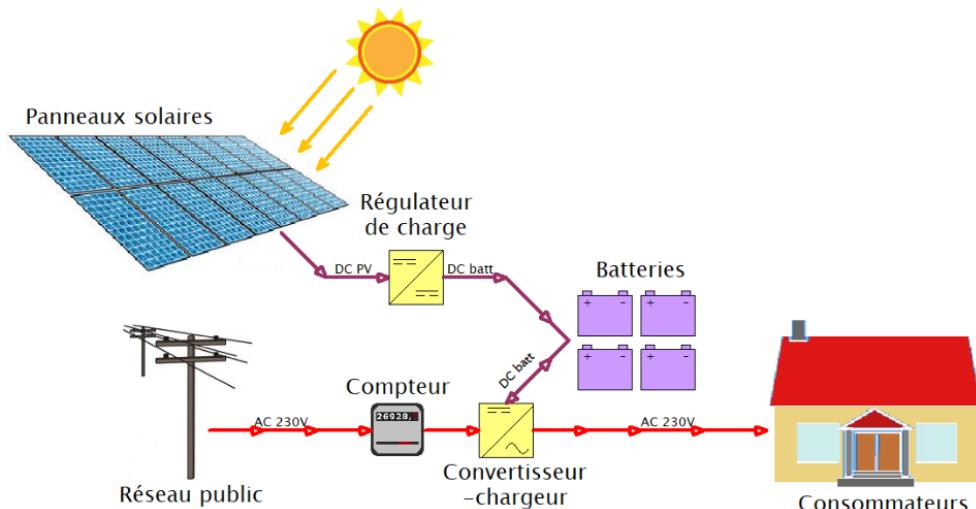


Figure A. 4 : Illustration d'un système PV autonome.

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

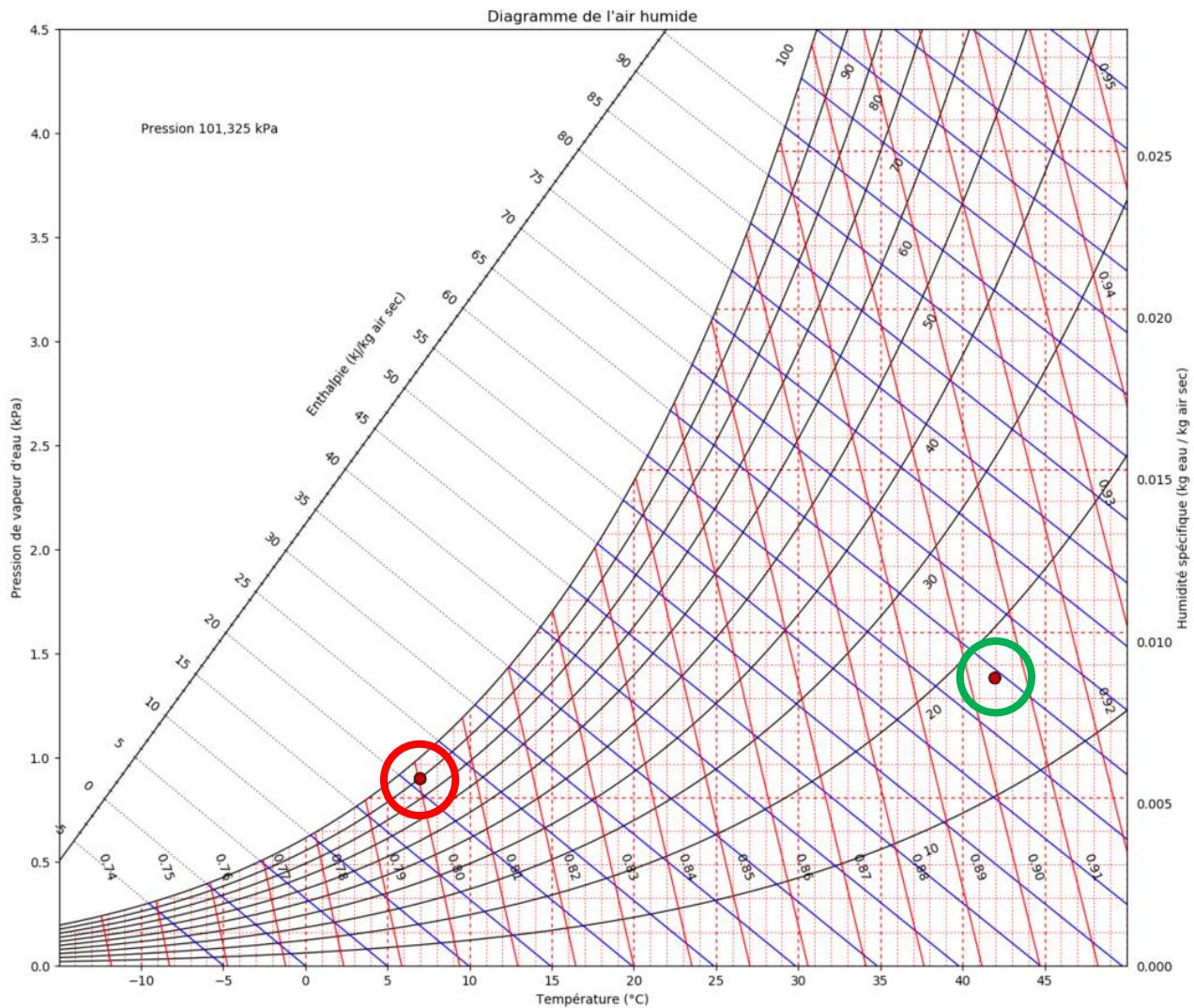


Figure B. 1 : Représentation des points extérieur (vert) et intérieur (rouge) sur le diagramme de l'air humide.

✚ 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**



FLUIDES FRIGORIGÈNES

DT-COM-10-V2

FICHE TECHNIQUE

R404A

FRAMA COLD 

Caractéristiques et applications

Le R-404A est un mélange ternaire composé par R-125, R143a et R-134a. Ces caractéristiques thermodynamiques lui définissent comme la substitute idéale du R-502 pour le secteur de la réfrigération des neuves installations pour basses et moyennes températures. Le R404A se caractérise pour sa notable stabilité chimique et de bas glissement de température (Glide) de 0,7 °C. Il est classé A1 group L1.

Sa principale application est dans les installations neuves pour basse et moyenne température.

Il existe aussi la possibilité de reconversion d'une installation de R-502 à R-404A, en éliminant le 95% d'huile minéral ou alkyl benzène original pour une huile de polyester. C'est nécessaire de changer le filtre de séchage (recommandable le tamis moléculaire XH9 et XH7), la soupape d'expansion pour une de R-404A, et surdimensionné le condenseur.

Le R-404A est un mélange de réfrigérants à base de HFC, lequel n'est pas compatibles avec les lubrifiants habituels qui travaillent avec le R-502. L'unique lubrifiant idéal pour utiliser avec le R-404A est l'huile de polyester.

Toxicité et emmagasinage

Le R-404A est très peu toxique inclus avec expositions prolongés de temps. L'AEL (Allowable Exposure Limit) est de 1.000 ppm (8 heures, TWA). Les emballages du R-404A doivent être dans lieux frais et ventilés loin des sources de chaleur. Dans le cas de fuite, les vapeurs du R-134a sont plus lourdes que l'air et ils s'accumulent généralement près le sol.

Composants

| Nom chimique | % en poids | N°. CE |
|------------------------------------|------------|-----------|
| 1,1,1,2-Tétrafluoroéthane (R-134a) | 4 | 212-377-0 |
| Pentafluoroéthane (R-125) | 44 | 206-557-8 |
| 1,1,1-Trifluoroéthane (R-143a) | 52 | 206-996-5 |

Propriétés physiques

| PROPRIÉTÉS PHYSIQUES | | R-404 A |
|--|----------------------|-----------|
| Poids moléculaire | (g/mol) | 97.61 |
| Température d'ébullition à 1,013 bar | (°C) | -46.45 |
| Glissement de température d'ébullition (à 1,013 bar) | (K) | 0.7 |
| Température critique | (°C) | 72.07 |
| Pression critique | (bar abs) | 37.31 |
| Densité critique | (Kg/m ³) | 484 |
| Densité du liquide (25 °C) | (Kg/m ³) | 1048 |
| Densité du liquide (-25 °C) | (Kg/m ³) | 1236 |
| Densité du vapeur saturé (à 1,013 bar) | (Kg/m ³) | 5.41 |
| Pression de vapeur (25 °C) | (bar abs) | 12.42 |
| Pression de vapeur (-25 °C) | (bar abs) | 2.49 |
| Chaleur latente de vaporisation (à 1,013 bar) | (KJ/Kg) | 200 |
| Chaleur spécifique du liquide à 25 °C et 1,013 bar | (KJ/Kg.K) | 1.64 |
| Chaleur spécifique du vapeur à 25 °C et 1,013 bar | (KJ/Kg.K) | 0.88 |
| Conductibilité thermique du liquide (25°C) | (W/mk) | 0.064 |
| Conductibilité thermique du vapeur (à 1,013 bar) | (W/mk) | 0.0143 |
| Solubilité dans l'eau (25°C) | (ppm) | Rejetable |
| Limite d'inflammabilité (25°C) | (% vol) | Aucune |
| Toxicité (AEL) | (ppm) | 1000 |
| ODP | - | 0 |
| GWP | - | 3922 |

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 | Pression (a) | Densité | Enthalpie | Entropie |
|-------|--|-------------|--------------|----------|-----------|-------------|
| | | [°C] | [bar] | [kg/m^3] | [kJ/kg] | [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 indus | 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.

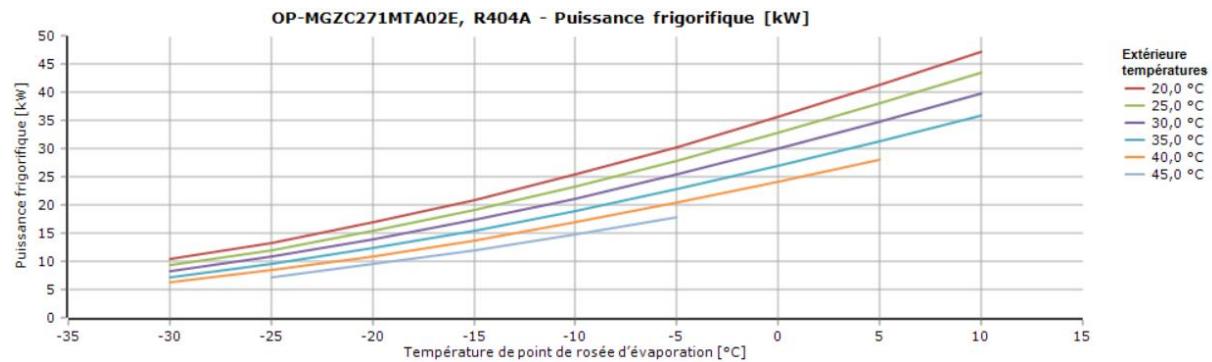


Figure B. 5 : Graphe de puissance frigorifique du groupe froid en fonction de la température extérieure.

Evaporateur

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

| Evaporateur ECO-LUVATA | |
|----------------------------|------------------------|
| Puissance | 7,94 kW |
| Débit d'air | 5000 m ³ /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 |
| Débit massique dans la conduite : | 284,8 kg/h |
| Température de point de rosée d'évap | -10,0 °C |
| Pression d'évaporation : | 4,342 bar |
| Température moyenne d'évaporation : | -10,2 °C |
| Surchauffe utile : | 8,0 K |
| Surchauffe additionnelle : | 0 K |
| Température de refoulement : | 78,0 °C |
| Puissance frigorifique : | 7,940 kW |
| Puissance calorifique : | 12,49 kW |
| Température de point de rosée de cond | 44,6 °C |
| Pression de condensation : | 20,27 bar |
| Sous-refroidissement : | 0 K |
| Sous-refroidissement additionnel : | 0 K |

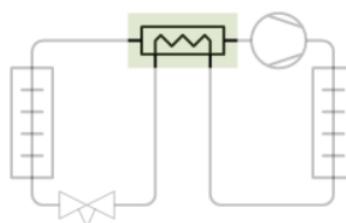


Figure B. 6 : Conditions de fonctionnement de l'évaporateur.

[Détendeur]

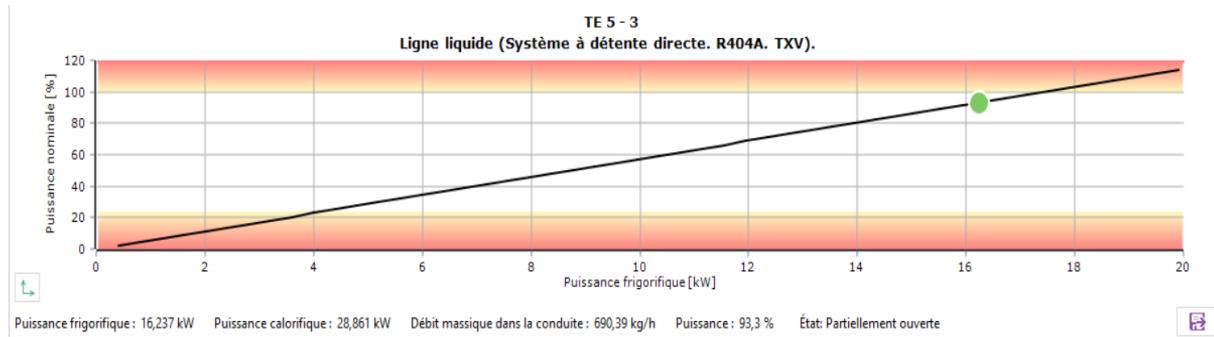


Figure B. 7 : Graphe du point de fonctionnement du détendeur TE5-3.

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 | | | | | | | | |
| 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 seriesfuse 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 ($\cos\phi = 1$) | | 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.