

ULB . png

RAPPORT

Pepper Challenge

Auteurs :

Avak AVEDISIAN

François DEJAEGERE

Younes EL MOKHTARI

Tanguy GUISSARD

Tristan MASQUELIER

Samuel NYSENHOLC

Lucas PRIEELS

Chef d'équipe :

Romain BORIAU

Superviseur :

Dimitri GILIS

2018-2019

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier notre chef de projet Romain Boriau, pour son aide et ses conseils ainsi que pour sa patience et le temps qu'il nous a consacré tout au long de ce travail.

Nous aimerions ensuite remercier l'Université Libre de Bruxelles ainsi que la Vrije Universiteit Brussel de nous avoir permis d'utiliser le FabLab du U-Square, ainsi que tous les encadrants présents sur place, toujours disponibles et prêts à nous aider.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers Dimitri Gilis, Benoit Haut, ainsi que Sam Dehaeck pour leur relecture de mi-parcours, leurs critiques et leur apport d'un point de vue extérieur qui nous a été bien utile pour la suite du projet.

Nous sommes aussi reconnaissants à certains de nos proches qui ont accepté de relire partiellement ou entièrement ce rapport en nous donnant leurs impressions et d'éventuelles corrections.

Enfin, nous tenons à remercier la cellule de Coopération au Développement de l'École Polytechnique de Bruxelles (CODEPO) ainsi que le Bureau d'Appui Pédagogique en Polytechnique (BAPP) sans qui ce projet n'aurait pas pu avoir lieu.

Résumé

Le rapport comporte 9855 mots, de l'introduction à la conclusion.

Au Cambodge, le séchage du poivre ne respecte pas les conditions d'hygiène nécessaires pour qu'il soit exporté en Europe. Afin de remédier à cela, ce projet présente le prototype d'un séchoir solaire hybride et indirect à bananes, dont le séchage est similaire au poivre. Nous présentons aussi un logiciel de dimensionnement de la surface et un plan d'un séchoir de terrain pouvant être installé au Cambodge dont les dimensions ont été estimées à l'aide du logiciel. Il est basé sur le principe d'effet de serre : l'air chaud entrant via un ventilateur installé à l'entrée est chauffé par les rayons du soleil et fait ensuite s'évaporer l'eau présente dans le produit. Il a été conçu de manière à fonctionner à une température d'environ 40°C et sans dépasser 20% d'humidité relative et a montré lors de tests ses capacités à sécher de manière hygiénique 500g de bananes en moins de 8h.

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 7 |
| 1.1 | Problématique du projet | 7 |
| 1.2 | L'avancement de notre projet | 7 |
| 1.3 | Plan du rapport | 8 |
| 2 | Différents types de séchoirs solaires | 9 |
| 2.1 | Caractéristiques des systèmes de séchage à énergie solaire | 9 |
| 2.1.1 | Séchoir direct | 9 |
| 2.1.2 | Séchoir indirect | 10 |
| 2.1.3 | Séchoir mixte | 10 |
| 3 | Description de notre séchoir solaire | 12 |
| 3.1 | Choix du type de séchoir | 12 |
| 3.2 | Construction du premier prototype | 13 |
| 3.3 | Améliorations apportées au deuxième prototype | 17 |
| 4 | Bilan scientifique et technique | 18 |
| 4.1 | Analyse système | 18 |
| 4.2 | Bloc environnement | 19 |
| 4.2.1 | Données connues et inconnues relatives au bloc environnement | 19 |
| 4.2.2 | Calcul de l'humidité absolue de l'air | 20 |
| 4.2.3 | Calcul du flux solaire direct | 21 |
| 4.2.4 | Calcul du flux solaire indirect | 21 |
| 4.3 | Bloc ventilation | 23 |
| 4.3.1 | Données connues et inconnues relatives au bloc ventilation | 23 |
| 4.3.2 | Hypothèse simplificatrice | 23 |
| 4.3.3 | Calcul du débit d'air | 24 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.4 | Bloc effet de serre | 26 |
| 4.4.1 | Effet de serre | 26 |
| 4.4.2 | Données connues et inconnues relatives au bloc effet de serre | 26 |
| 4.4.3 | Précisions | 26 |
| 4.4.4 | Hypothèses simplificatrices | 27 |
| 4.4.5 | Equations à disposition | 27 |
| 4.4.6 | Types de convection | 28 |
| 4.4.7 | Convection naturelle | 29 |
| 4.4.8 | Convection forcée | 30 |
| 4.4.9 | Choix du type de convection | 30 |
| 4.4.10 | Puissance totale | 30 |
| 4.4.11 | Résolution | 31 |
| 5 | Résultats des prototypes | 32 |
| 5.1 | Résultats du test du premier prototype | 32 |
| 5.2 | Résultats du premier test du prototype final | 33 |
| 5.3 | Résultats du test final du prototype final | 34 |
| 6 | Implantation de notre séchoir au Cambodge | 39 |
| 6.1 | Climat du Cambodge | 39 |
| 6.2 | Matériaux pour la construction du séchoir | 41 |
| 6.3 | Logiciel | 42 |
| 6.4 | Dimensionnement | 42 |
| 6.5 | Plan du séchoir de terrain | 42 |
| 7 | Fonctionnement de l'équipe | 44 |
| 7.1 | Forces | 44 |
| 7.2 | Faiblesses | 44 |
| 7.3 | Opportunités | 45 |
| 7.4 | Menaces | 46 |
| 7.5 | Tableau récapitulatif | 47 |
| 8 | Conclusion | 48 |
| 8.1 | Chronologie | 48 |
| 8.2 | Résumé | 48 |
| 8.3 | Perspectives | 49 |
| A | Logiciel Python | 50 |

| | | |
|----------|---------------------------|-----------|
| B | Logiciel FAOCLIM | 51 |
| C | Coût des matériaux | 52 |

Table des figures

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Séchoir direct | 10 |
| 2.2 | Séchoir indirect | 10 |
| 2.3 | Séchoir mixte | 11 |
| 3.1 | Plan du prototype | 13 |
| 3.2 | Construction de la zone de chauffe du séchoir | 14 |
| 3.3 | Construction de la zone de séchage du séchoir et du tiroir | 15 |
| 3.4 | Première version de notre prototype lors du test de séchage de mi-parcours | 16 |
| 3.5 | Deuxième version de notre prototype lors du test de séchage final et emplacement du potentiomètre | 17 |
| 4.1 | Schéma synthétique de l'analyse système | 19 |
| 4.2 | Phénomène d'effet de serre dans la zone de chauffage | 27 |
| 5.1 | Graphique de la température dans la zone de séchage en fonction du temps lors du premier test du prototype final. | 34 |
| 5.2 | Graphique de l'humidité relative à la sortie du séchoir en fonction du temps lors du premier test du prototype final | 35 |
| 5.3 | Graphique de l'humidité relative à la sortie du séchoir en fonction du temps lors du test final | 36 |
| 5.4 | Graphique de la température à la sortie du séchoir en fonction du temps lors du test final | 37 |
| 6.1 | Évolution de la température moyenne mensuelle maximale et minimale en fonction du temps dans la région de Kampot au Cambodge | 40 |
| 6.2 | Évolution des précipitations moyennes mensuelles en fonction du temps dans la région de Kampot au Cambodge | 40 |
| 6.3 | Évolution des heures de clarté mensuelles en fonction du temps dans la région de Kampot au Cambodge | 40 |

| | | |
|-----|--|----|
| 6.4 | Évolution de l'humidité relative moyenne mensuelle en fonction du temps dans la région de Kampot au Cambodge | 41 |
| 6.5 | Plan du séchoir de terrain | 43 |
| 6.6 | Zone de séchage | 43 |
| 6.7 | Zone de chauffe | 43 |
| B.1 | Démonstration de l'utilisation du logiciel FAOCLIM pour Kampot | 51 |
| B.2 | Données fournies par le logiciel FAOCLIM pour Kampot | 51 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Données connues relatives au bloc environnement | 19 |
| 4.2 | Données inconnues relatives au bloc environnement | 20 |
| 4.3 | Données connues relatives au bloc ventilation | 23 |
| 4.4 | Donnée inconnue relative au bloc ventilation | 23 |
| 4.5 | Données connues relatives au bloc effet de serre | 26 |
| 4.6 | Donnée inconnue relative au bloc effet de serre | 26 |
| 5.1 | Résultats des tests du premier prototype | 32 |
| 5.2 | Résultats des tests de notre prototype final | 33 |
| 5.3 | Résultats du test final | 38 |
| 6.1 | Modifications du cahier de charges entre les tests et le Cambodge | 42 |
| 7.1 | Tableau récapitulatif SWOT | 47 |

Introduction

1.1 Problématique du projet

Le Cambodge est un petit pays asiatique qui a depuis toujours cultivé un poivre réputé pour sa qualité et son goût, le poivre de Kampot. Le pays n'a pas les fonds et l'hygiène nécessaires pour sécher son poivre lui-même, et doit donc l'exporter au Vietnam. Les producteurs cambodgiens y perdent alors beaucoup car le prix du poivre sec est bien plus important que le prix du poivre humide. **[problématique]**

C'est pourquoi il nous a été demandé de créer un séchoir solaire à poivre, qui pourrait aider financièrement les agriculteurs de ce pays. Notre séchoir se doit d'être robuste, efficace et pratique. Pour ce faire, nous avons été répartis dans des groupes avec un chef de projet. Notre tâche principale consiste à construire un premier prototype de séchoir, dont les performances seront testées, ce qui nous sera très utile pour gagner de l'expérience sur le séchage, dans l'optique d'imaginer un plan d'un séchoir dit "de terrain" qui pourrait être construit et installé au Cambodge. Afin de nous aider dans cette tâche, il nous est également demandé de coder un logiciel de dimensionnement en Python. Celui-ci devra utiliser un cahier des charges particulier pour nous donner une estimation des dimensions nécessaires à valider ces demandes. Un espace de travail, le fablab du U-Square, est également mis à notre disposition pour nous aider dans la construction du prototype, tout en mettant à disposition du matériel et une zone de test où nous pouvons tester les capacités de notre séchoir.

1.2 L'avancement de notre projet

Notre projet consiste donc en un séchoir à poivre qui permettrait aux Cambodgiens de s'occuper de leur poivre du début à la fin, leur rendant ainsi la possibilité d'exporter eux-mêmes leur produit fini. Néanmoins, il est difficile de copier les conditions cambodgiennes en Belgique, c'est pourquoi nous travaillerons sur un séchoir à bananes, dont les caractéristiques de séchage sont similaires à celles du poivre, pour s'assurer de la qualité de notre prototype. Les prototypes sur lesquels nous serons évalués

ont été adaptés aux conditions belges, c'est-à-dire que les données utilisées lors des tests sont donc différentes de celles rencontrées au Cambodge. Il nous suffira juste de remplacer ces données dans notre code Python pour pouvoir redimensionner le séchoir de poivre final.

Par manque de temps, nous avons été obligés de construire un premier prototype sans avoir les dimensions idéales car elles représentent l'aboutissement de nos recherches théoriques. Nous avons donc initialement maximisé la surface de notre séchoir car nous préférons avoir une température trop élevée que trop faible. En effet, nous avions prévu que nous pouvions régler ce problème en modifiant le débit d'air par la suite ou éventuellement en recouvrant une partie de la serre qui, comme nous le verrons en détail par la suite, permet de capter l'énergie solaire.

En parallèle avec la confection du séchoir, des recherches théoriques ont été menées sur le séchage et le fonctionnement du prototype. Nous avons décidé de diviser la problématique en trois parties, appelées blocs : le bloc environnement, le bloc ventilation et le bloc effet de serre.

Nous avons eu l'occasion de faire un test de notre prototype à la mi-parcours, qui a eu lieu le 11 décembre 2018. Il nous a permis de découvrir quels étaient les points forts et les points faibles de notre séchoir et de vérifier si nos analyses théoriques étaient cohérentes. Nous avons alors pu retourner au Fablab pour apporter les modifications nécessaires à notre séchoir, avant les tests finaux.

1.3 Plan du rapport

Dans ce rapport, dont le but est de communiquer nos résultats d'une manière aussi claire et précise que possible. Nous avons choisi de suivre un ordre à peu près chronologique, de manière à communiquer correctement notre cheminement. Nous allons donc tout d'abord présenter différents types de séchoirs solaires et expliquer leurs avantages et inconvénients. Ensuite, nous allons décrire la manière dont nous avons construit notre prototype. Après cela, nous passerons à la partie théorique et aux différents blocs du logiciel. Les résultats de notre prototype final suivront alors tout naturellement, suivis par notre travail sur les plans et l'implantation de notre séchoir de terrain au Cambodge. Finalement, nous présenterons le fonctionnement de notre équipe tout au long de l'année, ainsi que notre conclusion sur ce travail de longue haleine.

Différents types de séchoirs solaires

2.1 Caractéristiques des systèmes de séchage à énergie solaire

Dans son article “Review of solar-energy drying systems II : an overview of solar drying technology”, O.V Ekechukwu [ekechukwu] classe les séchoirs en deux catégories :

- Passifs (à convection naturelle), pour lesquels la convection d’air se fait suite à un changement naturel de densité du fluide (exemple : lorsque l’air chauffe, il perd de sa densité et monte, remplacé par un air plus froid (et donc de plus grande densité))
- Actifs (à convection forcée), pour lesquels la convection d’air se fait même si le fluide ne change pas de densité (par exemple un ventilateur qui va provoquer le déplacement de l’air sans que celui-ci ne change de densité.) Un fluide dont la convection se ferait de manière forcée et naturelle en même temps sera considéré comme forcé si, dans le cas où la cause de la convection forcée s’arrête, la convection naturelle n’est plus suffisante pour continuer le chauffage.

Ces deux types de séchoirs peuvent également être catégorisés :

- Direct : les rayons du soleil sont en contact direct avec les ingrédients
- Indirect : les rayons du soleil sont récoltés par un corps noir (surface absorbant toutes les radiations électromagnétiques qui lui sont soumises [corpsnoir]) . La chaleur est ensuite transmise au reste du cabinet de séchage.
- Mixte : les rayons du soleil sont récoltés par un corps noir en plus d’être en contact direct avec les ingrédients. [ekechukwu]

2.1.1 Séchoir direct

Un exemple représentatif de séchoir direct serait le séchoir à effet de serre dans lequel les ingrédients sont placés dans une serre couverte d’une protection transparente. Cette protection permet au produit d’être protégé des intempéries tout en diminuant la perte de chaleur. L’exposition continue du produit au soleil additionnée à l’effet de serre provoqué par la structure permet au produit de sécher.

Avantages :

- Peu coûteux par rapport aux autres types de séchoirs
- Construction et entretien aisé

Désavantages :

- En étant exposé au soleil, le produit pourrait perdre en qualité
- Le temps requis pour sécher les ingrédients est plus élevé que pour un séchoir indirect ou mixte.

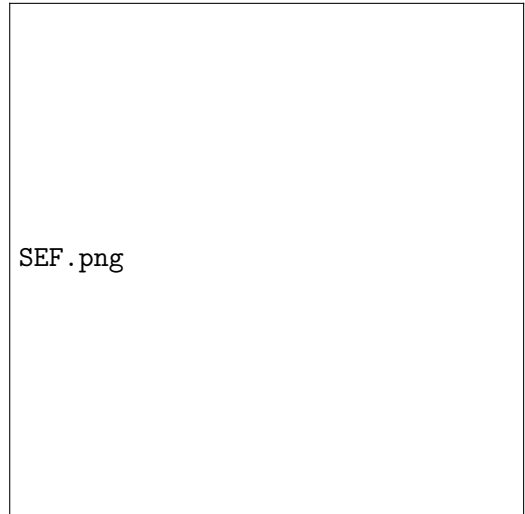


FIGURE 2.1 – Séchoir direct [ekchukwu]

2.1.2 Séchoir indirect

Un exemple représentatif du séchoir indirect serait le séchoir à tiroirs dans lequel les ingrédients sont placés sur différents tiroirs les uns aux dessus des autres dans une structure protégée des rayons du soleil. Une autre structure affublée d'un collecteur solaire (corps noir) est en contact avec la première structure. L'augmentation de la température due au collecteur solaire permet de sécher le produit.

Avantage :

- La qualité du produit est préservée car celui-ci n'entre pas en contact avec les rayons du soleil
- La vitesse de séchage est plus élevée que celle d'un séchoir direct

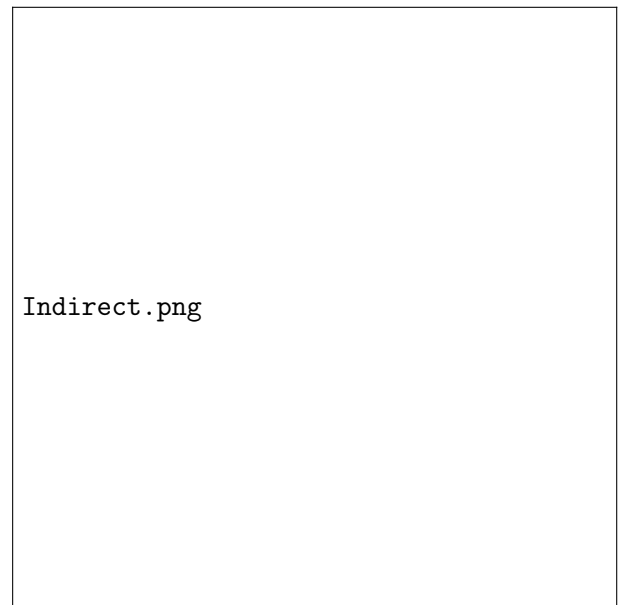


FIGURE 2.2 – Séchoir indirect [ekchukwu]

Désavantages :

- Le coût de construction est plus élevé que celui d'un séchoir direct
- La construction et l'entretien sont plus difficiles que pour un séchoir direct.

2.1.3 Séchoir mixte

Le séchoir à tiroirs vu précédemment comme exemple pour le séchoir indirect peut aussi être, à quelques changements près, utilisé comme séchoir mixte. Il suffit par exemple d'utiliser un matériau transparent pour la structure dans laquelle sèchent les ingrédients. La température intérieure du séchoir augmentera donc grâce à l'exposition au soleil en plus de celle provoquée par les capteurs solaires.

Avantages :

- Vitesse de séchage la plus élevée des trois types.

Désavantages :

- Qualité du produit plus faible que le séchage indirect, dû à l'exposition des ingrédients au soleil.
- Le coût de construction est plus élevé qu'un séchoir direct
- La construction et l'entretien sont plus difficiles qu'un séchoir direct.

SET.png

FIGURE 2.3 – Séchoir indirect [ekehukwu]

Description de notre séchoir solaire

3.1 Choix du type de séchoir

Il nous était imposé de construire un séchoir solaire basé sur le principe de l'effet de serre. Celui-ci sera détaillé plus tard dans ce rapport. En prenant en compte les avantages et inconvénients de chaque type de séchoir, nous avons opté pour le séchage indirect [**dadda**]. En effet, l'importance que nous accordions à la qualité du produit séché et au temps de séchage surpassait largement celle que nous accordions à la simplicité et au coût. Nous avons également éliminé le séchage mixte puisque même si la vitesse de séchage d'un séchoir indirect était moindre, celle-ci restait suffisante alors que la qualité du produit fini nous semblait ainsi supérieure, à la fois au niveau de l'aspect, de la couleur mais aussi du goût. Malgré cela, ce choix rend la construction ainsi que le déplacement du séchoir une fois fini plus complexe puisqu'il est nécessaire d'augmenter sa taille pour pouvoir le séparer en deux parties distinctes.

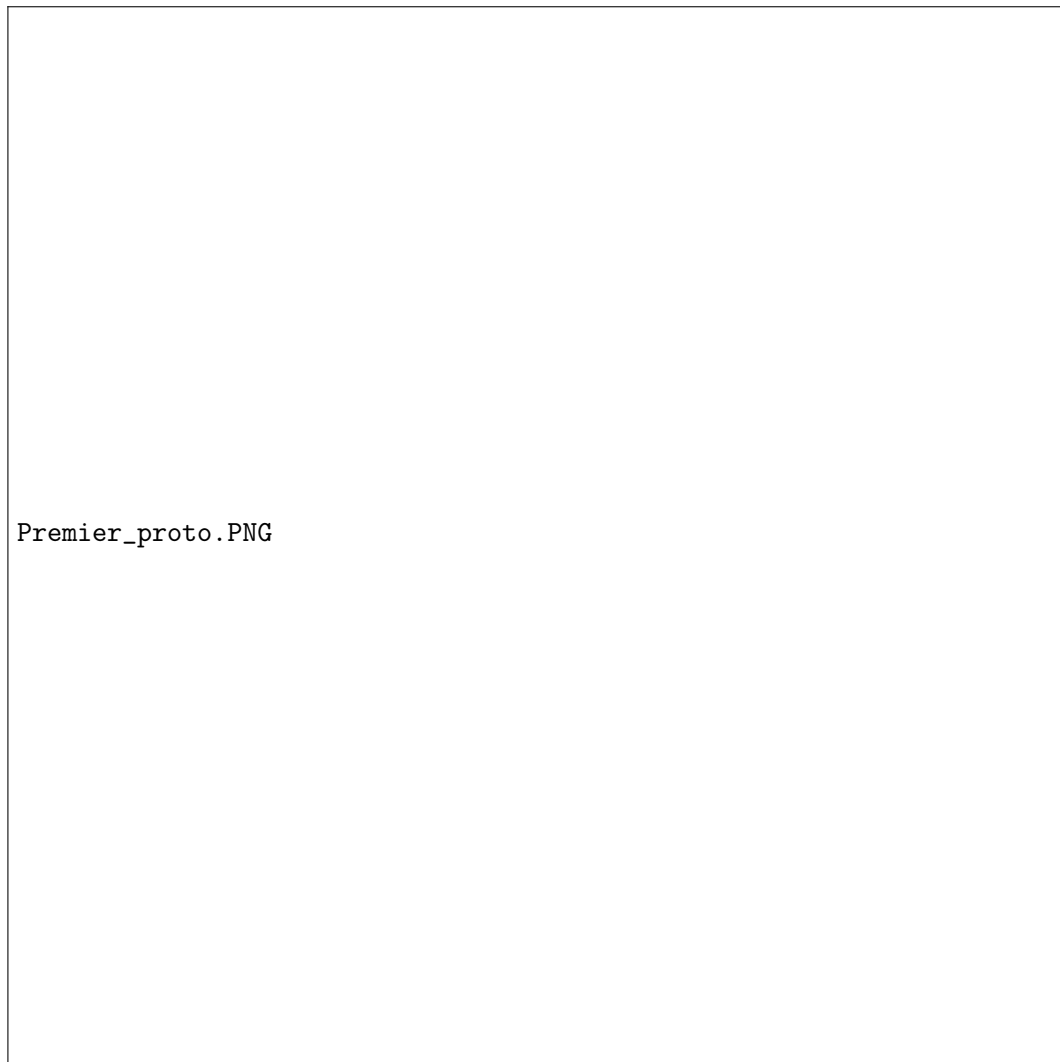


FIGURE 3.1 – Plan du prototype

3.2 Construction du premier prototype

Comme pour tout séchoir indirect, nous avons décidé de le diviser en deux zones, comme nous pouvons le voir si la figure 3.1 : la zone de chauffe, où un ventilateur placé à l'entrée accélère l'air, qui est simultanément chauffé grâce aux rayons du soleil et au contact des parois chaudes, comme nous pouvons le voir sur la figure 3.2. Le fond est dans cette partie recouvert de peinture noire afin d'améliorer le captage de l'énergie solaire et la paroi supérieure est composée d'une plaque de plexiglas pour laisser passer les rayons du soleil. Cette section est aussi en pente afin de profiter au mieux de la convection naturelle. L'air, une fois chauffé, passe ensuite dans la deuxième partie du séchoir : la zone de séchage. C'est donc là que le produit encore humide se trouve, et l'air chaud va venir le réchauffer et le sécher. Cette zone est protégée des rayons du soleil directs par une planche en bois placée au-dessus. Finalement, l'air chaud s'échappe par des fentes recouvertes de petites bâches en plastique afin de protéger l'intérieur de la pluie et des éléments extérieurs.



FIGURE 3.2 – Construction de la zone de chauffe du séchoir

Le produit est, dans la première version de notre prototype, placé sur un tiroir afin de faciliter son extraction, comme nous pouvons le voir sur la figure 3.3. Cela permet effectivement d’ajouter toutes les bananes en une fois, mais surtout de pouvoir tirer le tiroir pour pouvoir vérifier si tout se passe bien et s’il est nécessaire de faire varier le débit d’air sans perdre toute la chaleur accumulée. Une fois le séchage terminé, il est également très simple et rapide de retirer le produit et il suffit de retourner le tiroir pour tout récupérer dans un nouveau récipient. Ce tiroir est composé de plusieurs planches de bois formant le cadre et d’une moustiquaire dense pour permettre à l’air de passer entre les bananes afin de tout chauffer uniformément et de faciliter son nettoyage. Un autre avantage d’utiliser un tiroir était que nous pouvions assez facilement agrandir le séchoir en hauteur en ajoutant un deuxième tiroir sans devoir reconstruire un nouveau prototype s’il s’avérait que nous n’avions pas assez de place pour toutes les bananes, tout en permettant de minimiser la surface au sol utilisée.



FIGURE 3.3 – Construction de la zone de séchage du séchoir et du tiroir

Nous avons particulièrement prêté attention à la protection de l'intérieur du séchoir des éléments extérieurs. Comme dit précédemment, nous avons donc entièrement fermé le séchoir. Nous avons aussi choisi de surélever l'entièreté pour être certains que l'eau ne puisse pas entrer en contact avec le produit, même en cas d'averses très importantes comme il peut y en avoir au Cambodge. Nous pouvons voir une photo du premier test de mi-parcours de notre séchoir sur la figure 3.4.

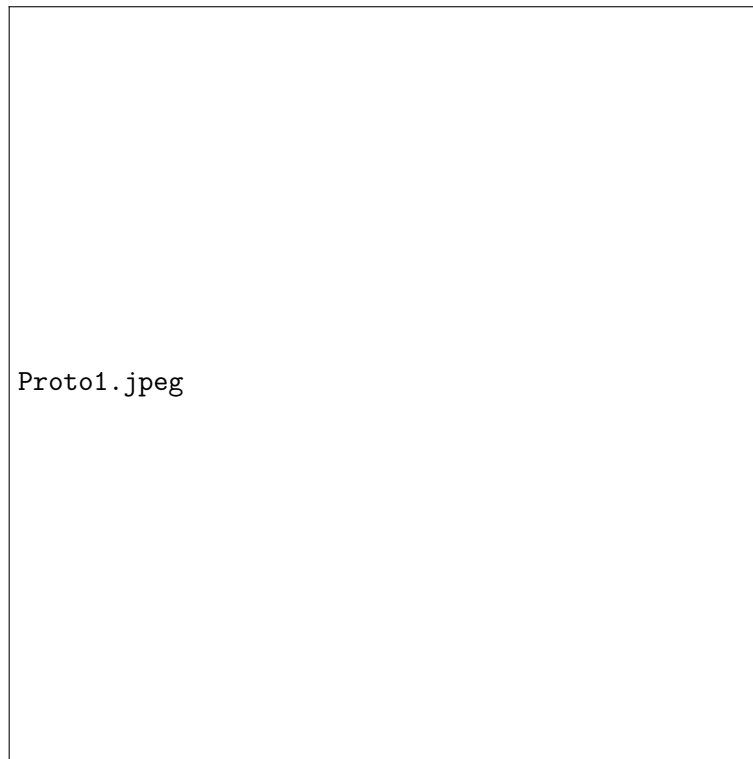


FIGURE 3.4 – Première version de notre prototype lors du test de séchage de mi-parcours

Le séchoir pour lequel nous avons opté est aussi hybride. Cela signifie qu'il bénéficie principalement de la convection naturelle, mais en utilisant une source d'énergie extérieure [**dudez**]. Dans notre cas, il s'agit du ventilateur qui est alimenté par un panneau solaire et dont la tension peut être choisie grâce à un potentiomètre. Malgré ce ventilateur, la convection naturelle reste dominante, comme cela sera démontré par la suite. Nous avons choisi cette solution parce que le ventilateur permet de rendre le débit variable en fonction de nos besoins en température ou en temps de séchage. De plus, cela améliore la circulation de l'air, donc la capacité d'évaporation et rend en conséquence le séchage plus rapide. L'inconvénient de cette solution est qu'il est nécessaire de disposer d'une source d'énergie extérieure, ce qui n'est pas possible si le temps n'est pas assez bon pour permettre le fonctionnement de panneaux solaires.

Lors de la construction de la première version de notre prototype, nous avons ajouté une charnière entre les deux zones du séchoir. Celle-ci permettait de replier le séchoir en deux afin de faciliter le rangement et le déplacement. De plus, le nettoyage et l'entretien de l'intérieur du séchoir nous semblaient ainsi plus faciles. Malheureusement, il s'est avéré que la charnière se déformait à cause du poids du séchoir, ouvrant ainsi un trou béant dans la séparation des deux zones, ce qui n'était pas acceptable. Nous avons donc abandonné l'idée mais il est quand même possible de l'ouvrir en retirant seulement quelques vis.

3.3 Améliorations apportées au deuxième prototype

La première version de notre prototype possédait ainsi uniquement un tiroir, ce qui était suffisant pour sécher 250g de bananes, ce qui nous paraissait être une bonne quantité pour un premier test. Comme nous avons eu des résultats très prometteurs, surtout au niveau de la puissance pratique de notre séchoir, nous avons décidé de ne pas reconstruire entièrement un deuxième prototype mais d'améliorer celui que nous avons déjà réalisé pour le test final avec 500g de bananes afin de vérifier le cahier des charges. Cela permettait ainsi une économie de temps et de ressources non négligeable. Nous avons donc convenu que nous allions ajouter un deuxième tiroir pour sécher une plus grande quantité de bananes. Nous avons également fait quelques aménagements mineurs afin de pouvoir fixer le potentiomètre contrôlant le débit du ventilateur au reste du séchoir et ne pas risquer de débrancher des câbles. Finalement, pu rentrer entièrement le capteur d'humidité relative, ce qui n'avait pas été prévu pour le premier prototype, en enlevant les planches de bois présentes à la sortie et en les remplaçant par une seule bâche en plastique recouvrant tout l'arrière. Nous pouvons voir la version finale de notre prototype ainsi que l'emplacement du potentiomètre sur la figure 3.5.



FIGURE 3.5 – Deuxième version de notre prototype lors du test de séchage final et emplacement du potentiomètre

Bilan scientifique et technique

4.1 Analyse système

Lors de nos premières réflexions sur le séchoir que nous devons concevoir et à l'aide d'indications fournies par les professeurs responsables du projet, nous avons identifié trois aspects différents liés à la technique de séchage utilisée. Ces trois aspects (que nous appellerons également blocs) ont été trouvés suite à une réflexion sur le fonctionnement concret du séchoir. Nous avons ainsi pu identifier les blocs “ventilation”, “effet de serre” et “environnement”. Nous avons effectivement constaté que nous pouvions partager toute l'analyse théorique en ces trois parties principales.

Tout d'abord, les éléments liés au milieu dans lequel notre séchoir va opérer déterminent les entrées du bloc “Environnement”. Nous pouvons aisément se convaincre du fait que la température ou l'humidité relative vont influencer l'efficacité du séchage, mais il y a également d'autres paramètres qui rentrent en compte et qui sont décrits à la section concernant ce bloc.

Nous sommes également arrivés à la conclusion que la ventilation au sein de notre séchoir, assurée par le ventilateur placé à l'entrée de notre zone de chauffage, jouerait un rôle indéniable dans le séchage de nos aliments. En effet, le débit d'air, que nous pouvons déterminer afin d'obtenir un séchage optimal, dépend de différents paramètres. Tout ceci est expliqué plus en profondeur à la section dédiée au bloc ventilation.

L'effet de serre au sein de la partie chauffante du séchoir joue bien évidemment également un rôle important. Nous avons donc pour cela dû trouver une façon de quantifier ces effets à partir de différents paramètres, parmi lesquels certains trouvés dans le bloc environnement. Ce bloc nous permet d'estimer la surface au sol nécessaire, afin d'obtenir un séchoir assez puissant pour remplir le cahier des charges. Les raisonnements liés à l'effet de serre qui nous ont mené à ce résultat sont repris dans la section concernée.

Au vu de la complexité des équations que nous avons obtenues, nous avons décidé en accord avec les consignes du projet, de réaliser un logiciel informatique écrit en Python. Celui-ci permet à la fois d'être sûr de ne pas faire d'erreurs, mais aussi de pouvoir modifier les données relatives au séchage afin de pouvoir calculer la surface d'un séchoir ayant des caractéristiques différentes très rapidement. L'explication du fonctionnement précis de ce logiciel nous paraissant rébarbatif et non des plus importants, nous avons décidé de ne pas nous attarder dessus, mais le logiciel se trouve en entier et commenté dans l'annexe A.

Un schéma synthétique de l'analyse système reprenant les symboles définis dans les pages suivantes se trouve à la figure 4.1.

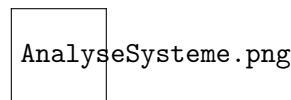


FIGURE 4.1 – Schéma synthétique de l'analyse système

4.2 Bloc environnement

Pour ce premier bloc, nous sommes partis de la réflexion que notre séchoir n'allait pas forcément avoir la même efficacité dans un pays humide ou sec. En effet, l'environnement dans lequel se trouve ce dernier influencera la capacité de notre séchoir à sécher plus ou moins rapidement. Et ce que nous allons déterminer dans ce bloc, ce sont ces différents paramètres tel que le flux solaire direct, c'est-à-dire provenant directement du soleil et indirect, énergie solaire réémise par l'atmosphère, ainsi que l'humidité absolue. Évidemment, pour pouvoir déterminer ces inconnues, nous aurons besoin des données environnementales qui caractérisent le contexte local dans lequel nous travaillons telles que la température ambiante, l'humidité, l'énergie solaire et la pression. Nous avons également un cahier de charges à respecter pour notre prototype qui nous renseigne des données supplémentaires comme le temps de séchage, l'humidité relative à la sortie de notre séchoir et l'énergie captée par ce dernier.

4.2.1 Données connues et inconnues relatives au bloc environnement

Pour le bloc environnement, les différents données connues suivantes sont à prendre en considération :

| Grandeurs | Symboles | Unités | Provenances des valeurs |
|----------------------------|-----------|-------------|--|
| Température ambiante | T | K | Climat - Logiciel FAOCLIM |
| Énergie solaire reçue | ES | $MJ.m^{-2}$ | Climat - Logiciel FAOCLIM/Cahier des charges |
| Température maximale | T_{max} | K | Cahier des charges |
| Humidité relative entrante | HR | % | Climat - Logiciel FAOCLIM |
| Humidité relative sortante | HR | % | Cahier des charges |

TABLE 4.1 – Données connues relatives au bloc environnement

Notez que nous utilisons le même symbole pour les humidités entrantes et sortantes car nous allons utiliser exactement les mêmes développements dans les deux cas. Le logiciel FAOCLIM est un logiciel qui nous a permis de trouver des données climatiques sur le Cambodge (voir l'annexe B pour plus de détails). A partir de ces données que nous fournirons au bloc environnement du programme, nous déterminerons les inconnues suivantes qui nous serviront pour le dimensionnement de notre séchoir solaire :

| Grandeurs | Symboles | Unités |
|---------------------------|----------|-----------------------|
| Humidité absolue entrante | Y | (kg eau)/(kg air sec) |
| Humidité absolue sortante | Y | (kg eau)/(kg air sec) |
| Flux solaire direct | F_d | $W.m^{-2}$ |
| Flux solaire indirect | F_i | $W.m^{-2}$ |

TABLE 4.2 – Données inconnues relatives au bloc environnement

4.2.2 Calcul de l'humidité absolue de l'air

Pour simplifier les calculs qui vont suivre, nous considérons l'air comme un mélange de gaz parfaits et nous travaillerons à volume et température constants, ce qui nous permettra d'utiliser la loi des gaz parfaits afin de pouvoir exprimer le tout par un rapport de pression. L'humidité absolue (Y) correspond par définition à la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air divisée par la masse d'air sec :

$$Y = \frac{m_{va}}{m_{airsec}} = \frac{n_{va}}{n_{airsec}} \frac{M_{va}}{M_{airsec}} = \frac{P_{va} \cancel{V}}{\cancel{RT}} \frac{RT}{P_{airsec} \cancel{V}} \frac{M_{va}}{M_{airsec}} = \frac{M_{va}}{M_{airsec}} \frac{P_{va}}{P_{airsec}} \quad (4.1)$$

Où P_{va} est la pression de vapeur, c'est-à-dire la pression exercée par la vapeur contenue dans l'air, et P_{airsec} est la pression exercée par l'air sec. Par ailleurs, nous obtenons la pression d'air sec en fonction de celle de l'air et de l'eau par la loi de Dalton [gilis] :

$$P_{atm} = P_{airsec} + P_{va} \Leftrightarrow P_{airsec} = P_{atm} - P_{va} \quad (4.2)$$

Enfin, définissons l'humidité relative HR comme étant le rapport de la pression de vapeur d'eau et la pression de saturation de l'eau, qui est la valeur maximale de la pression de vapeur atteignable pour une certaine température [haut] :

$$HR = \frac{P_{va}}{P_{sat}(T)} \Leftrightarrow P_{va} = HR \cdot P_{sat}(T) \quad (4.3)$$

En remplaçant P_{va} et P_{airsec} dans l'équation (4.1) par ce que nous obtenons aux équations (4.2) et (4.3) et en simplifiant :

$$Y = 0,620 \frac{HR \cdot P_{sat}(T)}{(P_{atm} - HR \cdot P_{sat}(T))} \quad (4.4)$$

où le facteur « 0,620 » provient de la division de la masse molaire de l'eau (0.018 kg eau/mol) par la masse molaire de l'air (0.029 kg air/mol). La pression atmosphérique P_{atm} peut être fixée 101325 Pa.

Il ne reste plus qu'à définir, selon l'équation de Clapeyron [**haut**], la pression saturante de l'eau P_{sat} :

$$P_{sat}(T) = P_{sat}(T_0).e^{(-\frac{\lambda}{R_g}(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}))} \quad (4.5)$$

où $P_{sat}(T_0)$ est la pression de saturation de l'eau à $T_0 = 333,15$ K, qui vaut $1,99.10^4$ Pascals [**PressionSaturante**], λ est la chaleur latente molaire de la vaporisation de l'eau qui vaut 42440 J/mol et R provient de l'équation des gaz parfaits avec comme valeur 8,314 J/mol K.

4.2.3 Calcul du flux solaire direct

Le flux solaire direct correspond à l'énergie du rayonnement solaire direct émis par le soleil sur la surface de la terre, le corps noir dans notre cas, et comporte une petite longueur d'onde (entre 400 nm et 700 nm) [**jannot**]. La position du soleil varie en fonction de la journée ce qui implique que le flux direct dépendra de l'angle d'incidence sur la surface du séchoir mais aussi de l'instant du rayonnement. Il faudra également prendre en compte le temps d'exposition. Cependant, la simplification de l'expression sera réalisée sans tenir compte de l'inclinaison par rapport au soleil, étant donné qu'il se trouve presque perpendiculaire au sol aux latitudes du Cambodge, et de son intensité de sorte qu'on obtienne un flux direct moyen. En équation mathématique, cela donne :

$$F_d = \frac{ES}{t_c} - F_i \quad (4.6)$$

où ES est le flux solaire total (direct+indirect) capté par le séchoir pendant un jour en MJ/m^2 , F_i le flux solaire indirect calculé ci-dessous et t_c est le temps de clarté en secondes.

4.2.4 Calcul du flux solaire indirect

Le flux indirect est similaire au flux direct, mais avec une plus grande longueur d'onde et est absorbé dans un premier temps par l'atmosphère pour être ensuite réémis vers la surface de la Terre en rayonnement infrarouge de longueur d'onde entre 800 et 1400 nm [**jannot**]. Pour calculer ce flux indirect, faisons appel à l'équation de Stefan-Boltzmann [**brouche**] :

$$F_i = \epsilon \sigma T_{ciel}^4 \quad (4.7)$$

où σ est la constante de Boltzmann et qui vaut $5,6704.10^{-8} W.m^{-2}.K^4$ et T_{ciel} est la température de l'atmosphère. L'émissivité ϵ désigne quant à elle la capacité d'un matériau à dissiper de l'énergie par rayonnement radiatif mais nous supposons ici que notre matériau est un corps noir, et dans ce

cas $\epsilon=1$. Un corps noir est une surface qui absorbe toute l'énergie radiatif qu'elle reçoit et renvoie l'ensemble en rayonnement thermique [**corpsnoir**]. Il est possible d'estimer T_{ciel} en fonction du temps t après minuit en secondes, de la température de l'air T_a en kelvin et celle de rosée T_r en °C, qui est la température où l'eau contenue dans l'air commence à se condenser [**FuturaSciences**], le tout donnera T_{ciel} en kelvin [**lienhard**] :

$$T_{ciel} = T_a(0,711 + 0,0056T_r + 7,3 \cdot 10^{-5}T_r^2 + 0,013 \cos \frac{2\pi t}{24})^{\frac{1}{4}} \quad (4.8)$$

Température de rosée

La température de rosée T_r correspond aussi à la température à laquelle la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air est égale à la pression de saturation en eau de l'air. Nous avons donc trouvé une équation pour déterminer T_r , qui utilise la chaleur latente de vaporisation de l'eau λ [**lienhard**] :

$$T_r = \frac{\lambda T}{\lambda - RT \ln HR} \quad (4.9)$$

4.3 Bloc ventilation

Afin que notre séchoir fonctionne efficacement, le débit d'air au sein de celui-ci doit pouvoir être contrôlé. Cette partie du rapport explique donc de quelle façon nous pouvons déterminer ce débit d'air (qui nous sera par ailleurs utile dans le bloc « effet de serre »). Nous expliquons également quelles simplifications sont faites dans nos formules pour y parvenir, et donc comment nous pourrions améliorer l'exactitude de notre programme visant à déterminer ce débit d'air.

4.3.1 Données connues et inconnues relatives au bloc ventilation

Nous disposons, soit à l'aide du cahier des charges, soit à l'aide de mesures, des données suivantes :

| Grandeurs | Symboles | Unités | Provenances des valeurs |
|--|----------------|--|-------------------------|
| Temps de séchage | t | h | Cahier des charges |
| Humidité absolue à l'entrée et sortie | Y_e et Y_s | $\frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg d'air}}$ | Mesures |
| Humidité du produit initiale et finale | h_i et h_f | $\frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg de matière sèche}}$ | Cahier des charges |
| Masse de produit | m | kg | Cahier de charges |

TABLE 4.3 – Données connues relatives au bloc ventilation

Ces différentes données nous permettent d'obtenir grâce aux calculs détaillés plus loin les inconnues suivantes :

| Grandeurs | Symboles | Unités |
|-----------------------|-----------|-------------|
| Débit d'air | Q | kg d'air/ s |
| Vitesse d'évaporation | Q_{tee} | kg d'eau/ s |

TABLE 4.4 – Donnée inconnue relative au bloc ventilation

4.3.2 Hypothèse simplificatrice

Lors de nos calculs, nous considérerons la masse de l'eau évaporée par unité de temps comme constante. Nous sommes cependant conscients du fait que ceci n'est pas le cas en réalité. En effet, le séchage d'un objet dépend de différents paramètres, tels que notamment sa forme.

Nous savons que le poivre à sécher est de forme sphérique. Ceci nous indique donc que la masse de l'eau évaporée par unité de temps diminue avec le temps. Ceci fait référence au « modèle du cœur rétrécissant » [haut], qui nous explique que lors du séchage, l'eau va se concentrer au sein d'un cœur humide. Celui-ci sera entouré par une couche sèche poreuse que l'eau contenue dans le cœur humide devra traverser lors du séchage. Nous ne rentrerons pas plus dans les détails afin de ne pas trop complexifier les équations.

4.3.3 Calcul du débit d'air

Calculons tout d'abord la masse de matière sèche du produit. Comme nous connaissons l'humidité initiale du produit ainsi que sa masse initiale, il est très simple de la calculer. En effet, il suffit de remarquer que comme il y'a h_i kg d'eau par kg de matière sèche, il y'a $h_i + 1$ kg de produit initial pour chaque kg de masse sèche, donc, si Mms est la masse de matière sèche :

$$Mms = \frac{m}{h_i + 1} \quad (4.10)$$

Afin de faciliter la lisibilité des calculs, nous poserons la masse d'eau évaporée par seconde comme $Qtee$. Comme dit précédemment, celle-ci est considérée constante, nous pouvons donc lui donner une valeur.

Nous obtenons donc que :

$$Qtee = (h_i - h_f) \frac{Mms}{t} \quad (4.11)$$

En effet, en faisant un bilan matière sur l'eau sur notre système, nous constatons que l'eau qui doit sortir sous forme de vapeur de notre séchoir correspond à l'humidité initiale (du produit) moins l'humidité finale (du produit), multiplié par la masse de matière sèche totale du produit.

Afin d'obtenir la quantité d'eau évaporée par unité de temps, que nous recherchons pour calculer notre débit d'air, il suffit de diviser la quantité d'eau obtenue avec le bilan sur l'eau par la durée de séchage.

La durée de séchage étant exprimée en heures, notre $Qtee$ sera exprimée en kg d'eau / h. Il suffit bien évidemment de ramener le temps de séchage en secondes afin d'obtenir une $Qtee$ en kg d'eau/s.

Nous savons également que :

$$Q.Y_e + Qtee = Q.Y_s \quad (4.12)$$

Où $Q.Y_e$ correspond au débit d'air multiplié par l'humidité absolue à l'entrée, et $Q.Y_s$ correspond au débit d'air multiplié par l'humidité absolue à la sortie.

D'un point de vue physique, ceci est justifiable par le fait que pour un certain débit d'air, l'humidité absolue à la sortie de séchoir correspondra à l'humidité absolue à l'entrée du séchoir pour ce même débit, à laquelle nous ajoutons la masse d'eau évaporée par unité de temps.

Puisque nous cherchons Q (le débit d'air), notre output, il suffit pour le trouver de l'isoler dans l'équation ci-dessus. Nous obtenons de cette façon :

$$Q = \frac{Q_{tee}}{Y_s - Y_e} \quad (4.13)$$

Où Q_{tee} est donc considérée comme une constante, et Y_s et Y_e sont les inputs qui feront varier le débit d'air.

Si nous exprimons à nouveau Q_{tee} selon nos inputs, nous obtenons :

$$Q = \frac{h_i - h_f}{Y_s - Y_e} \frac{Mms}{t} \quad (4.14)$$

4.4 Bloc effet de serre

L'objectif de ce bloc "effet de serre" du code Python, qui sera le bloc principal du code, est de calculer les dimensions de la serre sur base de sa puissance surfacique. Pour simplifier, nous allons considérer ici la serre la plus simple possible, c'est-à-dire une serre parallélépipédique.

4.4.1 Effet de serre

L'effet que nous allons utiliser dans notre séchoir est l'effet de serre. Son principe est de laisser passer les rayons solaires chauffants tout en empêchant l'air chauffé de s'échapper. En pratique, il est retrouvé toujours sous la même forme : une paroi, la couche d'ozone dans le cas de l'effet de serre terrestre et le plastique dans notre séchoir, recouvre une couche d'aire totalement ou partiellement enfermée dans un contenant. Ainsi, les rayons chauffants qui arrivent du soleil traversent la paroi et réchauffe l'air, mais celui-ci est bloqué par cette même paroi et n'a donc pas d'autre choix que de s'échauffer. [aumporn]

4.4.2 Données connues et inconnues relatives au bloc effet de serre

Nous disposons grâce aux deux derniers blocs, ainsi qu'au cahier des charges des données suivantes :

| Grandeurs | Symboles | Unités | Provenances valeurs |
|--|------------|--------------|---------------------|
| Flux solaire direct | F_d | $W.m^{-2}$ | Bloc environnement |
| Flux solaire indirect | F_i | $W.m^{-2}$ | Bloc environnement |
| Température dans le séchoir | T | K | Cahier des charges |
| Débit d'air | Q | $m^3.s^{-1}$ | Bloc ventilation |
| Vitesse d'évaporation | Q_{tee} | kg d'eau/ s | Bloc ventilation |
| Différence de température entre les parois et l'intérieur du séchoir | ΔT | K | Précalculé |

TABLE 4.5 – Données connues relatives au bloc effet de serre

Celles-ci nous permettent de déterminer grâce aux calculs expliqués plus loin l'inconnue suivante :

| Grandeurs | Symboles | Unités |
|-----------|----------|--------|
| Surface | S | m^2 |

TABLE 4.6 – Donnée inconnue relative au bloc effet de serre

4.4.3 Précisions

Le flux F_d est le flux solaire direct, il arrive directement du soleil et a une longueur d'onde faible (de l'ordre des ultraviolets) car il est issu d'une source extrêmement chaude. Ceci découle de la loi du déplacement de Wien [obspm]. À l'inverse, le flux F_i est indirect car réfléchi par l'atmosphère. Comme l'atmosphère est beaucoup plus froide que le soleil, la longueur d'onde des rayons indirects sera plus

élevée (de l'ordre des infrarouges). À cause de leur longueur d'onde plus faible, les rayons indirects ne traverseront pas la couche supérieure de la serre, à l'inverse des rayons directs.

Ajoutons quelques variables au problème. Pour plus de clarté, un schéma explicatif a été réalisé sur le logiciel opensource InkScape, se trouvant à la figure 4.2. Notons T_p la température de la paroi supérieure de la serre et T_s la température du sol (au fond de la serre). Ces deux corps sont chauffés et vont donc perdre de l'énergie en émettant des rayonnements. il y aura donc un flux d'énergie venant du sol noté F_s qui va réchauffer le plastique, et deux flux d'énergie venant du plastique noté F_p dont le premier va réchauffer le sol et le second va être perdu en étant émis dans l'air au-dessus de la serre. Finalement, nous savons que tant que la température T est inférieure aux températures T_p et T_s , il y aura un transfert de chaleur sous forme de flux thermique par convection entre les surfaces solides et l'air en mouvement dans le séchoir. Ce transfert est caractérisé par un coefficient de convection thermique surfacique noté h . Ce coefficient représente donc la capacité d'une surface chaude à chauffer un fluide. Elle est supposée égale au niveau du sol et du plastique. [lienhard]

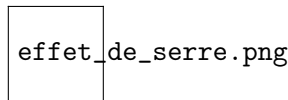


FIGURE 4.2 – Phénomène d'effet de serre dans la zone de chauffage

4.4.4 Hypothèses simplificatrices

Nous allons pour le moment utiliser quelques simplifications. Par exemple, nous supposons que la seule perte d'énergie est le flux F_p vers l'extérieur du séchoir, nous ne calculons donc pas le coefficient de convection thermique entre le plastique et l'air à l'extérieur du séchoir car il est petit par rapport à F_p si le séchoir est protégé du vent. De plus, nous supposons que le fond est parfaitement isolé et que la hauteur du séchoir est suffisamment petite pour que les rayonnements issus du sol et du plastique arrivent de bas en haut, sans pertes sur les côtés. Toutes ces simplifications réduisent la précision de notre modèle, mais cela ne semble pas être un trop gros problème par rapport à la complexité des équations que cela engendrerait.

4.4.5 Equations à disposition

Nous avons donc 6 inconnues dans notre problème : F_p , F_s , T_p , T_s , h et P . Nous allons chercher à les mettre en relation afin de calculer les dimensions du séchoir sur base des variables données dans l'input comme précisé plus haut. Pour cela, définissons la densité de flux thermique ϕ en $W.m^{-2}$ comme le produit entre le coefficient h et la différence de température ΔT entre la surface concernée et l'air dans le séchoir. Nous trouvons dès lors $\phi_s = h(T_s - T)$ et $\phi_p = h.(T_p - T)$. La puissance P étant la somme

des énergies entrantes transmises à l'air, nous avons :

$$P = \phi_s + \phi_p = h(T_p - T) + h(T_s - T) = h(T_p + T_s - 2T) \quad (4.15)$$

Ensuite, mettons en lien la température des deux corps avec les quantités de rayonnements émis. Pour cela, nous utilisons la loi de Stefan-Boltzmann [**brouche**] $M = \sigma \epsilon T^4$ où M représente la quantité de rayonnements en $W.m^{-2}$, σ est une constante appelée la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut approximativement $5,67.10^{-8} W.K^{-1}.m^{-2}$ et ϵ est un coefficient adimensionnel compris entre 0 et 1 qui représente l'émissivité, c'est-à-dire le rapport entre le flux radiatif émis par la surface concernée et celui émis par un corps idéalisé appelé corps noir qui absorberait toute l'énergie électromagnétique reçue. Finalement, T est la température du corps concerné. Pour simplifier les choses, nous allons considérer que le sol et le plastique du séchoir sont des corps noirs, donc que $\epsilon = 1$, comme cela a déjà été expliqué précédemment. Nous trouvons dès lors deux nouvelles formules qui sont :

$$F_p = \sigma T_p^4 \quad (4.16)$$

$$F_s = \sigma T_s^4 \quad (4.17)$$

Finalement, nous allons mettre en place deux équations bilans. D'abord une bilan global qui utilise la loi de la conservation de l'énergie en égalisant les énergies entrantes et sortantes par le séchoir. Les énergies entrantes sont les flux directs et indirects provenant du soleil et les énergie sortantes sont la perte d'énergie sous forme de rayonnement venant du plastique vers l'extérieur du séchoir ainsi que l'énergie transmise à l'air à l'intérieur du séchoir. Dès lors,

$$F_d + F_i = F_p + P \quad (4.18)$$

Nous allons également mettre en place un bilan local de l'énergie dans le sol uniquement. Les énergies entrantes sont le flux direct du soleil ainsi que les rayonnements transmis par la plastique au sol alors que les énergies sortantes sont les rayonnements transmis du sol au plastique et le flux thermique du sol à l'air dans le séchoir. Donc,

$$F_d + F_p = F_s + h(T_s - T) \quad (4.19)$$

4.4.6 Types de convection

Dans le cas où le ventilateur à l'entrée du séchoir souffle avec une puissance importante et a donc un rôle prépondérant, nous considérerons que l'air dans le séchoir subit une convection forcée. Inversement,

si celui-ci est bien peu important par rapport au mouvement naturel de l'air dû au fait qu'il soit chauffé, nous considérerons qu'il subit une convection naturelle. Si il n'est pas possible de dégager un des deux types de convection, c'est-à-dire que le déplacement naturel et celui dû au ventilateur ont une importance à peu près équivalente, nous considérerons que les deux types de convection coexistent, et il faut donc prendre en compte les deux dans les calculs.

4.4.7 Convection naturelle

Si nous sommes dans le cas de la convection naturelle, nous pouvons définir un nombre adimensionnel appelé nombre de Rayleigh. Par définition, il vaut [lienhard]

$$R_a = \frac{\beta g L^3 \Delta T}{\alpha \nu} \quad (4.20)$$

où β est le coefficient de dilatation thermique volumétrique, g est l'accélération de la pesanteur, L est la longueur caractéristique du séchoir, ΔT est la différence entre la température de la paroi et celle de l'air loin de la paroi, α est la diffusivité thermique de l'air et ν est la viscosité cinématique de l'air.

À l'aide de tables de valeurs de constantes pour l'air en fonction de sa température, nous avons trouvé que $\alpha = 26,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et que $\nu = 19,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à 65°C [bernard]. Nous savons également bien sûr que, sur Terre, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Dans le cas des gaz parfaits, il est clair que $\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{338,15 \text{ K}} = 2,957 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Finalement, la longueur caractéristique est ici définie comme la hauteur du séchoir, estimée à $0,3 \text{ m}$. Comme nous le verrons par la suite, ce choix de longueur n'est pas anodin. Par contre le ΔT reste une inconnue.

Cherchons maintenant à calculer le coefficient de convection h sur base de cette valeur de R_a . Dans le cas de la convection naturelle, nous utilisons une corrélation, c'est-à-dire une loi déduite de l'expérience, mettant en lien le nombre de Rayleigh avec un autre nombre adimensionnel appelé nombre de Nusselt : $N_u = 0,59 \cdot R_a^{0,25}$ [debaste]. Cette corrélation utilise la hauteur du séchoir comme longueur caractéristique. Le nombre de Nusselt est défini comme $N_u = \frac{hL}{\lambda}$ [lienhard] où h est le coefficient de convection thermique, L est à nouveau la longueur caractéristique du séchoir ($0,12 \text{ m}$) et λ est la conductivité thermique de l'air ($28 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ d'après les tables) [bernard]. Nous pouvons donc calculer le coefficient h comme

$$h = \frac{\lambda}{L} \cdot 0,59 \cdot R_a^{0,25} \quad (4.21)$$

Pour calculer h sans connaître le ΔT nous allons utiliser une astuce dans notre programme : nous allons estimer le ΔT à une valeur cohérente, et puis nous calculerons le h sur base de cette estimation. À l'aide de cette valeur, le reste du programme calculera le T_p et le T_s et nous pourrons alors recalculer

un ΔT comme étant la différence entre la moyenne des températures des parois et la température au centre du séchoir, estimée à 65° : $\Delta T = \frac{T_s + T_p}{2} - 65$, que nous allons injecter à nouveau pour trouver un nouveau h et ainsi de suite jusqu'à obtenir des valeurs de h et de ΔT convergente.

4.4.8 Convection forcée

Si nous sommes dans le cas de la convection forcée, le nombre adimensionnel que nous allons utiliser est le nombre de Reynolds $R_e = \frac{VL}{\nu}$ [lienhard] où L et ν sont toujours la longueur caractéristique du séchoir et la viscosité cinématique de l'air, alors que V est la vitesse du fluide, cette vitesse pouvant être calculée sur base du débit d'air. Sans rentrer dans trop de détails, puisque nous verrons dans la prochaine section que ce n'est pas le type de convection dominant, nous pouvons dire que l'écoulement de l'air dans le séchoir est laminaire. Dès lors, nous pouvons utiliser une nouvelle corrélation [debaste]

$$N_u = 0,664 R_e^{0,5} . P_r^{0,33} \quad (4.22)$$

où P_r est le nombre adimensionnel de Prandtl qui vaut $0,723$ pour l'air à 65°C d'après les tables [bernard] (ce nombre dépend uniquement des caractéristiques du fluide, et pas de l'écoulement). Nous pouvons donc calculer une nouvelle valeur de h .

4.4.9 Choix du type de convection

Il reste à savoir si nous sommes dans le cas de la convection naturelle, forcée ou mixte, c'est-à-dire entre les deux. Pour cela, il suffit de comparer les deux valeurs que nous obtenons pour la coefficient h . Après quelques calculs, nous avons remarqué que celui-ci était systématiquement plus important avec la convection naturelle, et nous avons donc décidé de garder cette hypothèse.

4.4.10 Puissance totale

Il reste une dernière chose à calculer avant de pouvoir calculer la surface du séchoir. Il s'agit de la puissance totale. En effet, tout ce qui a été décrit précédemment aura servi à calculer la puissance surfacique en combinant toutes les équations. Or, il est aisé d'obtenir la surface du séchoir en divisant la puissance totale par la puissance surfacique : $S = \frac{P_{tot}}{P}$. Séparons alors la puissance totale nécessaire en deux parties : celle nécessaire pour augmenter la température de l'air dans la zone de chauffe (P_1), et la deuxième qui servira à faire évaporer l'eau contenue dans les bananes ou le poivre dans la deuxième partie du séchoir (P_2).

Commençons par chercher P_1 . Comme nous travaillons à pression atmosphérique constante, C_p est la quantité d'énergie à apporter à 1kg d'air pour augmenter sa température d' 1K . Donc, l'énergie nécessaire à apporter à $M\text{kg}$ d'air pour augmenter sa température de $\Delta T = T_f - T_i = T - T_{amb}$ est

de $C_p.M.\Delta T$. M n'est pas connu, mais il peut le déduire du débit d'air Q , puisque $Q = \frac{V}{t} = \frac{M}{t.\rho}$ si V est le volume d'air en m^3 , t le temps de séchage en secondes et ρ est la masse volumique de l'air. Nous déduisons donc que l'énergie à apporter est $C_p\Delta TQt\rho$ et que la puissance P_1 vaut $P_1 = C_p\Delta TQ\rho$ en divisant par le temps

Pour la puissance P_2 , les choses sont simples puisque la chaleur latente de l'air L_c est la quantité d'énergie à apporter pour faire s'évaporer $1kg$ d'eau. Nous en déduisons facilement que l'énergie à apporter pour évaporer $m_f - m_i$ kg d'eau est $L_c.(m_f - m_i)$ où m_i et m_f sont respectivement les masses de produit initiales et finales, donc la différence est la masse d'eau évaporée. Finalement, $P_2 = \frac{L_c.(m_f - m_i)}{t}$ où t est le temps écoulé en secondes. Nous y reconnaissons la définition de $Qtee$ provenant du bloc ventilation, c'est-à-dire la masse d'eau évaporée par seconde. Donc, $P_2 = Qtee.L_c$. En combinant les deux équations :

$$P_{tot} = C_p\Delta TQ\rho + Qtee.L_c \quad (4.23)$$

En pratique, nous allons garder les deux termes de la somme séparés, en effet, cela permet de calculer séparément les surfaces de chaque zone du séchoir. Pour plus de détails, voir l'annexe A.

4.4.11 Résolution

Il ne nous reste maintenant qu'à résoudre le système d'équations suivant, qui a autant d'équations que d'inconnues.

$$\left\{ \begin{array}{l} P = h(T_p + T_s - 2T) \\ F_p = \sigma T_p^4 \\ F_s = \sigma T_s^4 \\ F_d + F_i = F_p + P \\ F_d + F_p = F_s + h(T_s - T) \\ P_{tot} = C_p\Delta TQ\rho + Qtee.L_c \\ S = \frac{P_{tot}}{P} \end{array} \right.$$

Pour cela, nous avons utilisé la fonction *folve* du module Python *scipy.optimize* [**scipy**] ainsi qu'une fonction récursive afin de pouvoir estimer finement la valeur de ΔT . Pour plus de détails, voir le code en annexe A. Nous avons obtenu un résultat final pour la surface d'environ $0,15 m^2$ en utilisant le cahier des charges fourni.

Résultats des prototypes

5.1 Résultats du test du premier prototype

Après avoir testé notre séchoir dans un temps limité (une peu moins d’une heure) nous avons pu faire les observations suivantes :

| | |
|------------------------------|---------------------|
| Température ambiante (°C) | 17 |
| Température à la sortie (°C) | 45 |
| Vitesse (m/s) | 0.75 |
| Débit (m^3/s) | $3,4 \cdot 10^{-3}$ |
| Masse initiale (kg) | 0.246 |
| Masse finale (kg) | 0.223 |
| Masse évaporée (%) | 9 |
| Puissance utile (W) | 145 |

TABLE 5.1 – Résultats des tests du premier prototype

À la suite de ces résultats nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La température à la sortie étant de 45°C. Nous pouvons estimer que la température au début du plateau de poivre risque d’être trop élevée en raison de la courte durée de chauffe. En effet, nous supposons que la température augmentera encore et risque donc de dépasser la limite fixée dans le cahier des charges.
- La puissance utile est de 145 Watts. Or, nous aurions dû nous approcher des 60 watts, ce qui fait que notre prototype délivre trop de puissance. Cependant, ce résultat est encourageant car nous allons pouvoir l’ajuster en réduisant la zone de chauffe ou en augmentant le débit d’air à l’aide du ventilateur.
- La quantité de masse évaporée peut paraître faible mais en comparaison avec les autres groupes, celle-ci était tout à fait correcte, même supérieure à la moyenne. Nous pouvons donc supposer que la masse évaporée sera beaucoup plus importante lors d’un séchage plus long.

5.2 Résultats du premier test du prototype final

À l'aide de notre partie théorique du bloc "Ventilation", nous avons conclu qu'augmenter le débit d'air dans le séchoir serait suffisant pour diminuer l'humidité relative. Nous sommes retournés au fablab pour effectuer l'unique modification nécessaire : rajouter un tiroir afin d'accueillir une quantité de bananes suffisante puisque notre prototype était déjà suffisamment performant, comme le prouvent ses 145W de puissance.

Une fois le nouveau tiroir ajouté à la zone de séchage nous avons effectué un nouveau test d'une durée de 3 heures. Les résultats obtenus sont les suivants :

| | |
|------------------------------|----------------|
| Température ambiante (°C) | 19.9 |
| Température à la sortie (°C) | 43 |
| Vitesse (m/s) | 1.02 |
| Débit (m^3/s) | $4,63.10^{-3}$ |
| Masse initiale (kg) | 0.501 |
| Masse finale (kg) | 0.353 |
| Masse évaporée (%) | 30 |
| Puissance utile (W) | 128 |

TABLE 5.2 – Résultats des tests de notre prototype final

En comparant les résultats obtenus de la table 5.2 et ceux obtenus lors de notre premier test (table 5.1), nous en concluons que, comme prévu précédemment, en augmentant le débit d'air, la température de notre séchoir a diminué.

Grâce aux données complètes du datalogger, nous pouvons aussi extrapoler le graphique de l'humidité relative en fonction du temps et donc estimer notre humidité relative au bout des 8 heures de séchage

Nous cherchons à calculer l'humidité relative moyenne sur l'entièreté du séchage : pour cela, nous calculons l'intégrale de la fonction, que nous divisons par le nombre de points de données. Sachant que le séchage s'effectue sur un total de 8h, et qu'un point de donnée est pris toute les 10 secondes, la variable est comprise entre 0 et 2880. Pour améliorer la précision du calcul, nous utilisons la valeur exacte de l'intégrale pour les points de données des trois premières heures, et l'intégrale de la fonction approchée pour la suite.

$$x = \frac{3.482.10^4 + \int_{1081}^{2880} 50.68e^{-0.002713x} + 16.35 dx}{2880} = 22.65 \quad (5.1)$$

Selon nos estimations, nous obtiendrons donc une humidité moyenne plus élevée que la limite maximale. Cela peut être résolu en augmentant encore le débit d'air.

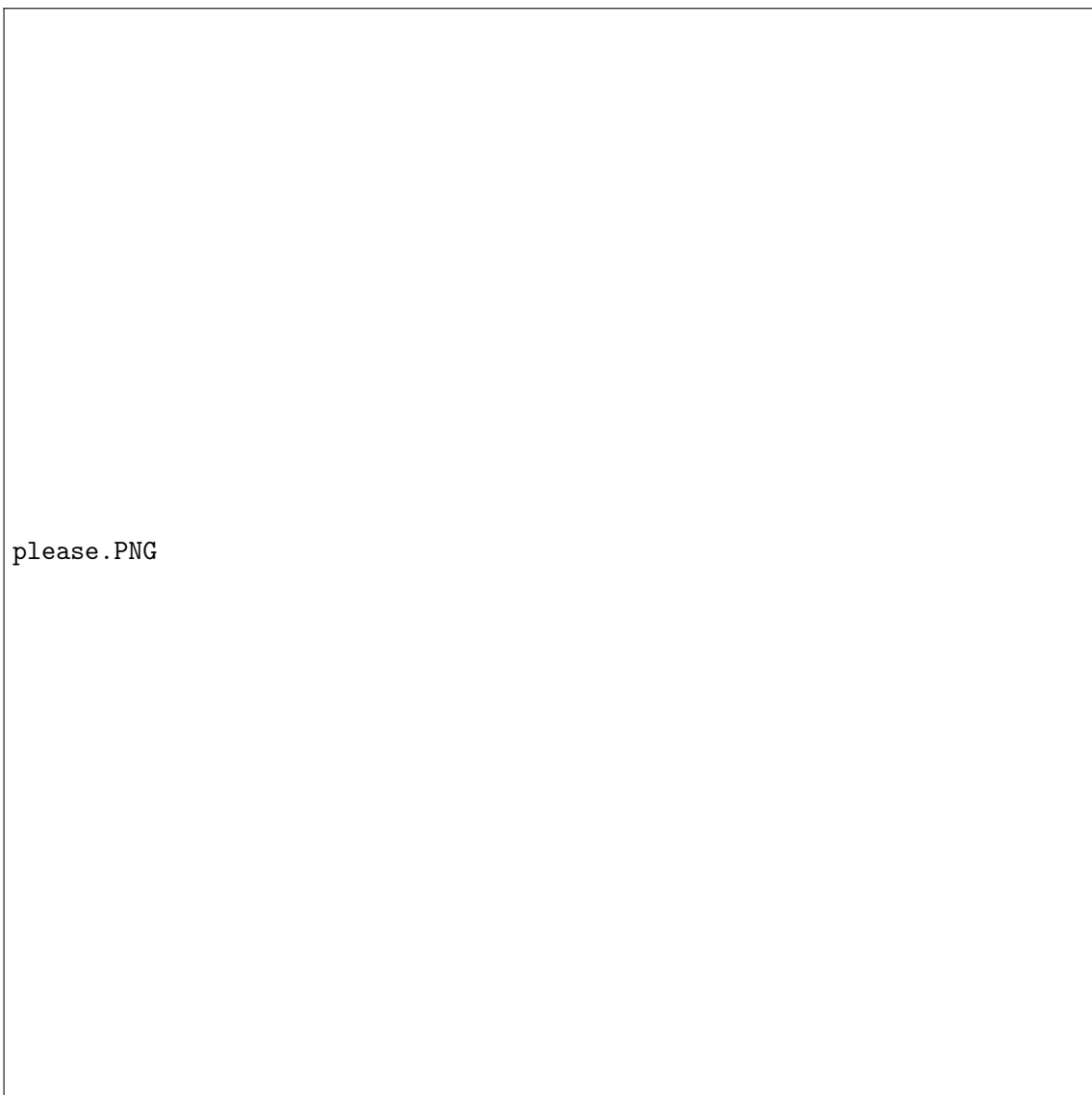


FIGURE 5.1 – Graphique de la température dans la zone de séchage en fonction du temps lors du premier test du prototype final.

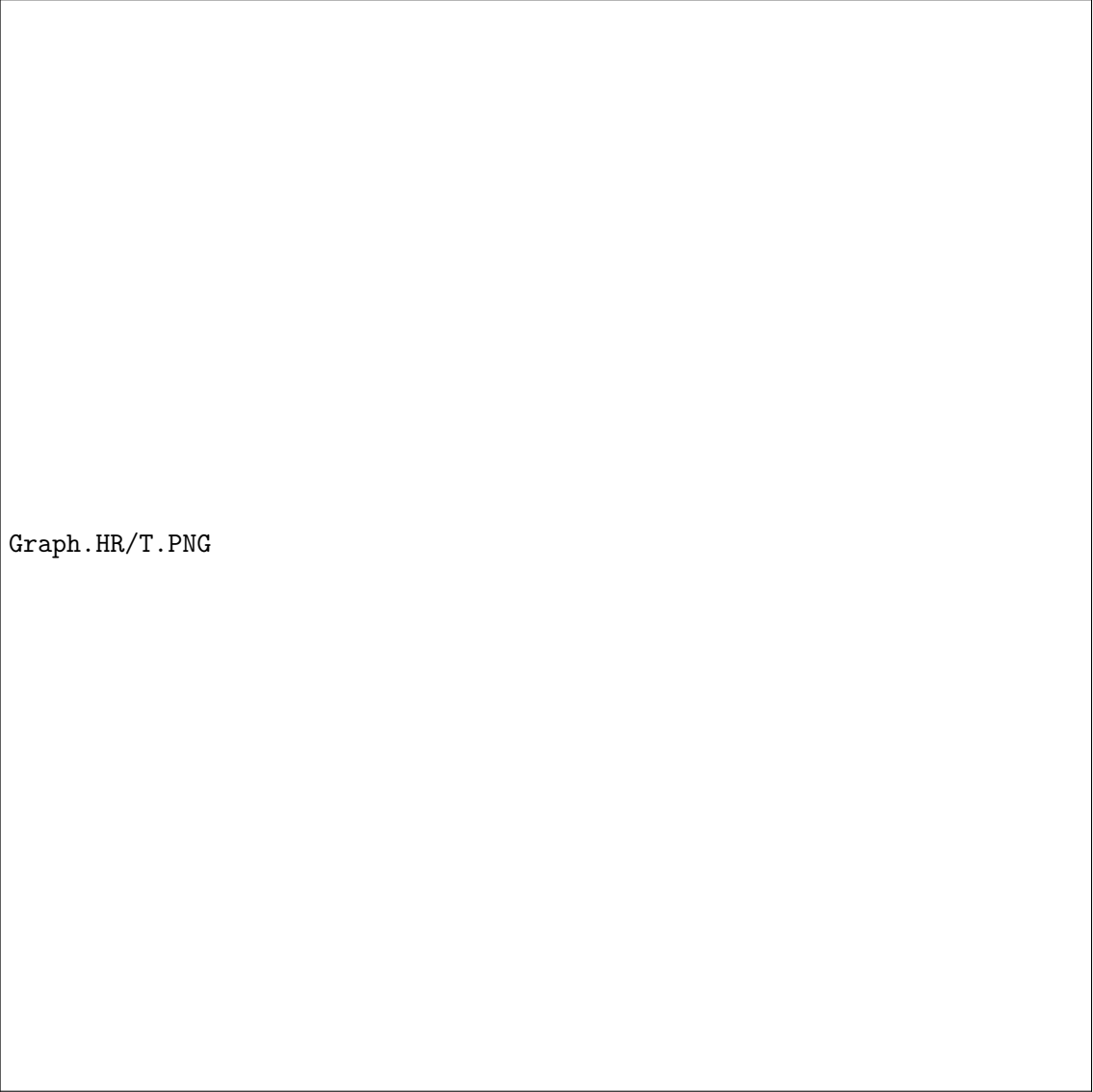
Nous voulons passer de 3kg d'eau / kg de bananes à 0.1kg d'eau / kg de bananes. Sachant que notre masse de bananes initiale est de 500g, nous devons donc finir avec 138g de bananes sèches. Au bout de 3 heures de séchage, nous avons perdus 148g d'eau, nous pouvons supposer que nous devrions arriver à sécher la quantité demandée en 8 heures.

5.3 Résultats du test final du prototype final

Étant donné les résultats encourageants du test précédent, nous avons décidé d'augmenter encore le débit pour le test final.

Il faut noter que la puissance reçue par la lampe était plus faible qu'au test précédent, la lampe étant placée plus haut et étant également moins puissante.

Notre humidité relative étant nettement plus élevée que lors du test précédent, nous nous tournons



Graph.HR/T.PNG

FIGURE 5.2 – Graphique de l’humidité relative à la sortie du séchoir en fonction du temps lors du premier test du prototype final

vers les graphiques afin d’en découvrir la raison. Sur la figure 5.3, nous remarquons que l’humidité relative fait plusieurs remontées dont la cause reste inconnue.

En comparant avec le graphique de notre test précédent, nous remarquons que l’allure est semblable lors des 3 premières heures, la principale différence étant le laps de temps après lequel l’humidité relative commence à diminuer. Nous supposons que cela est dû à la différence de puissance reçue entre les deux tests. Une autre raison probable expliquant la différence est qu’au test précédent, le datalogger avait été placé au milieu des bananes alors que nous l’avons mis à la sortie pour le test final, ce qui a pu fausser le test précédent.

Sur le graphique de la température en fonction du temps, sur la figure 5.4, une chute de température est visible au même moment que la remontée que la remontée d’humidité relative.



FIGURE 5.3 – Graphique de l’humidité relative à la sortie du séchoir en fonction du temps lors du test final



FIGURE 5.4 – Graphique de la température à la sortie du séchoir en fonction du temps lors du test final

| | |
|------------------------------|----------------|
| Température ambiante (°C) | 20 |
| Température à la sortie (°C) | 33.1 |
| Vitesse (m/s) | 1.2 |
| Débit (m^3/s) | $5.44.10^{-3}$ |
| Masse initiale (kg) | 0.501 |
| Masse finale (kg) | 0.301 |
| Masse évaporée (%) | 40 |
| Puissance utile (W) | 107 |

TABLE 5.3 – Résultats du test final

La nature subite du premier saut nous fait soupçonner une cause extérieure. En comparant nos résultats avec ceux du groupe présent au même moment, nous avons observé des graphiques relativement similaires avec des changements de croissance aux mêmes instants, ce qui confirmerait notre hypothèse d'une cause extérieure. La nature de cette cause étant inconnue, nous ne pouvons qu'émettre des hypothèses expliquant celle-ci.

Par exemple, il est possible qu'il y ait eu un problème au niveau de la puissance développée par les lampes. Nous avons aussi pu remarquer que, dans certains groupes, les potentiomètres utilisés se déréglaient à cause de la chaleur, appliquant des changements au niveau du débit d'air. Il est aussi possible que nous l'ayons mal géré sans qu'il n'y ait de cause extérieure, ce qui expliquerait pourquoi nos valeurs sont beaucoup moins bonnes à ce dernier test.

Implantation de notre séchoir au Cambodge

Pour rappel, le cahier des charges nous soumet des conditions à respecter. Entre autres, nous devons sécher 20 kg de poivre pendant un temps d'ensoleillement maximum de 16h. . De plus, l'humidité relative maximale tolérée dans le séchoir solaire doit être inférieure à 30%. Il nous faut aussi penser au point de vue des performances, de l'ergonomie, de la facilité de montage et le tout doit être faisable avec le matériel disponible au Cambodge.

Or, notre prototype ne permet pour l'instant qu'un séchage de 500g de bananes et atteint une humidité relative moyenne trop élevée. Il nous faudrait une capacité 40 fois supérieure et modifier ainsi notre prototype pour permettre tous ces changements. C'est pourquoi, pour l'implantation de notre séchoir Cambodge, il fut nécessaire d'entamer quelques recherches théoriques sur le contexte environnemental du Cambodge, les matériaux qui y sont disponibles ainsi que le nouveau dimensionnement et les modifications apportées à notre logiciel. Tous ces éléments de recherches sont abordés dans la suite de ce chapitre.

6.1 Climat du Cambodge

Le climat du Cambodge est dit tropical : il est caractérisé par des températures chaudes pendant toute l'année allant de 20 à 30°C (voir Figure 6.1). Il y a une saison sèche de novembre à avril avec de faibles précipitations ainsi qu'une saison humide caractérisée par de fortes pluies.

Sachant que le séchoir doit être opérationnel de janvier à mars, nous nous intéresserons à cette période. Les éléments tels que la température, l'humidité, les précipitations, le nombre d'heures de clarté ainsi que le rayonnement solaire interviennent dans la modélisation du séchoir solaire. Toutes ces valeurs viendront du logiciel FAOCLIM [FAOCLIM] que nous utiliserons pour les déterminer et dont le fonctionnement est expliqué en annexe (voir Annexe B).

Au niveau des températures, il peut être remarqué que la température pendant les trois mois qui concernent le séchage du poivre oscille autour des 27-28°C (voir Figure 6.1).

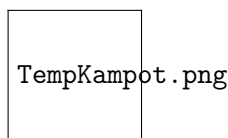


FIGURE 6.1 – Évolution de la température moyenne mensuelle maximale et minimale en fonction du temps dans la région de Kampot au Cambodge [climat]

De plus, pour ce qui est des précipitations, la pluviométrie moyenne est de 15 mm pour janvier et février et de l'ordre de 35 mm pour le mois de mars (voir Figure 6.2).



FIGURE 6.2 – Évolution des précipitations moyennes mensuelles en fonction du temps dans la région de Kampot au Cambodge [climat]

Pour la région de Kampot, nous aurons pour les trois mois une moyenne de 12h de clarté par jour (voir Figure 6.3).

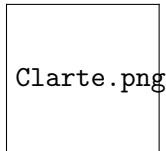


FIGURE 6.3 – Évolution des heures de clarté mensuelles en fonction du temps dans la région de Kampot au Cambodge

[climat]

Parallèlement à cela, le rayonnement solaire varie de $17,94 MJ.m^{-2}$ en janvier à $21,12 MJ.m^{-2}$ en mars, soit une moyenne de $19,6 MJ.m^{-2}$ de rayonnement solaire par jour pour ces trois mois (Logiciel FAOCLIM). [FAOCLIM]

Et pour finir, nous trouvons une humidité ambiante moyenne de 70% entre janvier et mars (voir Figure 6.4).

Il ne faut pas oublier de prendre en considération la présence de poussière et d'insectes au Cambodge. En effet, pour ne pas altérer la qualité du produit, un séchoir solaire opérant sur place devra pouvoir bloquer ces deux éléments à l'aide d'une moustiquaire afin de préserver la qualité du poivre.

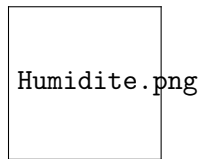


FIGURE 6.4 – Évolution de l’humidité relative moyenne mensuelle en fonction du temps dans la région de Kampot au Cambodge

[humidity]

6.2 Matériaux pour la construction du séchoir

Pour la construction de notre prototype, nous avons opté pour du bois comme matériau car nous peut facilement nous le procurer et son coût n’est pas trop élevé. Cependant, pour le Cambodge, nous devons prendre en compte les conditions climatiques sur place tels que l’humidité, la pluie et la poussière. Si nous construisions notre prototype actuel au Cambodge, il serait peu résistant à cause de la pluie pendant certaines périodes. Dès lors, nous devons revoir les matériaux qui composeront notre séchoir au Cambodge afin qu’il puisse faire face à tous types de situation sur place. [materials]

Il est difficile de trouver des informations directes sur les matériaux spécifiques au Cambodge car il faudrait aller sur place pour pouvoir constater par nous-mêmes. Néanmoins, nous pouvons supposer que nous trouverions certains matériaux standards tels que le bois, l’aluminium, l’acier, le verre ou le plastique qui pourront nous être utile. L’acier a pour avantage d’être recyclable, résistant et d’une longévité importante. La galvanisation de ce dernier est un procédé très répandu qui consiste à le recouvrir d’une couche métallique afin qu’il s’oxyde moins face à l’eau, ce qui est plutôt intéressant si nous voulons construire un séchoir capable de résister aussi bien à la chaleur qu’à l’eau et à l’humidité.

Pour déterminer le prix, il faudra voir sur place quel matériau est le plus avantageux au niveau rapport qualité/ prix. Cependant, nous pouvons proposer différentes approches en fonction des matériaux que nous utiliserons. Si nous utilisons du bois, nous pouvons disposer une gouttière en plastique ou en polycarbonate afin de faire ruisseler l’eau sur le haut du séchoir et des bâches en plastique sur les côtés afin de le protéger de la pluie. Si nous optons pour une structure en acier ou en aluminium, il faudra prévoir des plaques de polystyrène pour isoler thermiquement l’intérieur car ces derniers ne sont pas de très bons isolants thermiques, contrairement au bois. Un séchoir en polycarbonate reste aussi envisageable car il s’agit d’un très bon isolant thermique qui est notamment utilisé dans les serres et profite d’une bonne imperméabilité face à l’eau en cas de pluie. [materials][galva][comparaison][polycarbonate]

De plus, pour notre zone de chauffage, nous avons utilisé une plaque de plexiglas qu’un membre de notre groupe disposait chez lui, mais nous ne sommes pas sûrs d’en trouver au Cambodge. Nous pouvons par contre la remplacer par du verre que nous pouvons trouver sur place et qui comporte les

même propriétés. En effet, le verre semble être un bon isolant thermique, insensible aux rayures et aux saletés et facile d'entretien. Une bâche en plastique pourra éventuellement être envisagée, ce qui permettrait d'éviter un trop grand coût par rapport au verre et d'avoir une solution aussi efficace, bien que moins solide. Dans ce cas, il faudrait alors également penser à la forme du séchoir pour qu'en période de pluie, l'eau ne s'accumule pas dessus. **[materials]** **[comparaison]**

6.3 Logiciel

En ce qui concerne notre logiciel, nous l'avons élaboré par rapport à nos tests de notre prototype en Belgique mais il devrait être tout aussi fonctionnel pour le Cambodge. En effet, seules les valeurs liées au contexte environnemental du pays devraient changer. Nous pouvons voir dans la table 6.1 les modifications du cahier des charges à prendre en compte dans le logiciel.

| Grandeurs | Belgique | Cambodge |
|----------------------------|----------------|----------------|
| Flux solaire direct | 900 $W.m^{-2}$ | 340 $W.m^{-2}$ |
| Température ambiante | 293.15 K | 300.15 K |
| Humidité relative - Entrée | 0.6 | 0.7 |
| Humidité relative - Sortie | 0.15 | 0.25 |
| Temps de séchage | 8 heures | 16 heures |
| Masse de matière à sécher | 0.5 kg | 20 kg |

TABLE 6.1 – Modifications du cahier de charges entre les tests et le Cambodge

6.4 Dimensionnement

Précisons que l'humidité relative moyenne à la sortie ne pourra pas dépasser 30%. Pour cela, comme nous avons remarqué que l'humidité relative était décroissante, nous avons estimé qu'il faudrait que sa valeur atteigne 25% à la fin du séchage afin de compenser les valeurs initiales beaucoup plus élevées.

Enfin, nous avons dû fixer deux des trois dimensions : une hauteur de 30cm nous semblait convenable pour avoir un débit suffisant tout en permettant à tout l'air de chauffer uniformément et une largeur de 1m donnait une taille convenable. Le code nous a alors fourni une longueur pour la zone de chauffe de 2,1m et de 2,9m pour la zone de séchage, ce qui a été appliqué sur nos plans.

6.5 Plan du séchoir de terrain

Suite au prototype et en vue des conditions du terrain du Cambodge, nous avons décidé d'apporter plusieurs modifications.

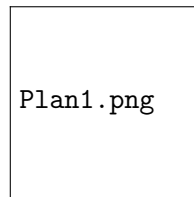


FIGURE 6.5 – Plan du séchoir de terrain

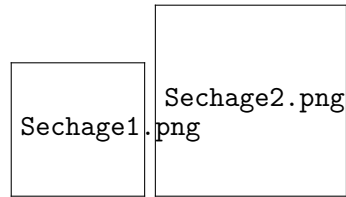


FIGURE 6.6 – Zone de séchage

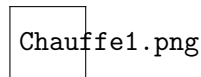


FIGURE 6.7 – Zone de chauffe

Tout d’abord, le séchoir pour le Cambodge doit pouvoir sécher non plus seulement 500g de bananes, mais 20 kg de poivre. Afin qu’une personne seule puisse se charger du séchage, il nous a semblé évident que seul 2 tiroirs de dimensions très grandes et portant chacun 10 kg de poivre ne seraient pas pratiques à l’utilisation. C’est pourquoi nous avons décidé que notre prototype pour le Cambodge aurait 6 tiroirs au lieu de 2. Ces 6 tiroirs sont donc de taille raisonnable et permettent de répartir le poids de façon à ce ceux-ci puissent être maniés par une personne seule. Nous avons également décidé que nos tiroirs seraient insérés par le côté de séchoir, et non plus par l’arrière. De cette façon, ils sont de dimensions de rapport 2 : 1, ce qui permet une utilisation plus simple que s’ils étaient insérés par le fond, où il aurait fallu qu’ils aient un rapport 5 : 1.

De plus, puisque les moustiquaires des tiroirs doivent supporter un poids de plus de 3kg, il nous a semblé évident qu’ajouter un support en bois en dessous de ceux-ci serait nécessaire. Finalement, nous avons également décidé de mettre une moustiquaire à la sortie d’air de notre séchoir, afin que les aliments soient protégés contre les insectes et les éléments extérieurs.

Une des raisons pour lesquelles nous avons décider d’incliner la zone de chauffe est pour pouvoir capter les rayons solaires le plus perpendiculairement possible. Nous avons donc cherché des données donnant l’angle d’élévation du soleil à la période et aux heures concernées par le séchage. Nous avons donc décidé d’incliner la zone d’un angle de 30° par rapport au sol. **[SunEarthTools]**

Voici un extrait du plan du séchoir de terrain que nous avons réalisé sur les figures 6.5, 6.6 et 6.7. Celui-ci a déjà été évalué et nous ne rentrerons donc pas plus dans les détails

Fonctionnement de l'équipe

Dans cette section, nous analyserons le fonctionnement de notre équipe par le biais d'une analyse SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats, c'est-à-dire Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces).

7.1 Forces

Premièrement, nous avons de fortes compétences sociales. Notre équipe est par exemple motivée ainsi que ponctuelle et présente aux réunions. Il existe également une bonne cohésion au sein du groupe et nous sommes toujours très à l'écoute des autres ce qui facilite le bon avancement du projet.

De plus, certains membres du groupe avaient par exemple une connaissance approfondie du langage de programmation Python ou des facilités et compétences développées dans le travail manuel, ce qui nous a permis d'obtenir rapidement un prototype de qualité.

7.2 Faiblesses

Malgré nos forces qui nous ont permis d'avancer plus efficacement, notre équipe a également dû faire face à quelques faiblesses.

Malgré notre motivation généralement grande, nous avons parfois souffert d'un peu de manque d'implication, particulièrement au moment de la reprise du travail après les examens de janvier. Nous avons cependant pu outrepasser cela par la bonne entente et la bonne humeur dans réunions et le travail de façon générale.

Cependant, à ces réunions, nous avons également parfois dû pallier à des faiblesses liées à nos personnalités. En effet, les membres de notre groupe sont pour la plupart un peu réservés, et pas forcément très extravertis, mena parfois à une baisse d'engagement dans les discussions. Sachant cela, nous avons

fait très attention à ce que tout le monde puisse exprimer son avis et que personne ne se sente exclu des discussions.

Malgré un très grand taux de présence à nos réunions, il pouvait également arriver que certains membres du groupe ne puissent pas venir à cause d'activités extra-scolaires. Ce sont également ces activités qui ont parfois rendu difficile de trouver des dates et heures de réunion pour notre chef de projet. Malgré cela, nous sommes parvenus, comme dit précédemment, à être presque toujours tous présents aux réunions, ce qui montre encore une fois que nous nous impliquions de façon active dans le projet.

De façon plus générale, ce projet était pour nous une toute première confrontation à un projet de groupe universitaire s'étalant sur une longue période. Nous ne savions donc pas exactement à quoi nous attendre, ni la difficulté et l'investissement que ce projet représentait. Notre chef de projet, sachant cela, y a prêté une attention particulière. Cela ne nous a donc pas posé problème, mais nous a justement appris à mener à bien un projet de la sorte.

En outre, notre planification du travail au travers d'un diagramme de Gantt, n'a pas été assez exhaustive, ce qui a parfois pu mener à des retards. Nous avons toutefois toujours réussi à respecter les échéances fixées grâce à une communication performante au sein du groupe.

7.3 Opportunités

Au cours des différents mois durant lesquels se déroulaient ce projet, nous avons eu différentes opportunités que nous avons toujours essayé de saisir.

Nous avons par exemple eu la chance d'avoir certains matériaux à disposition chez certains membres de notre groupe tels que des plaques de plexiglas ainsi que des ventilateurs ou encore de l'isolant. Tous ces matériaux n'ont pas toujours été utilisés, mais ont représenté une opportunité considérable dans la réduction du coût de notre prototype.

Le U-Square, le fablab de la VUB et de l'ULB, a probablement été la plus grande opportunité qui nous a été offerte dans la construction de notre prototype. À la fois espace de travail, de stockage et de tests, il a grandement facilité notre travail et contribué à l'élaboration de notre prototype ainsi qu'à sa mise à l'épreuve.

Les séminaires organisés afin d'expliquer les notions les plus compliquées du travail ont également été d'une grande aide dans la compréhension de certains aspects plus théoriques du projet.

7.4 Menaces

Les menaces peuvent elles aussi être divisées en deux catégories. Il y a tout d'abord les menaces liées au fablab du U-Square. En effet, au moment d'un test de notre prototype au premier quadrimestre, nous avons été confrontés au fait que certains groupes ne respectaient pas forcément leurs horaires de test, ou que certains autres groupes débranchaient par mégarde des fils servant à alimenter le ventilateur de notre prototype. Heureusement, grâce à la mise en place d'un système de réservation des espaces de travail et de test du U-Square, ces problèmes ne sont plus survenus et nous avons pu travailler à notre prototype et le tester dans des conditions optimales.

Le fait que le projet demande un investissement conséquent et qu'il n'est pas le seul à demander cet investissement important a également représenté une menace tout au long de l'année. En effet, nous avons parfois eu à la fois beaucoup de travail pour notre projet et pour des cours, ce qui a compliqué le bon avancement. Cependant, une bonne communication entre membres de l'équipe et avec le chef de projet ont permis de pallier à cette menace en réussissant à mieux organiser et planifier le travail lorsque nous étions confrontés à une surcharge de travail.

7.5 Tableau récapitulatif

| Forces | Faiblesses |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> — Équipe très motivée — Chacun est à l'écoute des autres — Équipe ponctuelle et forte présence lors des réunions — Bonne cohésion et bonne entente dans l'équipe — Connaissances avancées de certains membres du groupe en Python et en travaux manuels | <ul style="list-style-type: none"> — Parfois un léger manque d'implication — Parfois pas assez d'engagement dans les discussions — Activités extra-scolaires pouvant rendre difficile la planification de réunions |
| Opportunités | Menaces |
| <ul style="list-style-type: none"> — Disponibilité de matériaux chez certains membres de l'équipe — Espace de travail et de test dédié (Fablab) du U-Square — Séminaires expliquant les notions difficiles du projet | <ul style="list-style-type: none"> — Soucis organisationnels au Fablab — Investissement considérable demandé par le projet parfois difficilement combinable avec le travail demandé par d'autres cours |

TABLE 7.1 – Tableau récapitulatif SWOT

Conclusion

8.1 Chronologie

Comme cela est reflété dans l'organisation de ce rapport, nos recherches se sont tout d'abord naturellement orientées vers les différents types de séchoirs solaires. Cette recherche nous a permis de nous faire une première idée des techniques de séchage et c'est sur cette base que nous avons esquissé les premiers schémas de notre futur séchoir. Comme nous nous doutions que les recherches théoriques allaient être longues, nous avons commencé la construction de la première version de notre prototype en parallèle. À la mi-parcours, nous avons eu un premier test de notre prototype très encourageant, mais une présentation plus mitigée. Au deuxième quadrimestre, nous nous sommes donc remis en question et avons cherché à améliorer les points qui avaient été portés à notre attention, particulièrement au niveau de la présentation orale. Nous pensons avoir suffisamment tenu compte de ces remarques et avoir présenté un travail de qualité.

8.2 Résumé

Nous avons réussi à créer un séchoir solaire indirect et hybride basé sur le principe d'effet de serre. Il respecte le cahier des charges fourni, et est à la fois performant, robuste et efficace. De plus, nous avons codé un logiciel Python facile à utiliser qui nous permet de dimensionner un séchoir solaire dans de nombreuses conditions et qui a prouvé ses capacités. Nous avons enfin réalisé les plans d'un séchoir de terrain pouvant être installé au Cambodge permettant une compréhension aisée du fonctionnement de l'appareil et un assemblage simple. Finalement, nous avons présenté un développement théorique poussé permettant de comprendre en profondeur les phénomènes se déroulant dans notre séchoir.

8.3 Perspectives

En parallèle avec ces accomplissements, nous avons relevé certains points qui auraient pu être améliorés ou traités plus en profondeur dans notre travail.

Il a été porté à notre connaissance que le toit en bois de la zone de séchage ne laissait pas suffisamment d'énergie solaire entrer dans le séchoir, ceci pouvant affecter la surface calculée par le logiciel. Il faudrait donc soit augmenter la taille du séchoir, soit y placer une plaque de plexiglas au risque de légèrement abîmer le produit. Nous avons également pensé à ajouter un isolant, tel que du polystyrène, pour éviter de perdre trop de chaleur. Lors du premier test, Nous avons en effet remarqué qu'il y avait une perte de chaleur au niveau de la paroi en dessous de la zone de chauffe. Enfin, nous pourrions essayer de diminuer l'épaisseur de nos tiroirs, afin de pouvoir en placer plus sur une même hauteur.

Au niveau du logiciel, nous pourrions essayer de lever certaines des hypothèses simplificatrices que nous avons réalisées afin d'améliorer encore notre précision

Enfin, avec plus d'informations sur le matériel à disposition au Cambodge, nous serions capables d'améliorer la précision de notre description des matériaux utilisés pour le séchoir de terrain.

Malheureusement, par manque de temps, nous ne pouvions pas tout faire et nous avons donc choisi de privilégier certains aspects de notre travail. Nous pensons malgré tout avoir correctement fait usage de notre sens des priorités.

Logiciel Python

Logiciel FAOCLIM

Le logiciel FAOCLIM est une base de données climatiques portant sur plusieurs pays du monde prises depuis plusieurs stations d'observations. L'ensemble de ces données sont mises à disposition afin de pouvoir les extraire et les analyser. C'est ce que nous faisons pour notre bloc environnement avec lequel nous avons pu déterminer le flux direct moyen journalier au Cambodge et également vérifier les autres valeurs prises depuis des graphiques de températures et d'humidité. Nous allons faire une démonstration de son fonctionnement ci-dessus dans nos conditions.

Nous choisissons le pays ainsi que la station qui nous intéresse, dans le cadre de notre projet, il s'agit de Kampot, au Cambodge. Nous sélectionnons les variables que nous voulons, telles que la température moyenne, l'humidité relative et le flux direct moyen journalier. Les données sélectionnées sont alors exportées et regroupées dans un fichier texte :

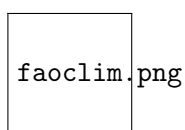


FIGURE B.1 – Démonstration de l'utilisation du logiciel FAOCLIM pour Kampot
[FAOCLIM]

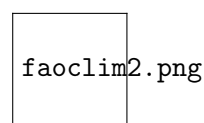


FIGURE B.2 – Données fournies par le logiciel FAOCLIM pour Kampot
[FAOCLIM]

Coût des matériaux

| Matériel | Utilisation | Prix |
|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Silicone | Collage du plexiglas sur le bois | 7.49 € |
| 2 charnières | Attache entre les deux zones | 3.19 € |
| Crochets | Fermeture des charnières | 1.79 € |
| Isolant pour porte/fenêtre | Isolation entre les zones | 7.49 € |
| Planches en bois | Structure du séchoir | 18.89 € |
| Plexiglas | Effet de serre | Récupération |
| Restes de planches du Brico | Structure du séchoir | Récupération |
| Vis, clous, équerres, outils | Construction | à disposition au Fablab |
| Moustiquaire | Tiroir | à disposition au Fablab |
| Ventilateur et potentiomètre | Ventilation | à disposition au Fablab |
| Peinture noire | Augmentation absorption énergie | à disposition au Fablab |
| Total | | 38.85 € |
| Budget initial | | 100 € |
| Budget restant à la fin du projet | | 61.15€ |