



UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES
TRAN-H101 – PROJET MULTIDISCIPLINAIRE

PEPPER CHALLENGE

Rapport final

Auteurs :

Arnaud Saison,
Michaël Feldman,
Hind Bakkali Tahirri,
Younes Bouhjar,
Idil Ari,
Joshua Nicdao Blanco

Groupe n°17 : Takeo

Chef d'équipe :

Cyprien Maes

Superviseur :

Vincent Gérin

Remerciements :

Ce projet n'aurait jamais abouti sans de si nombreuses personnes que nous ne saurions les citer nommément, mais que nous aimeraisons remercier ici :

Cyprien Maes, notre chef de projet pour sa gentillesse, son implication et sa précieuse aide.

Toutes les personnes ayant géré le FabLab pour leurs excellents conseils et leur bienveillance.

Tous les organisateurs du projet qui ont réalisé un extraordinaire travail et nous ont offert l'opportunité de travailler sur un projet aussi important.

Toutes les personnes, proches, camarades et amis qui nous ont moralement soutenus.

Nous ne saurions achever ces remerciements sans exprimer notre gratitude face à l'esprit d'entraide si particulier à l'École Polytechnique de Bruxelles et, par extension, à toute son équipe pédagogique.

Table des matières

CHAPITRE 0 - ABSTRACT	5
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION	6
1.1. CONTEXTE	6
1.2. CONCEPTION DU SECHOIR	6
CHAPITRE 2 - ENVIRONNEMENT	7
2.1. DETERMINATION DES ENTREES ET DE SORTIES	7
2.2. MISE EN PLACE DES EQUATIONS	7
2.2.1. <i>Équation de l'humidité absolue</i>	7
2.2.2. <i>Équation de l'humidité relative</i>	8
2.2.3. <i>Lien entre l'humidité relative et l'humidité relative</i>	9
2.2.4. <i>Le flux direct</i>	9
2.2.5. <i>Le flux indirect</i>	9
2.3. DONNEES CLIMATIQUES DU CAMBODGE.....	10
CHAPITRE 3 - VENTILATION.....	11
3.1. INTRODUCTION	11
3.2. RECHERCHES DES EQUATIONS	11
3.2.1. <i>Calcul du débit d'eau</i>	11
3.2.2. <i>Calcul du débit d'air sec</i>	12
CHAPITRE 4 - EFFET DE SERRE	13
4.1. ÉTUDE DE L'EFFET DE SERRE.....	13
4.1.1. <i>Modélisation du système et notations</i>	13
4.1.2. <i>Modélisation du problème</i>	14
4.1.3. <i>Hypothèses simplificatrices</i>	14
4.1.4. <i>Mise en équation</i>	15
4.1.5. <i>Calcul du coefficient d'échange de chaleur et corrélations</i>	15
Convection naturelle :	16
Convection forcée :	16
4.2. BLOC LOGICIEL DE L'EFFET DE SERRE.....	18
4.2.1. <i>Méthode de résolution des équations</i>	18
4.2.2. <i>Résolution des équations non linéaires</i>	18
CHAPITRE 5 - LOGICIEL.....	20
5.1. DIMENSIONNEMENT DU SECHOIR	20
5.2. TESTS DU CODE ET RESULTATS.....	20
Dans les conditions du FabLab (8h de séchage)	20
Dans les conditions du FabLab (5h de séchage)	21
Dans les conditions du Cambodge	21
CHAPITRE 6 - PROTOTYPE.....	23
6.1. INTRODUCTION	23

6.2. PREPARATION	23
6.2.1. Matériaux	23
Le bois.....	23
La plaque supérieure.....	24
La plaque inférieure	24
L'isolant	25
6.2.2. Forme.....	25
6.3. FABLAB.....	26
6.3.1. Découverte	26
6.3.2. Modification de la forme.....	26
6.3.3. Construction	26
6.3.4. Budget	26
6.4. PHOTOS DE L'AVANCEMENT DU PROTOTYPE.....	27
CHAPITRE 7 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL	30
7.1. OBJECTIFS	30
7.2. MATERIEL	30
7.2.1. Instruments de mesure.....	30
7.3. MODE OPERATOIRE.....	30
7.3.1. Méthodologie de prise de mesure.....	31
7.3.2. Mise en place du séchoir	31
7.3.3. Tests de puissance	31
7.3.4. Tests de séchage.....	32
7.3.5. Test des matériaux	32
7.4. RESULTATS	33
7.4.1. Premier test	33
7.4.2. Résultats : résumé des puissances calculées	33
7.4.3. Autres résultats	33
7.5. CONCLUSIONS	34
7.5.1. Conclusions générales	34
7.5.2. Comment procéder avec un séchoir sur le terrain.....	34
7.5.3. Matériaux	35
CHAPITRE 8 - FONCTIONNEMENT DU GROUPE	36
8.1. LES REUNIONS.....	36
8.1.1. Préparation.....	36
8.2. METHODE DE TRAVAIL.....	36
8.2.1. Répartition des tâches.....	36
8.2.2. Travail individuel	36
8.3. MOYENS DE COMMUNICATION	36
8.4. SWOT.....	37
Premier SWOT.....	37
Deuxième SWOT.....	37
8.5. GESTION	38
8.5.1. Temps	38
8.5.2. Tension dans le groupe.....	38
8.6. ENSEIGNEMENTS QUE NOUS AVONS TIRES DE LA GESTION DU GROUPE.....	38

CHAPITRE 9 - CONCLUSION	39
ANNEXE 1 - RESULTATS DES TESTS	40
9.1. TEST 14/02.....	40
9.2. TEST 19/02.....	41
9.3. TEST 26/02.....	42
9.4. TEST 27/02.....	43
9.5. TEST 5/03.....	44
9.6. TEST 6/03.....	46
ANNEXE 2 - PLANS DU SECHOIR	47
ANNEXE 3 - NOTATIONS	55
ANNEXE 4 - TABLES DE VALEURS.....	56
ANNEXE 5 - CODE DU LOGICIEL	57
Fichier 1 – Code principal	57
Fichier 2 – Effet_de_serre	63
Fichier 3 – Environnement	65
Fichier 4 – Ventilation	69
ANNEXE 6 - BIBLIOGRAPHIE	70

Chapitre 0 - Abstract

Dans le cadre du projet multidisciplinaire de première année à l’École Polytechnique de Bruxelles et en collaboration avec la CODEPO, nous avons conçu un séchoir à poivre dans le but de rendre autonomes les agriculteurs cambodgiens dans leur production de poivre de Kampot. Ce projet donne l’occasion à de futurs ingénieurs de trouver des solutions innovantes aboutissant à une contribution concrète. Il allie ainsi la modélisation des phénomènes physiques au travers d’un logiciel informatique à la construction d’un prototype fonctionnel. Tout d’abord, le travail a consisté en une recherche documentaire d’équations pour le logiciel ainsi que de la forme et des matériaux du prototype. Ces outils en main, nous avons pu créer le logiciel permettant de dimensionner le séchoir. C’est sur cette base qu’a été lancée la construction d’un prototype. Son amélioration s’est ensuite faite en parallèle de l’ajustement des équations par des tests expérimentaux.

Mots clés : séchoir solaire, poivre, Kampot, Cambodge, coopération au développement, écologie

In the context of our pluridisciplinary project of our first year at the Ecole Polytechnique de Bruxelles and in collaboration with the CODEPO, we were assigned to build a pepper dryer to expectantly help Cambodian farmers become more autonomous in respect of their Kampot pepper production. This project allowed future engineers to find innovative solutions to concretely contribute to society. It also highlighted the mingling of a modeling of physical phenomena through a software and a tangible and functional prototype. To begin with, this work consisted in a wide documentary research to mainly complete our software with equations along with the identification of the most optimal materials and form regarding the final prototype. All these considered, we developed a software to size the dryer. Then, the construction of the prototype was launched. Evidently, as we advanced, our experimental tests and the development of the equations improved the quality of the prototype.

Keywords : solar dryer, pepper, Kampot, Cambodia, development cooperation, ecology

Chapitre 1 - Introduction

1.1. Contexte

Le poivre de Kampot, du nom de la province cambodgienne dont il est originaire, a acquis sa renommée dans les grands restaurants français au cours du 19^e siècle. Cependant, en 1975, l'arrivée des khmers rouges dans le pays marque le début d'une période de violence et destruction, entraînant, à côté d'un génocide, la transformation des cultures de poivre en rizières. Au début des années 2000, la culture de poivre a repris, mais les techniques ancestrales et les moyens faisant défaut, sa rentabilité est loin d'être évidente pour les agriculteurs cambodgiens.^[1]

Le projet « Pepper Challenge » s'inscrit donc dans le cadre de l'augmentation de la rentabilité de la culture du poivre de Kampot pour les agriculteurs cambodgiens au travers du séchage. Ce séchage est une étape cruciale contrainte à des normes d'hygiène et requérant une source de chauffage efficace. Dans une logique économique et écologique, le séchoir conçu doit tout naturellement utiliser une ressource abondante au Cambodge : l'énergie solaire. Il doit également employer des matériaux à la fois durables, respectueux de l'environnement et peu chers.

1.2. Conception du séchoir

Le projet couvre trois aspects : la création d'un logiciel permettant de dimensionner le séchoir, la construction d'un prototype jointe à une démarche expérimentale et la réalisation de plans pour la construction du séchoir. Le logiciel a été, à son tour, découpé en trois blocs : environnement, ventilation et effet de serre. Il a aussi fallu réfléchir à la conception en elle-même du séchoir et tester le prototype construit pour le projet au moyen de la démarche scientifique.

Chapitre 2 - Environnement

2.1. Détermination des entrées et de sorties

Le bloc environnement est caractérisé par les données suivantes :

- Pression atmosphérique P_{atm} en Pa
 - Température ambiante T en K
 - Quantité d'énergie solaire captée E en J/m^2
 - Temps d'exposition au soleil t en secondes
 - Humidité relative HR en %
- ```
graph LR; P_atm["- Pression atmosphérique Patm en Pa"] --> Env[Environnement]; T["- Température ambiante T en K"] --> Env; E["- Quantité d'énergie solaire captée E en J/m2"] --> Env; t["- Temps d'exposition au soleil t en secondes"] --> Env; HR["- Humidité relative HR en %"] --> Env; Y["- Humidité absolue Y"] --> Env; Fd["- Flux solaires direct Fd et indirect Fi en W/m2"] --> Env;
```
- Humidité absolue  $Y$
  - Flux solaires direct  $F_d$  et indirect  $F_i$  en  $W/m^2$

## 2.2. Mise en place des équations

Maintenant que nous avons identifié les données et inconnues, il ne nous reste plus qu'à trouver les équations qui lient celles-ci entre-elles.

### 2.2.1. Équation de l'humidité absolue

Nous sommes partis du fait que, par définition,  $Y$  correspondait à la masse de vapeur d'eau par kg d'air sec<sup>[2]</sup>:

$$Y = \frac{m(H_2O)}{m(Airsec)} \quad (1)$$

où  $m(H_2O)$  est la masse d'eau en kg et  $m(Airsec)$  est la masse d'air sec en kg.

Ensuite, nous savons que :

$$m = n * M \quad (2)$$

où  $m$  est la masse,  $M$  la masse molaire et  $n$  le nombre de moles.

Nous obtenons donc cette première équation :

$$Y = \frac{n(H_2O) * M(H_2O)}{n(Airsec) * M(Airsec)} \quad (3)$$

La masse molaire de l'eau étant de 18,01528 g/mol et la masse molaire de l'air sec étant de 28,965 g/mol<sup>[3]</sup> nous obtenons donc :

$$\frac{M(H_2O)}{M(Airsec)} \approx 0,62 \quad (4)$$

Et

$$Y = 0,62 * \frac{n(H_2O)}{n(Airsec)} \quad (5)$$

Nous faisons l'hypothèse que l'air humide est un gaz parfait. Sur base de cette hypothèse, nous pouvons utiliser la loi des gaz parfaits :

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \quad (6)$$

Où n = le nombre de moles, P est la pression, V le volume, R la constante des gaz parfaits et T la température.

V, T et R sont les mêmes pour l'eau et l'air, donc ils se simplifient :

$$Y = 0,62 \cdot \frac{P_v}{P_{Airsec}} \quad (7)$$

Où  $P_v$  est la pression de vapeur d'eau, c'est-à-dire de l'eau contenue dans l'air en phase gazeuse, et  $P_{Airsec}$  est la pression de l'air sec.

L'atmosphère étant principalement composée d'air sec et de vapeur d'eau, la pression atmosphérique est la somme de la pression de l'air sec et de la pression de la vapeur d'eau. En effet, selon la loi de Dalton, la pression totale d'un système est la somme de ses pressions partielles.

$$\begin{aligned} P_{atm} &= P_v + P_{Airsec} \\ \Leftrightarrow P_{Airsec} &= P_{atm} - P_v \end{aligned} \quad (8)$$

On arrive finalement à l'équation<sup>[4,5]</sup> :

$$Y = 0,62 \cdot \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (9)$$

### 2.2.2. Équation de l'humidité relative

HR est l'humidité relative de l'air (adimensionnelle) calculée comme suit<sup>[6]</sup> :

$$HR = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \quad (10)$$

Avec  $P_v$  la pression de vapeur d'eau et  $P_{sat}(T)$  la pression de saturation de l'eau à une température T (valeur fournie par des tables).

D'après la loi de Clausius-Clapeyron,  $P_{sat}(T)$  s'exprime de la manière suivante<sup>[7]</sup> :

$$P_{sat}(T) = P_{sat}(T_{ref}) \cdot e^{-\frac{\Delta H_{vap}}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (11)$$

- Où  $T_{ref}$  est une température de référence, égale à 333.15 K
- $P_{ref}$  la pression de saturation de l'eau à la température de référence égale à 10000 Pa
- $\Delta H_{vap}$  (ou  $L_m$ ) la chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau, égale à 42440 J/mol
- R la constante des gaz parfaits, égale à 8.314 J/(mol\*K)<sup>[8]</sup>

### 2.2.3. Lien entre l'humidité relative et l'humidité absolue

Nous pouvons maintenant faire le lien entre l'humidité relative et l'humidité absolue.

(12)

$$HR = \frac{P_v}{P_{sat}(T)}$$

$$\Leftrightarrow HR \cdot P_{sat}(T) = P_v$$

$$\Rightarrow Y = 0,62 \cdot \frac{HR \cdot P_{sat}(T)}{P_{atm} - HR \cdot P_{sat}(T)}$$

### 2.2.4. Le flux direct

Le soleil est considéré comme un corps noir qui émet un rayonnement isotrope<sup>[9]</sup>. Cependant, à cause de la grande distance qui sépare la Terre du soleil, nous considérons les rayons parallèles. Dans nos calculs nous verrons toujours le soleil comme à son zénith, mais pour être plus rigoureux, nous aurions dû tenir compte de sa position qui change au cours de la journée, ce qui entraîne naturellement une variation sinusoïdale du flux direct (l'énergie solaire incidente sur une journée représente une fonction sinusoïdale qui dépend de l'heure de crépuscule et de l'aube). Nous introduisons ici une hypothèse simplificatrice en négligeant ces effets.

Nous avons donc décidé de considérer l'énergie solaire incidente comme constante (elle n'est rien d'autre que la moyenne d'énergie d'ensoleillement sur une journée). De plus, une seconde hypothèse simplificatrice a été considérée, à savoir celle d'un climat dit « idéal ». Cela signifie que le séchoir n'est utilisé que lorsque le ciel est dégagé et exposé au soleil durant toute la journée. L'équation simplifiée est donc celle-ci :

$$F_d = \frac{E}{\Delta t} \quad (13)$$

- Où  $E$  est le flux direct total pendant un jour en  $\text{W/m}^2$  et
- $\Delta t$  est le temps de clarté en secondes.

### 2.2.5. Le flux indirect

Le flux indirect résulte du rayonnement de l'atmosphère lui-même induit par le rayonnement direct du soleil. Le flux indirect a une plus grande longueur d'onde que le flux direct et est absorbé dans un premier temps par l'atmosphère pour être ensuite réémis vers la surface de la Terre sous forme de rayonnement infrarouge. Pour calculer ce flux indirect, on fait appel à l'équation de Stefan-Boltzmann<sup>[10]</sup> :

$$F_i = \sigma T_{sky}^4 \quad (14)$$

- Où  $F_i$  est le flux indirect,

- $\sigma$  la constante de Stephan Boltzmann qui vaut  $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^{[10]}$
- et  $T$  la température ambiante.

On peut estimer  $T_{\text{sky}}$  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.

Le tout donnera  $T_{\text{sky}}$  en kelvin : <sup>[11]</sup>

$$T_{\text{sky}} = T_a \left( 0,711 + 0,0056T_r + 7,3 \cdot 10^{-5}T_r^2 + 0,013 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \right)^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

Dans cette équation, nous avons choisi de négliger le  $\cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right)$ , car étant très petit, on l'approxime à 0. Le terme  $0,013 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right)$  est donc supprimé de l'équation pour éviter de complexifier les calculs.

La température de rosée  $T_r$  correspond à la température à laquelle l'humidité relative vaut 1 et donc la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air est égale à la pression de saturation en eau de l'air.  $T_r$  peut dès lors être déterminé grâce à l'équation (11), par l'équation (16).

$$T_r = \frac{\Delta H_{\text{vap}} T}{\Delta H_{\text{vap}} - RT \ln(HR)} \quad (16)$$

## 2.3. Données climatiques du Cambodge

Il est nécessaire de récupérer 3 données climatiques propres au Cambodge pour une période allant de Janvier à Mars<sup>[12]</sup> :

- Température moyenne : 30°C
- Énergie d'ensoleillement moyenne : 19,6 MJ/m<sup>2</sup>
- Humidité relative : 70 à 80 %

# Chapitre 3 - Ventilation

## 3.1. Introduction

Le bloc ventilation a pour but de calculer un débit d'air sec. Ce débit permet d'atteindre une température constante de 65°C ainsi qu'une humidité relative qui, d'après le cahier de charges, ne peut pas dépasser les 20% dans le cas du prototype ou 30% pour le séchoir sur le terrain.

Il existe plusieurs types de ventilation, mais certains, tels que la ventilation passive, ne correspondent pas à l'utilisation faite dans ce projet car ils sont trop petits et peu adaptés. Ce genre de ventilation est généralement utilisée dans l'industrie.

- Masse d'eau initiale par kg de matière sèche
- Masse d'eau finale par kg de matière sèche
- Masse de totale initiale en **kg**
- Humidité absolue ambiante  **$Y_{amb}$**
- Humidité absolue maximale  **$Y_{max}$**



## 3.2. Recherches des équations

Le bloc ventilation doit donner en output un débit dont les unités sont des kilogrammes d'air sec par seconde que l'on note  $Q$ . Un premier input est le débit de vapeur d'eau noté  $J$ . Se pose alors la question de ce qu'il faut faire pour transformer le débit de vapeur sortant en débit d'air sec entrant dans le séchoir.

### 3.2.1. Calcul du débit d'eau

Pour calculer le débit de vapeur d'eau, nous devons établir des équations de bilan grâce aux informations données dans le cahier des charges. Connaissant les équations de masse initiale et finale du poivre :

$$M_{p \text{ initiale}} = M_{eau \text{ initiale}} + M_{matière sèche} \quad (17)$$

$$M_{p \text{ finale}} = M_{eau \text{ finale}} + M_{matière sèche}$$

La fraction massique initiale est la masse d'eau initiale divisée par la masse de matière sèche et la fraction massique finale est la masse d'eau finale divisée par la masse de matière sèche.

$$X_i = \frac{M_{eau \text{ initiale}}}{M_{matière sèche}} \quad (18)$$

$$X_f = \frac{M_{eau \text{ finale}}}{M_{matière sèche}}$$

Le cahier des charges donne une fraction massique initiale  $X_i$  de 3 kg d'eau par kg de matière sèche et une fraction massique finale  $X_f$  de 0,1 kg d'eau par kg de matière sèche. C'est ainsi qu'un lien peut être établi entre les masses d'eau, la masse de matière sèche et la masse totale. Cela permet donc de connaître les masses initiale et finale du poivre en fonction de la masse de matière sèche.

$$M_{eau \text{ initiale}} = \frac{X_i * M_p \text{ initiale}}{X_i + 1} \quad (19)$$

$$M_{eau \text{ finale}} = \frac{X_f * M_p \text{ initiale}}{X_i + 1}$$

Le cahier des charges donne également une information sur le séchage : sa durée ne doit pas dépasser 8 heures. Le débit de vapeur d'eau minimal  $J$  est calculé par la différence entre la masse d'eau initiale et la masse d'eau finale divisée par le temps maximal de séchage :

$$\frac{\Delta M_{eau}}{\Delta t_{\text{séchage}}} = \frac{M_{eau \text{ initiale}} - M_{eau \text{ finale}}}{\Delta t_{\text{séchage}}} = J \left[ \frac{\text{kg}_{\text{eau}}}{\text{s}} \right] \quad (20)$$

### 3.2.2. Calcul du débit d'air sec

Il ne reste désormais plus qu'à trouver comment transformer ce débit de vapeur d'eau en débit d'air sec. Pour cela il faut, grâce à l'équation (12) du bloc environnement, passer des humidités relatives, qui ne sont que des pourcentages donnés par le cahier des charges, à des humidités absolues fournissant de réelles masses d'eau. Valeurs à utiliser pour calculer l'humidité absolue maximale et ambiante :

| Variable     | Humidité absolue ambiante                                                                            | Humidité absolue maximale                                                                |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $HR$         | L'humidité relative de l'endroit où se trouve le séchoir                                             | L'humidité relative maximale que l'on peut atteindre (donnée par cahier des charges)     |
| $P_{sat}(T)$ | La pression de saturation de la température de l'endroit où se trouve le séchoir (cf. équation (11)) | La pression de saturation de la température que l'on veut atteindre (cf. équation (11)). |
| $P_{atm}$    | La pression atmosphérique où se trouve le séchoir                                                    |                                                                                          |

Pour obtenir un débit d'air sec, il suffit alors de diviser le débit de vapeur d'eau par la différence entre l'humidité absolue maximale tolérée dans le séchoir et l'humidité absolue ambiante extérieure<sup>[13]</sup>. Il est important de réaliser tous ces calculs dans les conditions de fonctionnement du séchoir (en veillant au fait que l'on se trouve dedans ou à l'extérieur). Nous obtenons ici un débit minimal car il s'agit comme mentionné précédemment d'un  $J$  minimal.

$$\frac{J}{\Delta Y} = \frac{J}{Y_{max} - Y_{amb}} \leq Q \quad (21)$$

# Chapitre 4 - Effet de serre

La modélisation de l'effet de serre a pour objectif de calculer la puissance que peut développer notre séchoir à poivre. C'est la seule source de puissance qui alimente le séchoir. Elle occupe donc un rôle central dans son dimensionnement et sa conception.

- Température que l'on veut atteindre  $T$  en  $K$
  - Flux solaires direct  $F_d$  et indirect  $F_i$  en  $W/m^2$
  - Longueur  $L$  et largeur  $l$  de la section de la boîte en  $m$
  - Caractéristiques physiques de l'air dans les conditions de chauffage
- The diagram consists of a central rectangular box containing the text "Effet de serre". Two arrows point towards this box from the left and right respectively. One arrow points to the left with the text "- Température que l'on veut atteindre  $T$  en  $K$ ". The other arrow points to the right with the text "- Puissance  $P$  par mètre carré que peut développer le séchoir en  $W/m^2$ ".

## 4.1. Étude de l'effet de serre

Pour chauffer l'air entrant, le séchoir utilise un capteur solaire thermique fonctionnant sur le principe de l'effet de serre. Le séminaire du 25 octobre 2018 par Benoit Haut nous a permis d'en apprendre davantage sur ce phénomène et de modéliser notre capteur solaire comme suit. [11]

### 4.1.1. Modélisation du système et notations

Dans les équations et schémas suivants, nous utiliserons une série de notations pour décrire le système de la serre. Nous avons donc :

- $S$  et  $P$  : respectivement le sol et le plastique transparent composant les deux parois horizontales de la serre.
- $L$  et  $H$  : respectivement la longueur et la hauteur de la section en  $m$  de la boîte (voir FIGURE 1 : VUE EN COUPE DE LA SECTION DE LA BOÎTE DE CHAUFFAGE).
- $T$  : la température en  $K$  du fluide qui circule dans la boîte.
- $Q$  : le flux d'air en  $\frac{m^3}{s}$  qui traverse la section de la serre.
- $F_d$  : le flux solaire direct en  $\frac{W}{m^2}$ .
- $F_i$  : le flux solaire indirect en  $\frac{W}{m^2}$  que nous avons déterminé grâce au bloc environnement.
- $T_s$  : la température en  $K$  au sol de la boîte.
- $T_p$  : la température en  $K$  sur le plastique transparent recouvrant la boîte.
- $F_s$  : le rayonnement en  $\frac{W}{m^2}$  émis par le sol de la serre que nous déterminerons grâce à l'équation du corps noir. Celui-ci n'atteint que le plastique transparent car il s'agit d'un rayonnement infrarouge.
- $F_p$  : le rayonnement en  $\frac{W}{m^2}$  émis par le plastique à la fois vers l'intérieur et l'extérieur de la serre. En effet, le phénomène du rayonnement est isotrope, c'est-à-dire qu'il se propage de la même manière dans toutes les directions.
- $h$  : le coefficient d'échange thermique en  $\frac{W}{m^2K}$ . Il joue un rôle central dans les mouvements de convection et va fortement dépendre du choix de type de convection.

#### 4.1.2. Modélisation du problème

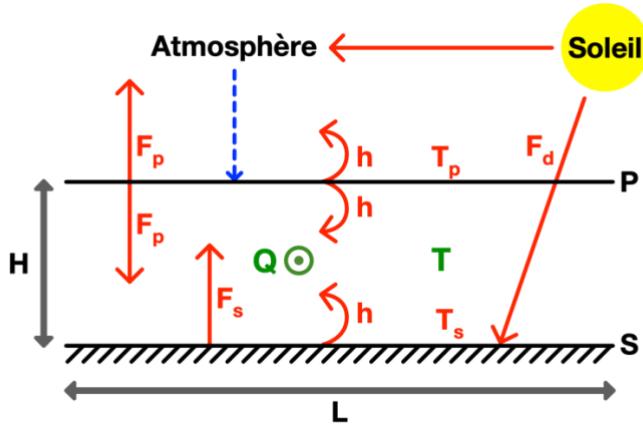


FIGURE 1 : VUE EN COUPE DE LA SECTION DE LA BOITE DE CHAUFFAGE

Nous considérons deux plaques : la paroi transparente et le sol de la serre, entre lesquelles circule un flux d'air qui est progressivement chauffé par effet de serre, transferts de chaleur et convection.

#### 4.1.3. Hypothèses simplificatrices

Sans simplifications, le problème devient rapidement complexe : échanges thermiques, rayonnements, gradients de température, mouvements de fluides extérieurs et intérieurs au système, etc. C'est dans cette optique nous avons introduit plusieurs hypothèses simplificatrices :

- La seule perte que nous considérons est celle due au rayonnement du plastique vers l'extérieur. Nous supposons donc que les parois sont parfaitement isolées. De même nous négligeons le coefficient  $h'$  (d'application sur la partie extérieure du plastique) car celui-ci n'est pas significatif et bien trop difficile à prévoir : vent, température et autres éléments extérieurs. La seule source de perte que nous prenons en compte est  $F_p$  dirigé vers l'extérieur.
- Nous considérons un  $h$  identique pour la paroi en plastique et pour le sol. En réalité, ils seraient différents, mais trop peu pour justifier l'effort de modélisation face à l'envergure du projet. Pour approximer le meilleur  $h$  possible, nous utilisons une moyenne de  $T_p$  et  $T_s$ .
- Nous négligeons les effets de bord. Nous nous permettons cette simplification en raison de la petite hauteur de la boîte face à sa largeur, ou plus exactement, en raison du faible flux solaire atteignant les parois verticales, en comparaison avec la large paroi horizontale.
- L'échauffement de l'air dû au rayonnement est si faible qu'on peut totalement le négliger (cela ne sera pas démontré ici).
- Nous considérons des valeurs constantes tout le long du séchoir. Des méthodes plus avancées permettent de faire intervenir une décomposition infinitésimale dans la longueur du séchoir.

La validité de ces hypothèses peut être vérifiée par l'expérimentation (voir Chapitre 7 - Protocole expérimental).

#### 4.1.4. Mise en équation

Le coefficient d'échange thermique  $h$  nous permet de trouver la puissance dissipée sur une surface de paroi grâce à l'équation  $P = h(T_W - T)$  avec  $P$  la puissance en  $\frac{W}{m^2}$ ,  $T_W$  la température de la paroi et  $T$  la température ambiante. En additionnant la contribution du sol et du plastique, on obtient :

$$P = h(T_P - T) + h(T_S - T) \quad (22)$$

La paroi au sol et le plastique chauffés par le rayonnement solaire se comportent comme des corps noirs. Ils émettent donc à leur tour un rayonnement lorsqu'ils sont chauffés. Ces rayonnements peuvent être trouvés grâce à l'équation du corps noir :  $F = \sigma T^4$ . Nous ne rentrerons pas davantage dans les détails de cette équation en raison de sa grande complexité. Dès lors, deux équations peuvent être écrites :

$$F_S = \sigma T_S^4 \quad (23)$$

$$F_P = \sigma T_P^4 \quad (24)$$

L'effet de serre est bien sûr causé par le rayonnement solaire. Pour prendre en compte cette variable essentielle, nous introduisons deux équations de bilan. Celles-ci peuvent simplement être énoncées par le principe de conservation de l'énergie.

La première est un bilan d'énergie global. Elle représente donc le fait que la puissance entrante dans la serre (flux solaire direct et indirect) est égale à la puissance sortante de celle-ci.

$$F_d + F_i = P + F_P \quad (25)$$

La seconde est aussi un bilan d'énergie, mais ne concerne que la paroi du fond de la serre.

$$F_d + F_P = F_S + h(T_S - T) \quad (26)$$

A partir de ces 5 équations à 5 inconnues, nous pouvons déduire un système de 3 équations à 3 inconnues. Celui-ci n'étant pas linéaire, nous ne pouvons pas le résoudre par la méthode de Gauss. Nous discuterons de la méthode employée dans la partie « Méthode de résolution des équations ».

#### 4.1.5. Calcul du coefficient d'échange de chaleur et corrélations

La convection est le phénomène de transfert de chaleur dans un fluide par le mouvement de ce dernier. Ainsi, il existe deux types de convection : les convections naturelle et forcée. La première engendre un transfert de chaleur dû aux conditions naturelles (flux solaires) et la seconde est due aux contraintes posées par un système artificiel. De manière générale, comme nous l'avons vu ci-dessus, la chaleur de convection est donnée par la formule suivante :

$$q_{convection} = h\Delta T \quad (27)$$

Le calcul du coefficient d'échange thermique n'étant pas direct (nous ne connaissons pas la différence de température entre la paroi et le fluide en approche), nous allons devoir procéder à une étude de corrélations. Ce sont des nombres sans unités donnés par des formules empiriques qui nous

permettront de résoudre l'ensemble des équations sur base des paramètres du système (dimensions, températures, etc). Afin de mettre en évidence les différentes applications de ces corrélations, nous avons établi un tableau comparatif (non-exhaustif) des deux cas de convection que nous pourrions rencontrer dans le séchoir [11] :

(Des valeurs numériques que nous avons trouvées se situent dans la partie 5.2 Tests du code et résultats)

#### CONVECTION NATURELLE :

(28)

|                                  |                                                                                |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forme</b>                     | Surface plane (2 plaques semi-infinies)                                        |
| <b>Type de flux</b>              | Laminaire                                                                      |
| <b>Équations associée(s)</b>     | $h = f_n(k, T_w - T_{amb}, x)$<br>$h = f_n(L, \nu, \alpha, g, \beta)$          |
| <b>Nombre de Nusselt général</b> | $Nu_L = h \frac{L}{k} = \frac{QL}{k\Delta T}$ avec $L = \frac{2ab}{a+b}$       |
| <b>Nombre de Prandtl</b>         | $Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \nu\rho \frac{C_p}{k} = \frac{\mu Q}{km\Delta T}$   |
| <b>Nombre de Rayleigh</b>        | $Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu}$                                     |
| <b>Nombre de Nusselt</b>         | $Nu_L = 0,14Ra_L^{\frac{1}{3}} \left( \frac{1 + 0,0107Pr}{1 + 0,01Pr} \right)$ |

#### CONVECTION FORCÉE :

(29)

|                                  |                                                                                  |                                                                                    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forme</b>                     | Cylindrique                                                                      | Surface plane                                                                      |
| <b>Type de flux</b>              | Laminaire                                                                        | Laminaire                                                                          |
| <b>Équation(s) associée(s)</b>   | $fn(Re_D) = \frac{Xe}{D} = 0.03Re_D$<br>$h = fn(D, k)$<br>$h = \frac{Nu_D k}{D}$ | $h = fn(x, k, \rho, C_p, u)$<br>$h = Nu_L \frac{k}{L}$<br>où $L = \frac{2ab}{a+b}$ |
| <b>Nombre de Reynolds</b>        | $Re_D = \frac{u_a v D}{\nu}$<br>$\frac{Xe}{D} = 0.03Re_D \frac{Xe}{D}$           | $Re_D = \frac{u_a v D}{\nu}$<br>$= \frac{\rho V D}{\mu}$                           |
| <b>Nombre de Nusselt général</b> | $Nu_{D,q} = \frac{q_w D}{(T_w - T_{amb})k} = \frac{hD}{k}$                       | $Nu_L = \frac{hL}{k}$                                                              |
| <b>Nombre de Prandtl</b>         | $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$                                                        | $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$                                                          |

|                          |                                                                                                                                         |                                                    |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Nombre de Nusselt</b> | $Nu_D = \frac{0,3387 Re_D^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,0468}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}}$ | $Nu_L = 0,332 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$ |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|

Nous admettons comme hypothèses simplificatrices que les deux plaques sont de longueur infinie et que l'écoulement est laminaire (le flux rentrant reste constant et ne se dirige que vers une seule direction). De plus, puisque le ventilateur utilisé a un débit relativement faible, l'effet de la convection forcée est négligeable et nous ne tiendrons compte que de celui de la convection naturelle. Nous pouvons aisément le montrer en comparant les deux  $h$ .

En utilisant la corrélation du nombre de Nusselt (pour une surface plane) décrite par les nombres Prandtl et Reynolds et en fixant comme température 300 K (approximation de la moyenne de température dans la longueur du séchoir) pour utiliser les données de l'Annexe 4 - , nous arrivons à un  $h$  de 0,0039. Il est évident que celui-ci est négligeable par rapport au  $h$  attendu de la convection naturelle. Nous négligerons ainsi complètement les mouvements de convection forcée engendrés par le ventilateur.

De même, pour la convection naturelle, nous prenons les nombres de Prandtl, Rayleigh et Nusselt *dans le tableau (28)*, car ceux-ci suffisent au calcul du coefficient d'échange thermique  $h$ .

- Nombre de Nusselt :  $Nu = 0,14 Ra_L^{\frac{1}{3}} \left( \frac{1+0,0107Pr}{1+0,01Pr} \right)$  et  $Nu_D = \frac{h*L}{k}$

Le nombre de Nusselt permet de comparer la conduction à la convection de chaleur dans le fluide.

Il est en général celui sur lequel on s'appuie pour résoudre des problèmes de convection puisqu'il met directement en évidence le coefficient d'échange thermique en relation avec la longueur caractéristique et la conductivité thermique. Nous remarquons que le nombre de Nusselt dépend majoritairement des nombres de Rayleigh et de Prandtl. Ce sont des approximations de ces dites "corrélations".

Cette corrélation ci-dessus n'est valable que pour des nombres de Rayleigh d'ordre de grandeur compris entre  $10^7$  et  $2*10^{11}$ .

- Nombre de Prandtl :  $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

Le nombre de Prandtl met en lien la viscosité du fluide à sa conductivité thermique. Ce nombre est une propriété intrinsèque à chaque fluide. Il ne dépend donc que du fluide en question.

- Nombre de Rayleigh :  $Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu}$

Le nombre de Rayleigh est décrit par un grand nombre de grandeurs thermodynamiques. Il définit le transfert de chaleur. Si ce nombre est inférieur à 2000, le transfert de chaleur se fait par conduction, sinon, c'est la convection naturelle qui s'opère.

Dans ces corrélations ci-dessus, nous retrouvons les constantes suivantes :

- g (accélération gravifique d'environ 9,81 m/s<sup>2</sup>)

Les variables :

- L : la longueur caractéristique, dans notre cas,  $L = \frac{2ab}{a+b}$  avec a, la largeur de la section de la boîte et b la hauteur. Il s'agit alors d'un diamètre hydraulique, puisque représentant un « tuyau ». Il est en fait donné par une formule générale :  $D_h \equiv \frac{4A_c}{P}$  avec  $D_h$  le diamètre hydraulique,  $A_c$  l'aire de la section du tuyau et P son périmètre.
- $\Delta T$  : différence de température entre la paroi et le fluide

D'autres constantes dépendent de la température (nous approchons la température à 340 K, température représentative des caractéristiques de l'air dans le séchoir) :

- k : conductivité thermique du fluide en  $\frac{W}{m.K}$  Celle-ci mesure la manière dont le fluide conduit la chaleur.
- v : viscosité cinétique  $\frac{m^2}{s}$  C'est l'ensemble des résistances à l'écoulement du fluide (celui-ci est incompressible).
- $\beta$  : coefficient d'expansion thermique = température inverse =  $\frac{1}{T}$  en  $K^{-1}$
- $\alpha$  : diffusivité thermique en  $\frac{m^2}{s}$  C'est la manière dont la chaleur se diffuse dans le fluide.

Nous utilisons les valeurs thermodynamiques disponibles en annexe.

Ces constantes, ont également été trouvées dans le code, par l'intermédiaire du module python « `scipy.constants` ».

## 4.2. Bloc logiciel de l'effet de serre

### 4.2.1. Méthode de résolution des équations

A l'aide du module `scipy.optimize`, nous avons commencé par coder le système de 5 équations à 5 inconnues en utilisant une approximation de la valeur de h fournie par Benoît Haut lors du séminaire sur l'effet de serre. Cela nous a permis de vérifier nos équations et corriger les premiers problèmes.

Dans un second temps, nous avons créé un programme utilisant le même module, capable d'estimer la valeur du h à partir d'une approximation du  $\Delta T$  (voir plus haut pour plus de détails).

Finalement, nous avons décidé d'introduire toutes les équations et corrélations dans le même programme. Cela peut poser problème dans la mesure où les valeurs peuvent devenir infiniment grandes ou petites dans le système et empêcher la résolution par la méthode utilisée par le module `scipy`. Cependant, cette approche possède un grand avantage : elle permet d'obtenir des valeurs très précises et facilitent grandement le travail d'approximation et d'injection d'erreur permettant autrement de trouver la valeur du h.

### 4.2.2. Résolution des équations non linéaires

La plus grande difficulté dans la résolution des équations réside dans le fait qu'elles ne sont pas linéaires. Il est alors impossible d'utiliser les méthodes de résolution des systèmes linéaires. Le module

*scipy.optimize.root()* fournit une fonction permettant de calculer les racines de ce genre de système. Pour cela, elle calcule des points et tente de se rapprocher des endroits où se trouvent les racines. Afin de commencer cette recherche, il faut fournir un vecteur contenant des valeurs de départ. Après différents tests, nous avons conclu qu'un vecteur rempli de 1, sauf pour la valeur du  $h$  qui a été mise à 4, permet de rendre le calcul des racines très fiable dans des cas d'utilisation normale (avec des valeurs réalistes) du logiciel.

# Chapitre 5 - Logiciel

## 5.1. Dimensionnement du séchoir

Nous ne pouvons pas dimensionner le séchoir à partir des équations trouvées dans les parties précédentes. En effet, nous n'obtenons qu'une puissance par mètre carré avec la partie « effet de serre » et nous ne décidons que des dimensions de la section. Il reste donc à trouver la longueur permettant d'atteindre la puissance nécessaire au séchage voulu. Pour faire cela, il nous faut établir un bilan d'énergie final. Nous le basons sur l'expression de l'énergie totale fournie par la serre qui doit égaler l'énergie nécessaire à deux phénomènes :

- L'échauffement de l'eau contenue dans le poivre
- L'évaporation de cette l'eau

$$P.L.l = J.\Delta H_{vap} + Q.C.\Delta T \quad (30)$$

Avec  $\Delta H_{vap}$  l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau à 340 K (température que doit atteindre l'intérieur du séchoir).

## 5.2. Tests du code et résultats

### DANS LES CONDITIONS DU FABLAB (8H DE SÉCHAGE)

| Données                                             | Valeurs de retour                         |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Température à atteindre = 65 + 273.15 K             | <b>Longueur = 0.67 m</b>                  |
| Température ambiante = 20 + 273.15 K                | J = 1.259e-05 kg/s                        |
| a = 0.3 m                                           | Q = 0.00049525 kg/s                       |
| b = 0.2 m                                           | Débit = 0.000421 m <sup>3</sup> /s        |
| Flux direct moyen = 900 W/m <sup>2</sup>            | Débit = 0.025246 m <sup>3</sup> /min      |
| Flux indirect estimé = 100 W/m <sup>2</sup>         | Débit = 1.515 m <sup>3</sup> /h           |
| Humidité relative ambiante = 45 %                   | Débit = 0.335 m/s                         |
| Masse de l'aliment = 0.5 kg                         | Yamb = 0.006883 kg d'eau par kg d'air sec |
| Masse d'eau par kg de matière sèche initiale = 3 kg | Ymax = 0.032298 kg d'eau par kg d'air sec |
| Masse d'eau par kg de matière sèche finale = 0.1 kg | Fd = 900 W/m <sup>2</sup>                 |
| Temps de séchage = 8 h                              | Fi = 100 W/m <sup>2</sup>                 |
| Humidité relative maximale = 20 %                   | P = 260.6 W/m <sup>2</sup>                |
|                                                     | Puissance théorique totale = 52.02 W      |
|                                                     | Ts = 394.8 K = 121.7 °C                   |
|                                                     | Tp = 337.9 K = 64.8 °C                    |
|                                                     | Fs = 1377.8 W/m <sup>2</sup>              |
|                                                     | Fp = 739.4 W/m <sup>2</sup>               |
|                                                     | Ra = 20555656                             |
|                                                     | Nu = 38.369                               |
|                                                     | h = 4.62                                  |

### DANS LES CONDITIONS DU FABLAB (5H DE SÉCHAGE)

| Données                                             | Valeurs de retour                                      |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Température à atteindre = $65 + 273.15 \text{ K}$   | Longueur = 1.06 m                                      |
| Température ambiante = $20 + 273.15 \text{ K}$      | $J = 2.014e-05 \text{ kg/s}$                           |
| $a = 0.3 \text{ m}$                                 | $Q = 0.00079239 \text{ kg/s}$                          |
| $b = 0.2 \text{ m}$                                 | Débit = $0.000673 \text{ m}^3/\text{s}$                |
| Flux direct moyen = $900 \text{ W/m}^2$             | Débit = $0.040394 \text{ m}^3/\text{min}$              |
| Flux indirect estimé = $100 \text{ W/m}^2$          | Débit = $2.424 \text{ m}^3/\text{h}$                   |
| Humidité relative ambiante = 45 %                   | Débit = $0.536 \text{ m/s}$                            |
| Masse de l'aliment = 0.5 kg                         | $Y_{amb} = 0.006883 \text{ kg d'eau par kg d'air sec}$ |
| Masse d'eau par kg de matière sèche initiale = 3 kg | $Y_{max} = 0.032298 \text{ kg d'eau par kg d'air sec}$ |
| Masse d'eau par kg de matière sèche finale = 0.1 kg | $F_d = 900 \text{ W/m}^2$                              |
| Temps de séchage = 8 h                              | $F_i = 100 \text{ W/m}^2$                              |
| Humidité relative maximale = 20 %                   | $P = 260.6 \text{ W/m}^2$                              |
|                                                     | Puissance théorique totale = 83.23 W                   |
|                                                     | $T_s = 394.8 \text{ K} = 121.7 \text{ }^\circ\text{C}$ |
|                                                     | $T_p = 337.9 \text{ K} = 64.8 \text{ }^\circ\text{C}$  |
|                                                     | $F_s = 1377.8 \text{ W/m}^2$                           |
|                                                     | $F_p = 739.4 \text{ W/m}^2$                            |
|                                                     | $R_a = 20555656$                                       |
|                                                     | $N_u = 38.369$                                         |
|                                                     | $h = 4.62$                                             |

### DANS LES CONDITIONS DU CAMBODGE

| Données                                           | Valeurs de retour                                      |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Température à atteindre = $65 + 273.15 \text{ K}$ | <b>Longueur = 8.76 m</b>                               |
| $a = 1.5 \text{ m}$                               | $J = 0.00025174 \text{ kg/s}$                          |
| $b = 0.2 \text{ m}$                               | $Q = 0.00916146 \text{ kg/s}$                          |
| Température ambiante = $30 + 273.15 \text{ K}$    | Débit = $0.007784 \text{ m}^3/\text{s}$                |
| Énergie solaire = 19.6 MJ                         | Débit = $0.467024 \text{ m}^3/\text{min}$              |
| Temps d'ensoleillement = 12 h                     | Débit = $28.021 \text{ m}^3/\text{h}$                  |
| Humidité relative ambiante = 80 %                 | Débit = $6.194 \text{ m/s}$                            |
| Masse de l'aliment = 0.5 kg                       | $Y_{amb} = 0.022265 \text{ kg d'eau par kg d'air sec}$ |
| Masse d'eau par matière sèche initiale = 3 kg     | $Y_{max} = 0.049743 \text{ kg d'eau par kg d'air sec}$ |
| Masse d'eau par matière sèche finale = 0.1 kg     | $F_d = 453.7 \text{ W/m}^2$                            |
| Temps de séchage = 16 h                           | $F_i = 289.1 \text{ W/m}^2$                            |
| Humidité relative maximale = 30 %                 | $P = 69.6 \text{ W/m}^2$                               |
|                                                   | Puissance théorique totale = 914.16 W                  |
|                                                   | $T_s = 367.2 \text{ K} = 94.0 \text{ }^\circ\text{C}$  |
|                                                   | $T_p = 330.1 \text{ K} = 56.9 \text{ }^\circ\text{C}$  |

|      |                         |
|------|-------------------------|
| Fs = | 1030.6 W/m <sup>2</sup> |
| Fp = | 673.2 W/m <sup>2</sup>  |
| Ra = | 24282620                |
| Nu = | 40.561                  |
| h =  | 3.32                    |

# Chapitre 6 - Prototype

## 6.1. Introduction

Nous avons commencé à penser au prototype dès le début du projet en parallèle des autres blocs pour envisager sa construction au plus vite.

## 6.2. Préparation

### 6.2.1. Matériaux

Notre première préoccupation a été de choisir les matériaux. Pour cette étape cruciale dans le développement concret du séchoir, nous avons mené une enquête comparative des différentes options qui s'offrent à nous.

#### LE BOIS

Le bois est le composé principal de notre prototype. Nous offrant un large panel de choix, ce matériel concentre de nombreux avantages. Bon isolant, facilement disponible et pour un budget raisonnable, le bois correspond parfaitement à l'optique d'un projet écologique. Nous utiliserons donc du bois avec un label FSC, garantissant sa provenance de coupes responsables.<sup>[14]</sup>

Le bois contreplaqué est à éviter, même s'il est plus résistant, il est composé de colle chimique qui pourrait entrer en conflit avec les normes alimentaires du poivre. Les vernis pour protéger le bois seront donc aussi mis à l'écart.

En revanche une protection contre l'humidité doit être envisagée en raison du climat cambodgien (voir 2.3 Données climatiques du Cambodge). Pour cela, il existe de nombreux produits comme des vernis ou huiles dans les grandes surfaces, mais ceux-ci sont non-conformes aux normes alimentaires et non-écologiques. Il faudrait donc favoriser une méthode naturelle pour protéger le bois. Nous avons envisagé d'utiliser de la cire d'abeille liquide, facilement trouvable au Cambodge (en effet de nombreuses bougies en cire d'abeille sont utilisées lors des cérémonies traditionnelles comme les mariages). Sinon, l'huile de lin est aussi très bénéfique pour le bois : elle le protège contre l'humidité et les insectes. Pour diluer l'huile, il faut utiliser de l'essence de térébenthine (très bon solvant) : cela permet une meilleure imprégnation de l'huile de lin dans le bois.<sup>[15]</sup>

Pour minimiser notre budget, nous avons donc décidé de prendre directement un bois résistant à l'humidité (tableaux comparatifs des différents bois résistants à l'humidité) :<sup>[16]</sup>

#### Bois européens :

| Type de bois/<br>caractéristiques | Résistance<br>à l'eau | Dureté      | Durabilité   | Prix<br>(€/m <sup>2</sup> ) | Facilité de<br>travail |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------|--------------|-----------------------------|------------------------|
| Chêne                             | Oui                   | Très<br>dur | Très durable | ?                           | Assez facile           |

|                 |     |           |               |    |              |
|-----------------|-----|-----------|---------------|----|--------------|
| <i>Frêne</i>    | Oui | Assez dur | Assez durable | 25 | Facile       |
| <i>Épicéa</i>   | Oui | Assez dur | Assez durable | 25 | Assez facile |
| <i>Peuplier</i> | Oui | Très dur  | Très durable  | 25 | Difficile    |

#### Bois exotiques :

| Type de Bois/<br>Caractéristiques | Résistance<br>à l'eau | Dureté    | Durabilité    | Prix<br>(€/m <sup>2</sup> ) | Facilité de<br>travail    |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------|---------------|-----------------------------|---------------------------|
| <i>Iroko</i>                      | Oui                   | Assez dur | Non-durable   | 30                          | Difficile à découper      |
| <i>Teck</i>                       | Oui                   | Assez dur | Assez durable | 25                          | Facile                    |
| <i>Bambou</i>                     | Oui                   | Dur       | Très durable  | 15                          | Flexible donc très facile |
| <i>Wengé</i>                      | Oui                   | Très dur  | Très durable  | 30                          | Besoin d'outil solides    |

Légende:  : notre choix au FabLab

 : notre choix pour le Cambodge

Nous retenons le bambou car c'est un bois poussant au Cambodge, ce qui sera bénéfique à l'économie locale. Ce bois n'étant pas disponible au FabLab, nous retenons cette idée pour le Cambodge. De par ce choix, une protection supplémentaire ne sera pas nécessaire.

#### LA PLAQUE SUPÉRIEURE

Celle-ci pourrait se composer d'une plaque en verre ou en plexiglass. Le verre est un matériel fragile et difficile à manier. Notre choix se portera donc plutôt vers le film plastique en PVC, malgré ses origines pétrolières, puisque celui-ci est facilement trouvable et permet le passage de la lumière tout en gardant des propriétés d'isolant.

#### LA PLAQUE INFÉRIEURE

Ce sera une surface de couleur noire qui absorbe les rayons directs du soleil pour émettre un rayonnement thermique, ce qui nous permettra d'atteindre plus vite la température de séchage souhaitée. L'idée de base était de peindre en noir la surface inférieure de la boîte. En effet, des bombonnes de peintures sont disponibles au FabLab. Considérant le problème de la pollution, nous nous sommes dirigés vers d'autres méthodes. La manière la plus simple et la plus écologique serait de prendre du papier, mais celui-ci risque de brûler et va s'onduler à cause de l'humidité. Le textile semble finalement faire l'affaire : le polyester est la fibre synthétique la plus résistante à la chaleur.

Une alternative serait le coton qui est la fibre naturelle la plus utilisée dans le monde et présente d'intéressantes propriétés.

## L'ISOLANT

Pour éviter les pertes de chaleur, notre prototype nécessite une bonne isolation. La plus grande perte d'énergie se fait par le sol, c'est pour cela que nous avons décidé d'utiliser de la ouate de cellulose. Cependant, nous avons eu des difficultés à obtenir ce matériau et avons finalement opté pour des morceaux d'isolants d'XPS en partie récupéré.<sup>[17,18]</sup>

| Type d'isolant/<br>caractéristiques | Conductivité<br>thermique (W/m <sup>2</sup> ) | Prix<br>(€/m <sup>2</sup> ) | Isolation                  |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <i>Fibre de bois</i>                | 0.036 à 0.040                                 | 1.75                        | Très bonne                 |
| <i>Lin</i>                          | 0.040                                         | ?                           | Bonne                      |
| <i>Paille compressée</i>            | 0.120                                         | 0.19                        | Décente                    |
| <b>Laine de verre</b>               | <b>0.039</b>                                  | <b>0.51</b>                 | <b>Bonne</b>               |
| <b>Cellulose</b>                    | <b>0.039 à 0.042</b>                          | <b>1,82</b>                 | <b>Très bonne</b>          |
| <i>Liège</i>                        | 0.037 à 0.045                                 | 2.62                        | Très bonne                 |
| <i>Coton (plaque de coton)</i>      | 0.039                                         | ?                           | Bon isolant thermique      |
| <i>Bois (fibre ou laine)</i>        | 0.038                                         | ?                           | Meilleur isolant thermique |

En ce qui concerne l'isolant à utiliser au Cambodge, nous n'avons pas retenu la paille compressée car il y aurait toujours des risques d'incendies au vu des conditions météorologiques imprévisibles et de la présence d'un panneau photovoltaïque avec son circuit électrique. La fibre ou laine de bois serait envisageable pour le Cambodge, mais elle poserait le même problème que la paille compressée. Nous pourrions aussi bien utiliser la ouate de cellulose au Cambodge, il faudra alors simplement vérifier sa disponibilité sur place. Au final, nous avons utilisé du polystyrène recyclé, à défaut de temps. Celui-ci est un très bon isolant, facilement trouvable et bon marché. Cependant, son impact environnemental n'est pas du tout négligeable : il peut perturber un écosystème si des animaux l'ingèrent par accident, il a une dégradation très lente ...

### 6.2.2. Forme

La forme n'a pas été compliquée à trouver, car nous avions tous une bonne idée du design que pourrait avoir notre séchoir. En effet, nous avons fait le choix d'un séchoir composé de deux boîtes : la boîte de chauffage où le flux d'air doit atteindre la température de séchage souhaitée et la boîte de séchage où sont disposées les tranches de bananes à sécher. Sur base de cela, il nous reste seulement à placer les boîtes de manière adéquate. Pour la boîte de chauffage, une pente pouvait être envisagée pour mieux capter les rayons du soleil. Cependant, le Cambodge se situe géographiquement près de



l'équateur. Par conséquent, les rayons solaires sont relativement verticaux au sol terrestre. Nous avons donc décidé de placer cette boîte de chauffage de manière horizontale au sol afin de maximiser la réception des rayons du soleil durant toute la journée.

## 6.3. FabLab

### 6.3.1. Découverte

Le FabLab est un lieu mis en place par l'ULB pour pouvoir construire les prototypes. Composé de trois salles disponibles aux étudiants 5 jours dans la semaine, nous pouvons y retrouver tout l'essentiel pour la construction de notre prototype. Ainsi, les matériaux (bois, bâches plastiques, grillages), les assemblages (vis, équerre) et les outils (scies, perceuses, visseuses) sont mis à notre disposition. Pour tout besoin supplémentaire, nous pouvons compléter en achetant car nous possédons un budget de 100 € maximum. Un banc test se trouve aussi au FabLab pour nous permettre de tester nos prototypes dans les bonnes conditions. Nous pouvons également stocker nos prototypes dans les étagères présentes dans l'une des salles.

### 6.3.2. Modification de la forme

L'espace de stockage étant de 36 x 87 x 36 cm, cela a conduit à une modification de la forme de notre prototype. Nous devions soit réduire fortement la longueur des deux boîtes pour pouvoir les mettre l'une à côté de l'autre sur l'étagère ou réduire fortement la hauteur des deux boîtes pour les mettre l'une sur l'autre. Cette dernière manière revenait à avoir 10 cm de hauteur, ce qui était très peu. Nous avons donc réfléchi à un autre moyen pour maximiser l'espace à utiliser. Et là nous est venu l'idée d'emboîter les deux boîtes : doublant ainsi la longueur lors de l'utilisation et la diminuant ainsi pour la ranger en glissant la boîte de chauffage dans la boîte de séchage de taille plus grande. Cette idée apporte un grand avantage à notre prototype le rendant modulable et pratique à transporter. Il sera de plus utilisable dans n'importe quelle situation. Ainsi, notre modèle pourrait être utilisé mondialement et non plus seulement au Cambodge. L'encombrement peut aussi s'avérer une variable importante pour un paysan cambodgien qui ne sèche du poivre que pendant une partie de l'année.

### 6.3.3. Construction

Nous avons d'abord pris tous les matériaux nécessaires à la construction du prototype disponible au FabLab pour réduire au maximum notre budget. Le travail a bien été réparti au sein du groupe lors de nos jours de constructions : pendant que certains sciaient, les autres s'occupaient de poncer et puis d'assembler. Quelques jours nous ont suffi pour finaliser notre prototype.

### 6.3.4. Budget

Nous avions un budget de 100 € à utiliser en cas de besoin. Bien que de nombreux matériaux étaient disponibles au FabLab, il n'y avait pas de planches en bois mises à notre disposition. Nous avons donc profité du Brico juste à côté pour acheter des planches découpées sur mesure, mais par un malentendu, celles-ci ont été coupées dans des mauvaises dimensions, ce qui a nécessité un peu de bricolage sur le prototype. Nous avons aussi acheté de fines lattes en bois pour fabriquer les plaques de grillage où seront déposées les bananes. Cela nous permet de gagner quelques centimètres dans la boîte de séchage car les lattes disponibles au FabLab font 3 cm d'épaisseur. Au final, nous avons fini

par construire des plateaux avec des montants en aluminium et des brochettes posées dessus pour y enfiler les bananes. Cette solution s'est avérée plus solide et beaucoup plus hygiénique. En effet, les bananes ont tendance à s'incruster dans la grille métallique en chauffant et il est ensuite très compliqué de décoller les tranches et laver ces grilles.

| Produits                    | Quantité | Prix (€)       |
|-----------------------------|----------|----------------|
| Plaque en bois 122x61x0,3cm | 3        | 8,97 €         |
| Latte en bois               | 2        | 7,18 €         |
| Isolation (XPS)             | 1        | 3 €            |
| Profilés en aluminium       | 2        | 15 €           |
| <b>Total</b>                |          | <b>34,15 €</b> |

#### 6.4. Photos de l'avancement du prototype



Système de grilles coulissant dans la boîte de séchage.



Vue de la boîte de chauffage coulissée à l'intérieur de la seconde boîte, et du ventilateur.



Le prototype sur le banc d'essai avant que nous le modifiions.



La plaque au-dessus de la boîte séchage a été enlevée pour pouvoir capter plus de lumière et donc augmenter la puissance. Les côtés de tout le prototype ont été isolés et recouverts de tissus noir.



Le système de grilles coulissantes a été remplacé par des brochettes, car plus rapides et faciles à nettoyer.

# Chapitre 7 - Protocole expérimental

## 7.1. Objectifs

A l'aide de la méthode scientifique, déterminer si le séchoir à poivre remplit le cahier des charges, ce qui inclut :

- Atteindre la bonne température, donc puissance requise. Pour cela :
  - o Atteindre la bonne température et évolution de celle-ci au cours du temps
  - o Répartition homogène de la température, donc profil de température au sein du séchoir
  - o Ne pas dépasser l'humidité maximale
  - o Atteindre la puissance requise
  - o Aération optimale, c'est-à-dire emplacement et ouverture de la sortie d'air
- Obtenir un séchage homogène et complet des aliments :
  - o Taille des tranches de bananes utilisées pour les tests
  - o Répartition des aliments (hauteur, largeur, distance de la sortie du séchoir)
  - o Quantité d'eau évaporée
- Test des matériaux et de la construction, et de leur comportement dans les conditions de séchage. Tests réalisables en laboratoire :
  - o Résistance des matériaux : vérifier la résistance du plastique et des moustiquaires servant de grilles de séchage
  - o Étanchéité du séchoir (fuites d'air involontaires)
  - o Isolation des parois et détermination de l'origine des pertes thermiques

## 7.2. Matériel

Le séchoir construit selon les plans présents en annexe est requis pour tous les tests. Il est aussi nécessaire de disposer d'une source lumineuse d'une puissance d'environ  $900 \text{ W/m}^2$  pour simuler l'ensoleillement.

### 7.2.1. Instruments de mesure

- Datalogger (température, humidité relative et temps)
- Thermomètre sonde
- Anémomètre
- Mètre ruban

## 7.3. Mode opératoire

Tous les tests se font en laboratoire sous un éclairage supposé constant et uniforme d'environ  $900 \text{ W/m}^2$ .

Le poivre de Kampot étant une denrée chère et peu abondante à l'état brut en Belgique, des bananes seront utilisées. Elles présentent des caractéristiques analogues au poivre. Pour plus de détails, voir le cahier des charges du projet.

### 7.3.1. Méthodologie de prise de mesure

Avant chaque séance de test :

- Vérifier l'état du matériel de test.
- Relever la température ambiante du laboratoire.
- Faire de même pour l'humidité.
- Noter toutes les mesures effectuées et prises (longueurs, temps, débits, ...)

### 7.3.2. Mise en place du séchoir

**Test avec bananes :**

1. Transporter le prototype en deux pièces séparées.
2. Emboîter les deux boîtes à l'emplacement choisi, la boîte de chauffage dans la boîte de séchage. Laisser 7,5 cm d'ouverture à l'arrière du séchoir avec la porte coulissante.
3. Mettre un bout de tissu noir dans la fente formée par l'emboîtement des deux parties.
4. Placer le séchoir sous l'éclairage dans la position la plus longue (environ 115 cm).
5. Alimenter le ventilateur avec le panneau solaire et ajuster sa puissance (à la valeur fournie par le logiciel) avec le potentiomètre grâce à l'anémomètre.
6. Placer le thermomètre au centre du sol de la partie séchage.
7. Positionner le datalogger juste avant la sortie du séchoir.
8. Découper 500 grammes de bananes en rondelles de maximum 4 mm d'épaisseur.
9. Les peser (peser les brochettes séparément pour le mode opératoire 7.3.4).
10. Les disposer de la manière voulue sur les plateaux ou brochettes. Veiller à laisser suffisamment d'espace entre les tranches. Pour les brochettes, ne pas dépasser 50 grammes par brochette.
11. Insérer ces plateaux ou brochettes dans le séchoir aux emplacements prévus.
12. Appliquer le mode opératoire voulu (7.3.3, 7.3.4 ou 7.3.5).
13. Laisser fonctionner le séchoir aussi longtemps que possible.
14. Dès la fin du test, mesurer la durée exacte de séchage et retirer les plateaux du séchoir, mettre un récipient sur une balance et la tarer. Décoller ensuite les bananes des grilles (ou les retirer des brochettes), les mettre dans le récipient et les peser en veillant à minimiser les pertes de matière.
15. Calculer la puissance développée à l'aide de la formule 31.
16. Récupérer les données du datalogger et les placer sur une courbe afin de les analyser.

### 7.3.3. Tests de puissance

1. Laisser le prototype pendant minimum deux heures en dessous du flux lumineux. Déclencher un chronomètre pour relever le temps du test.
2. Relever la température ambiante au début du test, puis la température au centre des plateaux toutes les 15 minutes et faire attention qu'elle ne dépasse pas 65°C.
3. Si la température augmente de moins de 1 degré pendant 15 min, descendre la porte arrière du séchoir de 1,5 cm à la fois. La relever d'une même hauteur si la température dépasse les 70°C.
4. Enlever le prototype du banc test, retirer les grilles du séchoir et peser les bananes comme mentionné en 7.3.2 point 14.
5. Pour calculer la puissance en W/m<sup>2</sup>, il suffit de relever les données importantes fournies par le test pour pouvoir compléter la formule :

| Inconnues           | Notations | Valeurs  | Unités |
|---------------------|-----------|----------|--------|
| Longueur du séchoir | L         | logiciel | m      |
| Largeur du séchoir  | l         | 0,33     | m      |

|                                            |                   |                        |          |
|--------------------------------------------|-------------------|------------------------|----------|
| Débit d'air nécessaire                     | Q                 | logiciel               | kg/s     |
| Capacité calorifique de l'air sec<br>(65°) | C                 | 1009                   | J/(kg.K) |
| Température ambiante                       | Tamb              | à mesurer              | K        |
| Température finale                         | Tf                | à mesurer              | K        |
| Masse initiale                             | M <sub>i</sub>    | à peser au début       | kg       |
| Masse finale                               | M <sub>f</sub>    | à peser à la fin       | kg       |
| Temps                                      | Δt                | à chronométrer         | s        |
| Enthalpie de vaporisation                  | ΔH <sub>vap</sub> | 2346,2*10 <sup>3</sup> | J/kg     |

6. Remplacer dans l'équation 31 :

$$P * L * l = \frac{(M_i - M_f)}{\Delta t} + Q * C * (T_f - T_{amb}) \quad (31)$$

#### 7.3.4. Tests de séchage

1. Disposer 5 brochettes de banane parallèles, perpendiculairement à la direction du séchoir, bien réparties dans la longueur et entre les deux cadres. Veiller à les numérotier afin de pouvoir les peser individuellement.
2. Pendant le séchage, récupérer toutes les 15 minutes la brochette la plus proche de la porte du séchoir, et la peser. Attention à ne pas laisser trop longtemps ouverte la porte et à perdre le moins de banane possible.
3. Une fois le séchage terminé, peser chaque brochette et tirer les conclusions quant à l'homogénéité du chauffage dans la hauteur et la longueur.
4. Tirer des conclusions quant à l'évolution de l'humidité de la dernière brochette dans le temps (celle ayant été régulièrement pesée).

#### 7.3.5. Test des matériaux

1. Vérifier qualitativement la bonne isolation des parois de la zone de chauffage et de séchage au toucher.
2. Ne pas mettre le tissu rendant les deux boîtes jointives pendant au moins 15 min.
3. Sentir qualitativement le flux d'air chaud s'échappant par la fente.
4. Mettre le tissu rendant jointif les deux boîtes pendant au moins 15 min.
5. Comparer le flux d'air chaud qualitativement avec le premier ressenti.
6. Après plusieurs tests, vérifier l'état des brochettes et les remplacer lorsque trop abîmées.

## 7.4. Résultats

### 7.4.1. Premier test

Le premier test a eu lieu avant la mi-parcours. Malgré un test très court d'une heure, nous avons rapidement relevé plusieurs problèmes :

- Le ventilateur avait été mal installé. Il a donc fallu s'assurer d'avoir le débit correct et surtout, dans le bon sens.
- Nous n'avons pas du tout atteint la température de 65°C. Plusieurs problèmes ont été identifiés et réglés par la suite :
  - o Isolation des parois insuffisante dans la partie de chauffe,
  - o Besoin d'une plus grande surface exposée à la lumière. Nous avons donc remplacé la plaque supérieure de la partie de séchage par un autre plastique transparent.
  - o Grilles de séchage pas assez solides et difficilement lavables,
  - o Débit d'air correct.

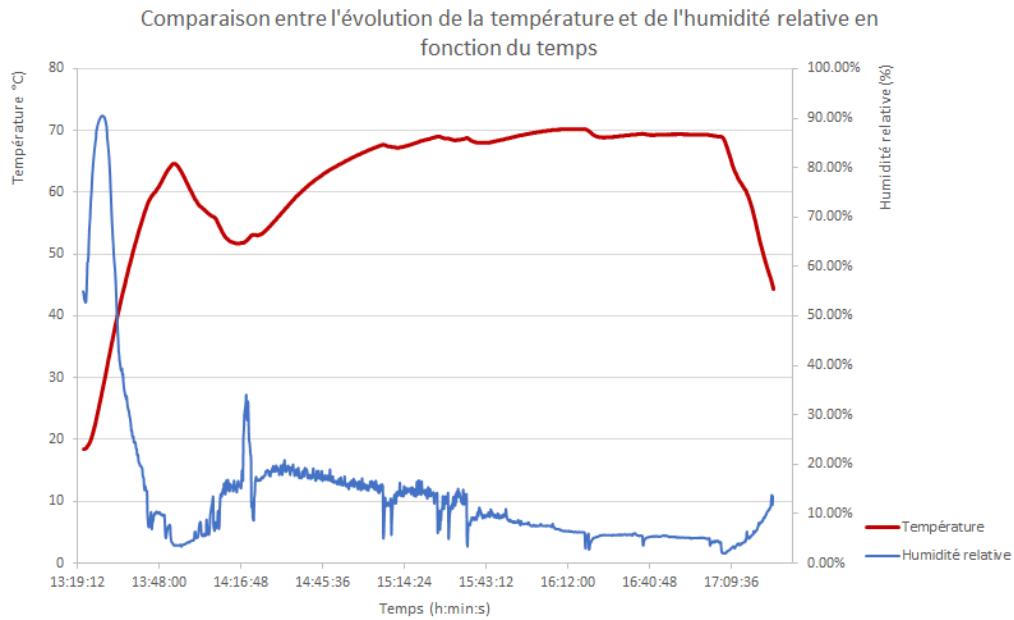
Ce séchage n'a permis d'évaporer que 31,7 g d'eau, ce qui donne un  $J = 8,81 \times 10^{-6}$  kg/s, bien en-dessous des  $2 \times 10^{-5}$  requis. La puissance était alors d'environ 30 W, c'est-à-dire moins de la moitié de la puissance requise. Ayant identifié les problèmes à l'origine de ce manque de puissance, nous savions exactement quoi modifier pour remplir les objectifs du cahier des charges.

### 7.4.2. Résultats : résumé des puissances calculées

| Date du test | masse initiale (kg) | masse finale (kg) | Δmasse (kg) | temps (s) | J (kg/s)   | $\Delta H_{\text{vap}}$ (J/kg) | T in (°C) | T in (K) | T out (°C) | T out (K) | ΔT | Q (kg/s)   | C de l'air (J/(kg.K)) | P en W/m² |
|--------------|---------------------|-------------------|-------------|-----------|------------|--------------------------------|-----------|----------|------------|-----------|----|------------|-----------------------|-----------|
| 27/02        | 0,433               | 0,2797            | 0,1533      | 7200      | 2,1292E-05 | 2,35E+06                       | 54        | 327,15   | 22         | 295,15    | 32 | 0,00052826 | 1009                  | 67,0      |
| 6/03         | 0,2501              | 0,1755            | 0,0746      | 3600      | 2,0722E-05 | 2,35E+06                       | 68        | 341,15   | 26         | 299,15    | 42 | 0,0007279  | 1009                  | 79,5      |
| 5/03         | 0,4                 | 0,2091            | 0,1909      | 10800     | 1,7676E-05 | 2,35E+06                       | 69        | 342,15   | 18         | 291,15    | 51 | 0,0007279  | 1009                  | 78,9      |

### 7.4.3. Autres résultats

Tous les résultats des tests se trouvent en annexe (Annexe 1 - Résultats des tests). Nous pouvons cependant en sortir la courbe suivante que nous considérons comme représentative d'un test idéal (test du 27/02).



## 7.5. Conclusions

### 7.5.1. Conclusions générales

Au démarrage du séchoir, se produit un pic d'humidité que nous expliquons par celle du séchoir lui-même. En effet, si celui-ci est stocké dans un endroit humide, il est normal qu'il « sèche d'abord ». Ce pic est sans conséquences et ne dure en moyenne qu'une vingtaine de minutes avant de voir l'humidité descendre en dessous de 20%.

Lorsque les bananes sont mises dedans, un second pic d'humidité encore plus court se produit le temps que le flux d'air luminaire s'installe et que l'eau soit correctement évacuée. Nous pouvons cependant, au vu de l'irrégularité de la courbe d'humidité, supposer que le flux d'air n'est pas optimal. Ceci peut s'expliquer par l'ouverture de la porte qui n'est qu'une fente au sol et pourrait être améliorée par une grille ou une série de trous. L'écoulement de l'air serait alors plus constant. L'expérimentation a montré que le problème pouvait être partiellement contourné par une ouverture d'au moins 6 cm.

Une erreur dans les données fournies par le logiciel (5 h de séchage au lieu de 8) nous a menés à utiliser une ventilation plus forte que nécessaire de même qu'une longueur trop grande. Cela a cependant démontré la grande flexibilité de notre design de séchoir et sa capacité à fournir une puissance supérieure à celle imposée par le cahier des charges.

Les données obtenues au FabLab sont relativement faussées dans la mesure où les lampes disponibles fournissaient une puissance plus proche de 700 W/m<sup>2</sup> que les 900 annoncés.

Globalement, nous avons pu confirmer toutes les hypothèses faites dans l'établissement des équations et obtenir les résultats prédictifs par le logiciel.

### 7.5.2. Comment procéder avec un séchoir sur le terrain.

Nous tirons de ces tests des enseignements utiles pour la mise en place du séchoir sur le terrain.

Pour démarrer le séchoir, nos tests ont montré que le laisser préchauffer environ 20 minutes permet un meilleur démarrage.

En cas de surchauffe, il suffit d'ouvrir plus grande la porte, augmenter le débit d'air ou simplement diminuer la longueur.

Les ouvertures du séchoir doivent être les plus brèves possibles et les plateaux manipulés avec précaution (s'il sont en métal, il est impossible des toucher tant ils sont chauds ; l'ouverture étant petite, les aliments peuvent tomber).

### 7.5.3. Matériaux

Nous avons relevé que les plateaux avec grille sont très difficiles à nettoyer et peu pratiques pour effectuer des mesures régulières. Pour répondre à ce problème nous concluons qu'il est nécessaire d'en fabriquer des plus solides avec des montants d'aluminium. Les aliments qui le permettent peuvent être disposés sur des brochettes pour complètement se débarrasser de la grille.

Pour utiliser les brochettes correctement, il faut un cadre adapté. Elles roulent facilement et tiennent très mal. Un système d'encoche doit alors être envisagé. De plus, les bananes peuvent tomber si elles n'ont pas été piquées correctement (c'est-à-dire bien au centre).

Les parois sont très bien isolées. En effet, elles ne semblent pas beaucoup plus chaudes que la température ambiante (conclusion basée sur un ressenti qualitatif). Le chauffage étant très bon, il n'est pas nécessaire d'isoler les parois du fond et avant.

Le plastique est un peu trop fin et a tendance à devenir très souple sous l'effet de la chaleur. Il semble néanmoins être toujours assez résistant, du moment que rien n'est appuyé dessus. Un séchoir sur le terrain devra sans doute être muni d'une plaque rigide en verre, plexiglass ou plastique beaucoup plus résistant.

# Chapitre 8 - Fonctionnement du groupe

## 8.1. Les réunions

Nous faisions une réunion par semaine avec notre chef d'équipe de sorte à échanger et discuter de notre avancement et organisation. Celles-ci duraient deux heures au début pour bien distribuer tout le travail à accomplir et le comprendre. Semaines après semaines nous nous situions mieux dans les tâches à faire et nous avançions comme souhaité. C'est pour cela que nous avons décidé de réduire le temps de réunion à une heure.

### 8.1.1. Préparation

Dès la première réunion nous avons organisé notre projet en le divisant en trois grands blocs : logiciel, prototype et plan (et dimensionnement qui viendra par après). Le premier bloc a aussi été divisé en trois sous-blocs : environnement, ventilation et effet de serre. Sur base de ce schéma, nous avons chacun choisi un bloc dans lequel nous avons effectué le nécessaire. La première tâche a consisté à faire des recherches dans chaque bloc, permettant ainsi de rassembler toutes les équations nécessaires pour la création du logiciel. La seconde tâche a été donc d'assembler toutes ces équations pour créer le logiciel. En parallèle, la préparation de la construction se faisait en procédant ainsi dans le même schéma : recherche de la forme et des matériaux pour aboutir à la construction du prototype au FabLab.

Avant chaque réunion, chacun préparait donc ce dont nous avions besoin pour avancer dans le projet. Ce travail était publié sur le drive avant la réunion pour que tout le monde puisse y accéder et préalablement le lire.

## 8.2. Méthode de travail

### 8.2.1. Répartition des tâches

Nous avons réparti entre nous de la manière la plus équitable et logique (c'est-à-dire en fonction des connaissances de chacun) possible le travail au travers des différents blocs. Au fur et à mesure de l'avancement, les tâches ont plusieurs fois été redistribuées.

### 8.2.2. Travail individuel

Le travail individuel a surtout été nécessaire au début du projet lors des recherches. Nous avançons simultanément dans nos recherches ce qui a vite abouti à une mise en commun. Notre travail individuel était toujours partagé entre nous afin de communiquer au plus vite les informations nécessaires.

## 8.3. Moyens de communication

Lors de la première réunion, nous avons décidé d'un moyen de communication pratique que tout le monde pourrait utiliser. Notre première idée a été d'utiliser Google Drive, mais nous avons découvert que l'université nous offre des licences Office360 associées à la plateforme sharepoint. C'est cette

solution qui a été retenue. Ce drive nous permet de partager tous les documents et sources entre nous, classés dans des dossiers et modifiables simultanément et par tous, à tout moment. Un repository GitHub y a été associé par après afin de travailler tous ensemble sur le code du logiciel.

En plus du drive, nous nous sommes créés des groupes Messenger permettant la communication d'informations entre nous et un groupe Facebook reprenant les plus importantes.

## 8.4. SWOT

### PREMIER SWOT

| <b>Strengths</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Weaknesses</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-Capacité d'organisation de Idil et expérience en projet de groupe</li> <li>-Le groupe est à l'écoute</li> <li>-L'esprit de compétition entraîne une envie d'avancer et de faire le meilleur projet possible</li> <li>-Recherche d'Arnaud sur les logiciels pour s'organiser (drive, GitHub, Gantt Project, ...)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-La communication entre les membres était difficile (surtout au début)</li> <li>-Le groupe ne parle pas beaucoup en réunion et n'ose pas intervenir dans les explications d'un autre membre</li> <li>-Premier grand projet en groupe</li> <li>-Motivation en début de projet</li> </ul>  |
| <b>Opportunities</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Threats</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-Demander de l'aide aux autres groupes</li> <li>-Joshua à des amis ingénieurs</li> <li>-Les séminaires</li> <li>-Cadre du projet bien défini</li> <li>-FabLab</li> <li>-Les cours se rapprochant du projet (chimie, physique, ...)</li> </ul>                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Les autres cours qui prennent beaucoup de temps d'étude + ISA</li> <li>-L'esprit de compétition qui amène de la pression et des difficultés à bien s'organiser</li> <li>-Le timing</li> <li>-La matière théorique est difficile dans le projet (à appliquer et à comprendre)</li> </ul> |

### DEUXIÈME SWOT

| <b>Strengths</b>                                                                                                                                                                                                        | <b>Weaknesses</b>                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité ( FabLab, réunion,...)</li> <li>• Émergence d'idée</li> <li>• Plan d'Arnaud</li> <li>• Optimisme face à l'échec</li> <li>• Polyvalence dans le groupe</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Communication</li> <li>• Manque de travail régulier</li> <li>• Déception du premier test</li> <li>• Gestion du temps (échéances)</li> </ul>                                 |
| <b>Opportunities</b>                                                                                                                                                                                                    | <b>Threat</b>                                                                                                                                                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Test au FabLab</li> <li>• FabLab</li> <li>• Brico près du FabLab</li> <li>• Voyage au Cambodge</li> <li>• Technicien disponible et bienveillant</li> </ul>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sujet</li> <li>• Gestion des autres cours</li> <li>• Reprise après congé</li> <li>• Peur du Jury</li> <li>• Manque de matos au FabLab</li> <li>• Semaine de rush</li> </ul> |

## 8.5. Gestion

### 8.5.1. Temps

Pour pouvoir bien nous organiser durant ce projet et terminer toutes les tâches nécessaires pour ce premier quadrimestre, nous avons repris toutes les actions à réaliser dans un diagramme de Gantt. Celui-ci nous a ainsi permis de visualiser tout ce qu'il fallait faire sur une ligne du temps.

### 8.5.2. Tension dans le groupe

Grâce à une bonne communication, nous n'avons pas eu de tension importante dans le groupe. Chaque décision était discutée et reprise dans le procès-verbal de la réunion, démontrant de la sorte la bonne entente et notre capacité de conciliation. Si l'écoute de chacun a été compliquée au début, l'ouverture à la discussion a vite fait de nous mettre d'accords.

## 8.6. Enseignements que nous avons tirés de la gestion du groupe

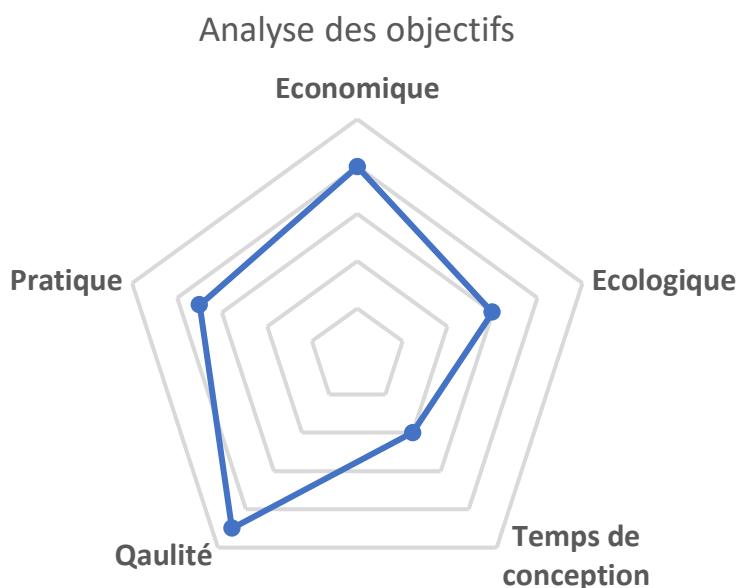
Nous avons presque tous utilisé pour la première fois les outils que sont l'ordre du jour et le procès-verbal, et assimilé l'utilité et les contraintes qui y sont liées. Quant au diagramme de Gantt, nous avons eu l'occasion d'éprouver son importance pour la gestion du temps dans un projet de cette ampleur. Si l'apprentissage de la communication dans le groupe n'a pas été évident, nous avons désormais appris à utiliser efficacement les moyens de communication mis à notre disposition et su en tirer parti. Nous saurons tirer profit de ces apprentissages dans de futurs projets et en tant que futurs ingénieur(e)s.

# Chapitre 9 - Conclusion

Pour conclure ce rapport, dressons tout d'abord un bilan des objectifs. Nous estimons avoir réussi à concevoir un séchoir de qualité remplissant très largement les critères du cahier des charges. La qualité du séchage a été éprouvée par plusieurs tests. Ceux-ci nous ont aussi permis de démontrer la validité de notre modélisation du problème et l'efficacité de l'outil que constitue le logiciel. Le tout a été réalisé selon une méthode aussi rigoureuse et scientifique que possible. L'aspect pratique et « user friendly » nécessaire à un séchoir à destination d'agriculteurs cambodgiens s'est le plus montré au travers de sa grande flexibilité d'utilisation et du logiciel. Cependant, ce même point se trouve être une des faiblesses de la construction en elle-même : la manipulation peut s'avérer compliquée, notamment avec les plateaux et les réglages d'ouverture et longueur. Sur le plan économique, cœur de la problématique, nous estimons avoir atteint l'objectif d'un produit peu cher et très favorable à l'économie locale du Cambodge, notamment au travers du choix des matériaux. Ces derniers occupent une place centrale dans l'aspect écologique du projet. Un important bémol à leur propos est le choix du plastique comme paroi transparente. Nous croyons néanmoins en la possibilité d'utiliser des plastiques de récupération voire même du verre.

Sur le plan de l'organisation du projet, nous pouvons également tirer de nombreux et précieux enseignements : outils de gestion de projet, démarche de conception et de test expérimental, répartition du travail, recherche document, etc. Nous pensons pouvoir être satisfaits de notre capacité à résoudre le problème, le modéliser, apprendre et trouver des solutions créatives.

Pour terminer, si la création d'un séchoir modulaire nous a, avant tout, conféré une longueur d'avance sur les tests lors du prototypage, elle se trouve être son principal atout. Nous avons en effet conçu un séchoir fiable, de construction simple, économique, écologique et adaptable à de très nombreux cas d'utilisation.

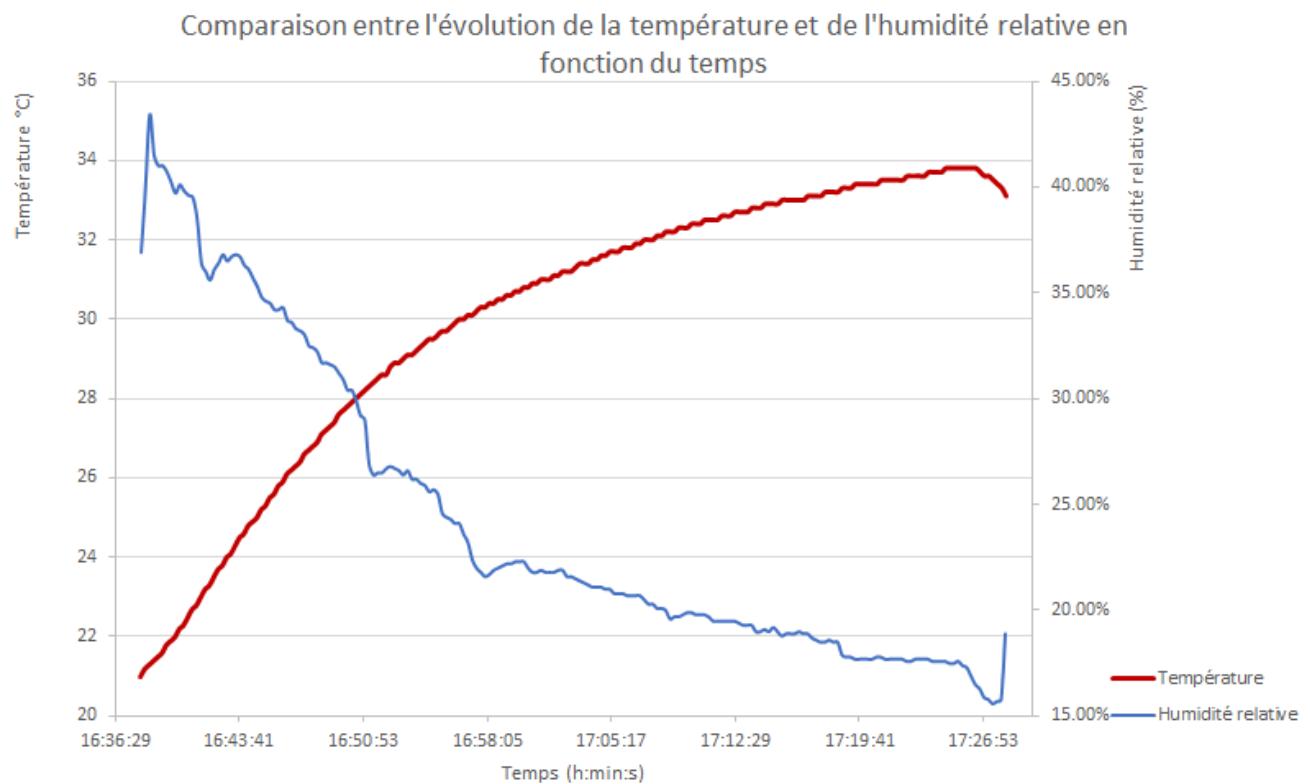


# Annexe 1 - Résultats des tests

## 9.1. Test 14/02

| temps | température | ventilo(+/-) |
|-------|-------------|--------------|
| 16:35 | 22,5°       | 30 m/s       |
| 16:40 | 25°         | 30 m/s       |
| 16:45 | 28°         | 5 m/s        |
| 16:50 | 29,4°       | 5 m/s        |
| 16:55 | 30,7        | 5 m/s        |
| 17:15 | 33,3        | 5 m/s        |
| 17:20 | 33,8        | 5 m/s        |

|                        |                      |                                |
|------------------------|----------------------|--------------------------------|
| lumière                | 460 watt au plus bas | 780 watt au dessus de la boîte |
| température extérieure | 20°-21°              |                                |
| heure de début         | 16:30                |                                |
| heure de fin           | 17:20                |                                |



Observations :

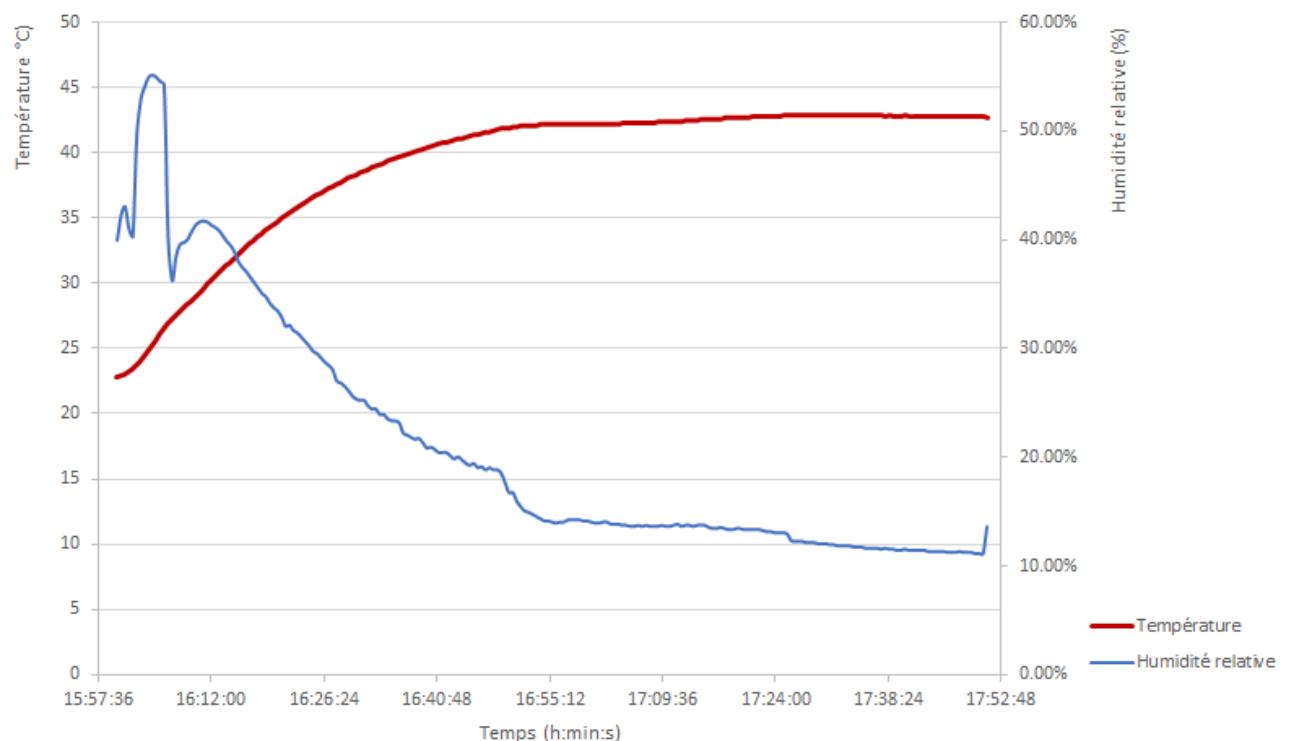
Nous remarquons assez facilement que la température souhaitée (65°C) n'est pas atteinte. Même après le changement des parois de la zone de chauffe, la température maximale ne s'élève qu'à 33,8°C. Nous déduisons qu'il faut aussi isoler les parois pour minimiser le plus possible les pertes énergétiques et couvrir tout l'intérieur d'un tissu noir, afin de capter un maximum de chaleur.

Au niveau de l'humidité relative, on constate que son évolution est une courbe plus ou moins décroissante. Cela est évident puisqu'en prenant la définition de l'humidité relative, nous savons que plus la température augmente, plus la capacité maximale de l'air à retenir de la vapeur d'eau augmente et plus le rapport des pressions de vapeur d'eau et saturante diminue. Cela explique l'allure du graphe.

En conclusion, le test 1 montre qu'il faut apporter quelques modifications sur le prototype pour atteindre la température idéale au séchage des bananes.

## 9.2. Test 19/02

Comparaison entre l'évolution de la température et de l'humidité relative en fonction du temps



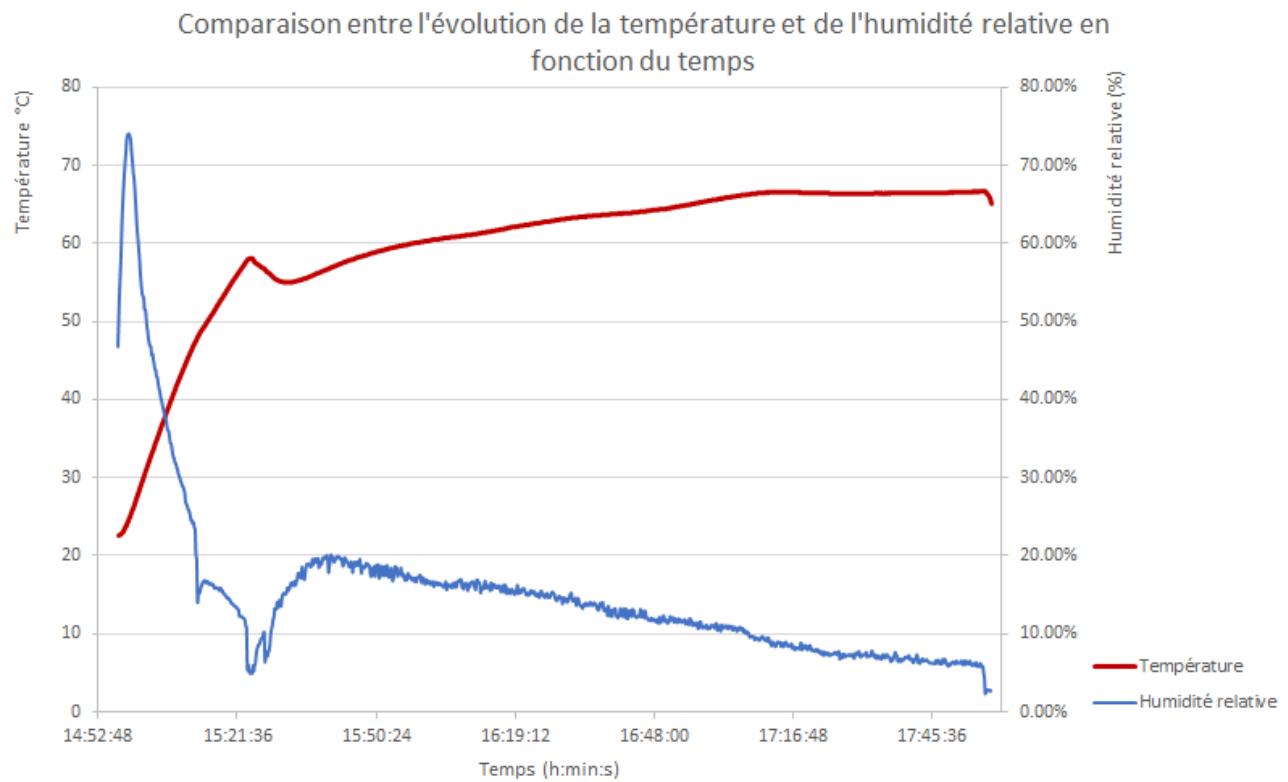
### Observations :

Le deuxième test s'est avéré plus probant. Nous avons pu augmenter la température globale avec les modifications faites, mais cela n'est toujours pas suffisant au séchage des bananes. Cependant, nous avons remarqué que la distance lampe - prototype faisait beaucoup varier la puissance captée par le séchoir. Le test 2 n'est pas un succès puisque la puissance reçue par le séchoir est insuffisante.

Quant à l'humidité relative, les observations sont les mêmes que pour le test n°1. Excepté pour le pique qu'on observe en début d'expérience.

Au final, il faut simplement remédier à la puissance captée par le séchoir pour atteindre la température souhaitée.

### 9.3. Test 26/02



#### Observations :

Ce 3<sup>ème</sup> test s'est montré très fructueux au niveau de la température atteinte. Nous avons, en outre, atteint une température maximale de 66,8°C. Cependant, il faut prendre en compte que des rayons de soleil sont parvenus au séchoir et ont influencé la température interne. De plus, nous avons remarqué une petite fente au niveau de l'emboîtement de la partie de chauffe et de séchage. Nous avons isolé cet orifice avec du tissu noir. Tout ceci indique qu'il est possible d'arriver à une température de séchage en minimisant les pertes et en maximisant la puissance captée.

Pour l'humidité relative, on s'aperçoit que la courbe n'est pas complètement décroissante et oscille beaucoup. Cela est dû au fait que l'on a modifié plusieurs paramètres pendant le test (la vitesse du ventilateur, la hauteur de la guillotine, etc). Ce qui explique que l'humidité n'évolue pas de manière continue. Néanmoins, nous voyons que la courbe est approximativement décroissante et rejoint l'interprétation faite pour les premiers tests.

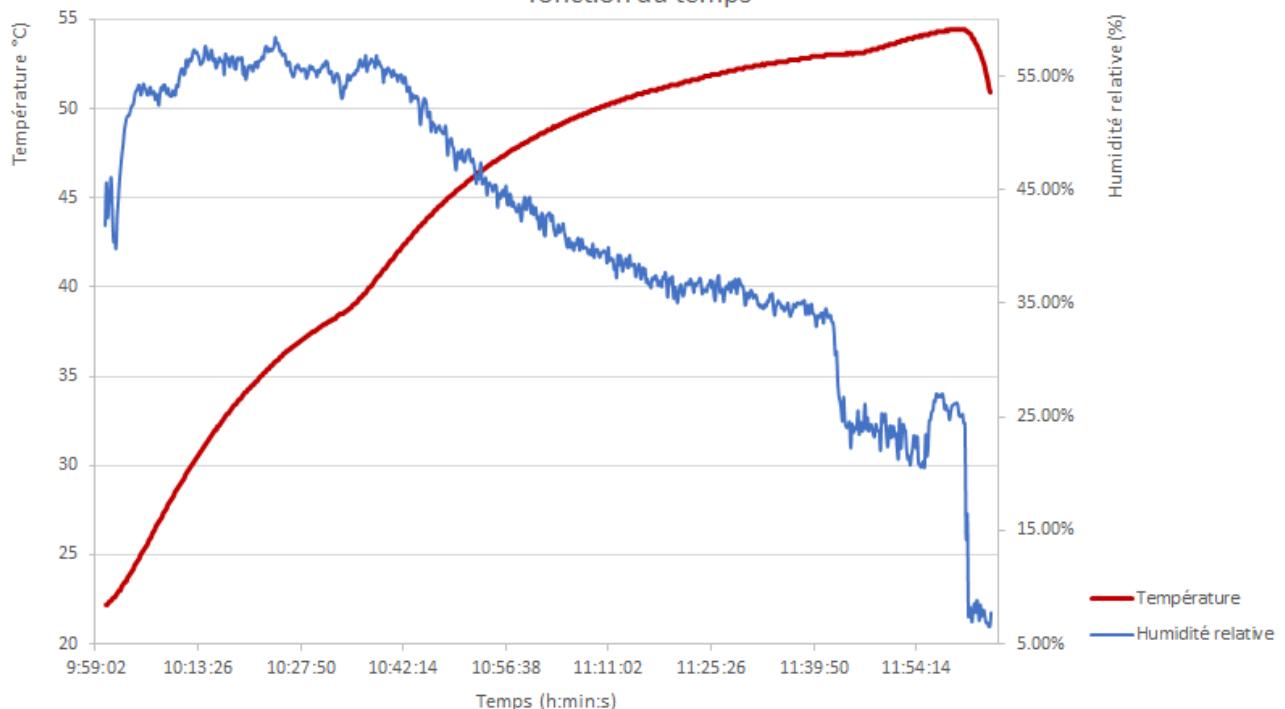
Finalement, ce test démontre qu'il est aisément de sécher les bananes, à condition de bien régler tous les paramètres qui changent la température : la hauteur de la guillotine, la longueur de la zone de chauffe, la puissance captée (et la vitesse du ventilateur).

## 9.4. Test 27/02

| Temps                                  | Température (en °C) |
|----------------------------------------|---------------------|
| 10 :00                                 | 22,2                |
| 10 :05                                 | 26,0                |
| 10 :10                                 | 31,0                |
| 10 :15                                 | 33,4                |
| 10 :20                                 | 34,9                |
| 10 :35                                 | 39,1                |
| 10 :40                                 | 42,8                |
| 10 :45                                 | 45,7                |
| 10 :50                                 | 46,8                |
| 10 :55                                 | 48,7                |
| 11 :05                                 | 49,4                |
| 11 :10                                 | 50,5                |
| 11 :15                                 | 51                  |
| 11 :20                                 | 51,9                |
| 11 :30                                 | 52,3                |
| 11 :35                                 | 52,8                |
| 11 :40 (fermeture de la porte arrière) | 53                  |
| 11 :50                                 | 53,7                |
| 11 :55                                 | 54,3                |
| 12 :00                                 | 54,5                |

|                         |                                      |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Heure de début          | 10 :00                               |
| Heure de fin            | 12 :00                               |
| Longueur partie chauffe | 54,5cm                               |
| Température ambiante    | 22,2                                 |
| Vitesse du ventilateur  | 0,45 m/s<br>2666cm <sup>3</sup> /min |
| Lumière                 | 900W                                 |
| Masse initiale          | 433g                                 |
| Masse finale            | 269,7g + 10g                         |
| Puissance               | 75,7 W                               |

Comparaison entre l'évolution de la température et de l'humidité relative en fonction du temps



### Observations :

Nous remarquons que la courbe est croissante, comme pour les 3 premiers tests mais qu'elle n'atteint pas la température de 65°C. Ceci se justifie par le fait que la lampe utilisée n'était pas assez proche du séchoir. Cela est, en effet, juste un problème technique. Nous avons également oublié de reboucher une fente, ce qui peut avoir causé beaucoup de pertes de chaleur.

La courbe de l'humidité relative oscille de manière intense (de nouveau, à cause des réglages pendant le test), mais est globalement décroissante.

Ainsi, le test 4 rejoint le test 3 concernant le fait de bien régler les paramètres faisant varier la température et l'humidité relative.

## 9.5. Test 5/03

Début du séchage à **14h00**, ouverture de 0 cm

Utilisation de 5 brochettes de 8 tranches de bananes chacune disposées dans l'ordre de la porte jusqu'au centre du séchoir

Masse totale de départ = 380 g

56 °C au moment où toutes les brochettes sont mises dans le séchoir

54 °C au moment où tout est mis dedans

Tout dedans à **14h45**

Ouverture de 1,5 cm

**15h00** : déplacement du datalogger : pensons que mal placé entre les deux boites

Mise en place du tissu pour rendre les boites jointives : on sent directement moins d'air chaud sortir par cet endroit. Au cours du temps, la chaleur semble ne pas passer. D'autres endroits non jointifs (partie supérieure, surface minime face à la fente isolée ici) entre les deux boîtes laissent encore passer de la chaleur.

**15h46** : ouverture de 3 cm et mesure de la brochette 5 = 32 gr

**16h06** : ouverture de 4,5 cm et mesure de brochette 5 = 30,4 gr

**16h24** : ajustement du ventilateur qui semble s'être déréglé, nouveau = 3199 à 3399 cmm Mesure de la température au niveau de la porte, à hauteur du plateau supérieur = 66 °C et au niveau du sol entre 61 et 63 °C

**16h49** : augmentation du ventilateur à environ 4000 car température > 70 °C => thermomètre toujours au même endroit : 70 °C, thermomètre à l'entrée de la boîte de séchage légèrement plus haut

**17h00** : brochette 5 = 26 gr et ouverture réglée à 6 cm, thermomètre au-dessus (même endroit) = 70 °C et thermomètre en-dessous (niveau du sol, même endroit) = 50 °C

**17h13** : température thermomètre au sol : à la sortie (même endroit que mesure à 17h) = 56 °C, ventilateur réglé sur 0,7 m/s (calcul effectué avec (= environ 4500 cmm)

**17h25** : thermomètre au même endroit, mais premier plateau = 68 °C. La température étant très élevée, nous décidons d'encore augmenter le ventilateur à environ 0.75 m/s = 5500 cmm

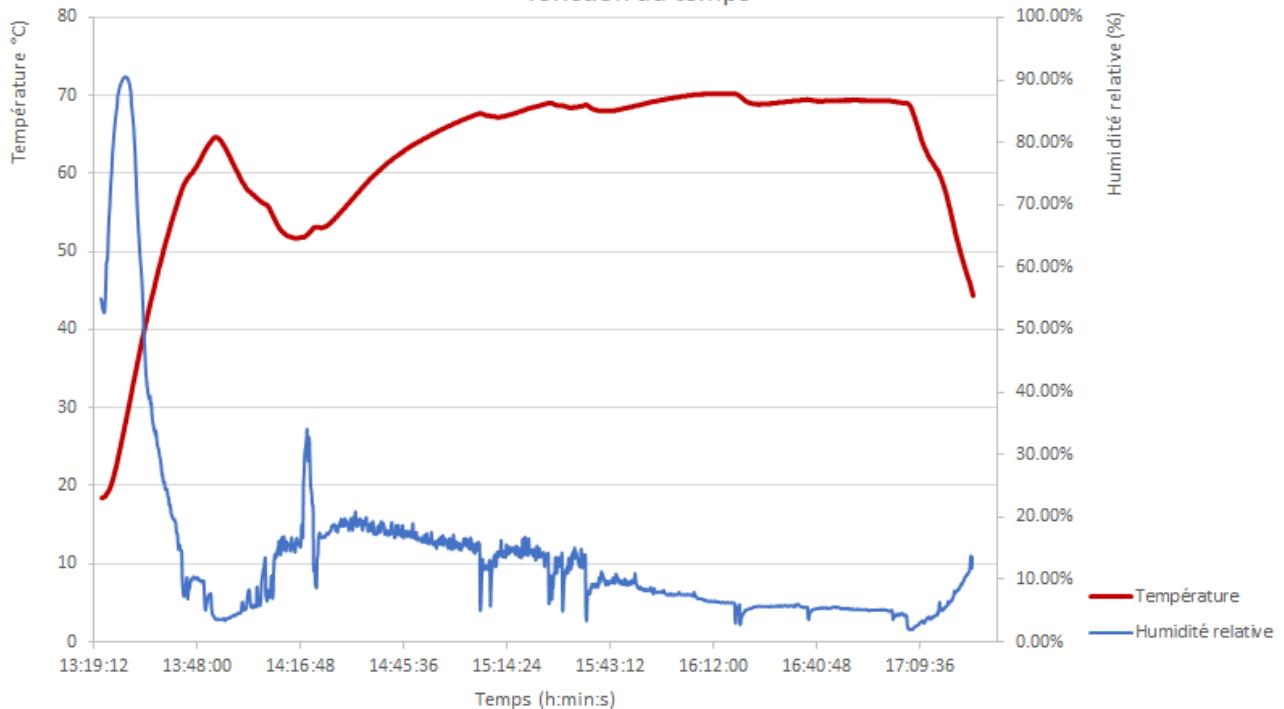
**17h40** : deux thermomètres à 69 °C (même endroit)

Température externe des parois : environ 33 degrés, identique à la température de l'air ambiant directement à côté du déchoir. Le plastique est très souple, mais semble rester suffisamment solide pour ne pas rompre sous son propre poids.

**17h45** : Relevé des masses

| Brochette | Masse initiale (g) | Masse finale (g) | Différence (g) |
|-----------|--------------------|------------------|----------------|
| 1         | 38,9               | 24,3             | 14,6           |
| 2         | 36,0               | 20,2             | 16,2           |
| 3         | 39,1               | 21,7             | 17,4           |
| 4         | 38,8               | 19,8             | 19             |
| 5         | 43,6               | 22,5             | 21,3           |
| Plateau   | 183,6              | 97,6             | 86,0           |
| Total     | 400                | 209,1            | 190,9          |

Comparaison entre l'évolution de la température et de l'humidité relative en fonction du temps



#### Observations :

Ce 5<sup>ème</sup> test avait pour but de régler la température entre 65°C et 70°C en touchant aux paramètres « hauteur de guillotine (trappe arrière de la partie de séchage). Nous avons pu maintenir le séchoir à

une température moyenne de 62,18°C (en comptant la montée de température au début, qui a pris une heure). Ce qui est excellent pour notre prototype.

Concernant la courbe de l'humidité relative, nous remarquons un grand pique au début du séchage.

En conclusion, nous déduisons que nos paramètres de vitesse de ventilateur et longueur de chauffe, si bloqués, sont favorable à un très bon séchage de bananes.

## 9.6. Test 6/03

Mesures avant le test :

Température ambiante 26°C

Flux lumineux : 771W/m<sup>2</sup>

Vitesse initiale du ventilateur : 0,7m/s

Déroulement :

**12H00** : Début du séchage, température ambiante : 26,3°C

**12H30** : Tout est installé, porte arrière fermée complètement

**12H40** : ouverture de la porte de 1cm

**13h10** : ouverture de la porte 5cm (température dans le séchoir 65,0°C)

**13h35** : ouverture de la porte 7cm

**13H30** : Fin du test

Masse finale des brochettes (tiges y comprises d'une masse de 1,32 g chacune) :

| Brochette | Masse initiale (g) | Masse finale (g) | Différence (g) |
|-----------|--------------------|------------------|----------------|
| 1         | 29,5 g             | 23,4g            | 6,1            |
| 2         | 30,8 g             | 18,4g            | 12,4           |
| 3         | 24,3 g             | 21,6g            | 17,4           |
| 4         | 29,6 g             | 23,0g            | 6,6            |
| 5         | 31,00 g            | 19,2g            | 11,8           |
| Plateau   | 175,5 g            | 69,9g            | 105,6          |

Température finale : 68°C

Vitesse finale du ventilateur : 0,9 m/s

Puissance finale : 86 W (valeur théorique : 83W)

## Annexe 2 - Plans du séchoir

Les plans suivants reprennent les dimensions du prototype. Cependant, étant donnée la grande facilité de construction de celui-ci (pas de découpes en biseau, pas d'angles particuliers, ...) il est aisément adaptable à n'importe quelles dimensions.

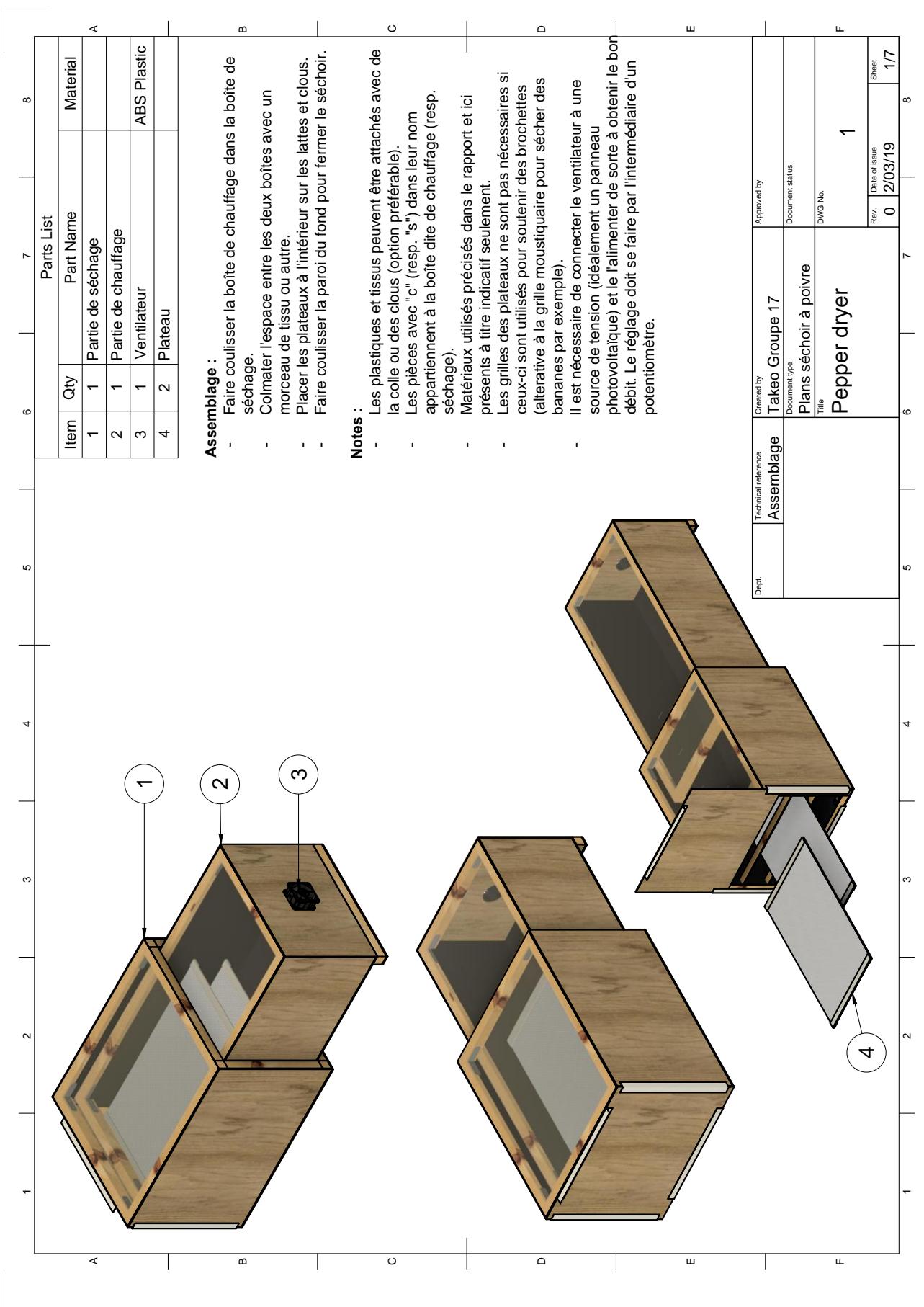
Pour le Cambodge, nous préconisons une largeur d'environ 1,5 m, une hauteur (pour la partie de chauffage) de 20 cm et une longueur fournie par le logiciel (avec les données du séchage de poivre données par le cahier des charges) de 8,76 m. Ces mesures peuvent sembler bien supérieures à celles du prototype conçu pour le projet, mais seule importe la validité des corrélations (facilement vérifiable à l'aide du logiciel).

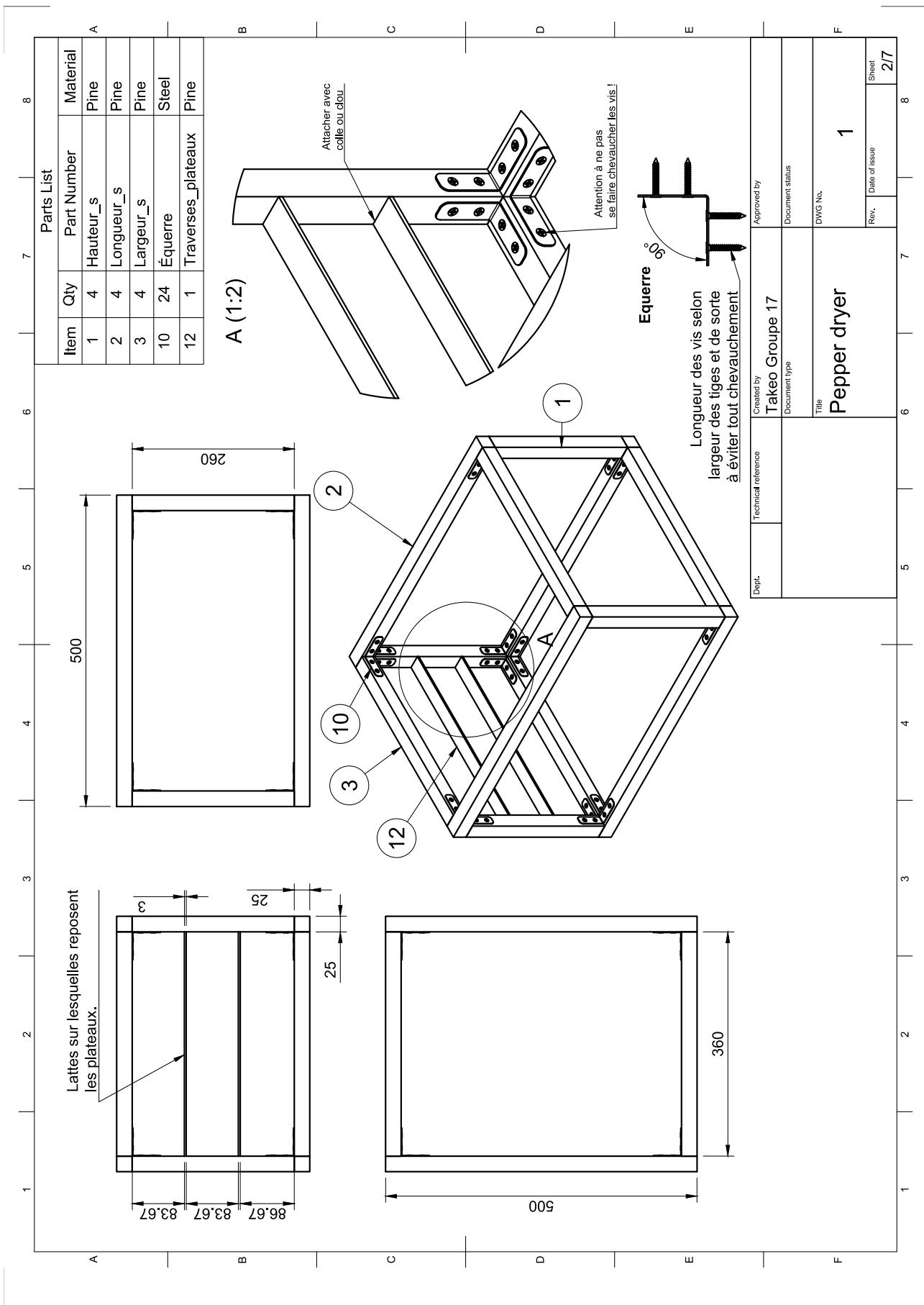
Tableau de calcul des dimensions du séchoir : (les notations sont les mêmes que celles reprises dans les plans ci-dessous)

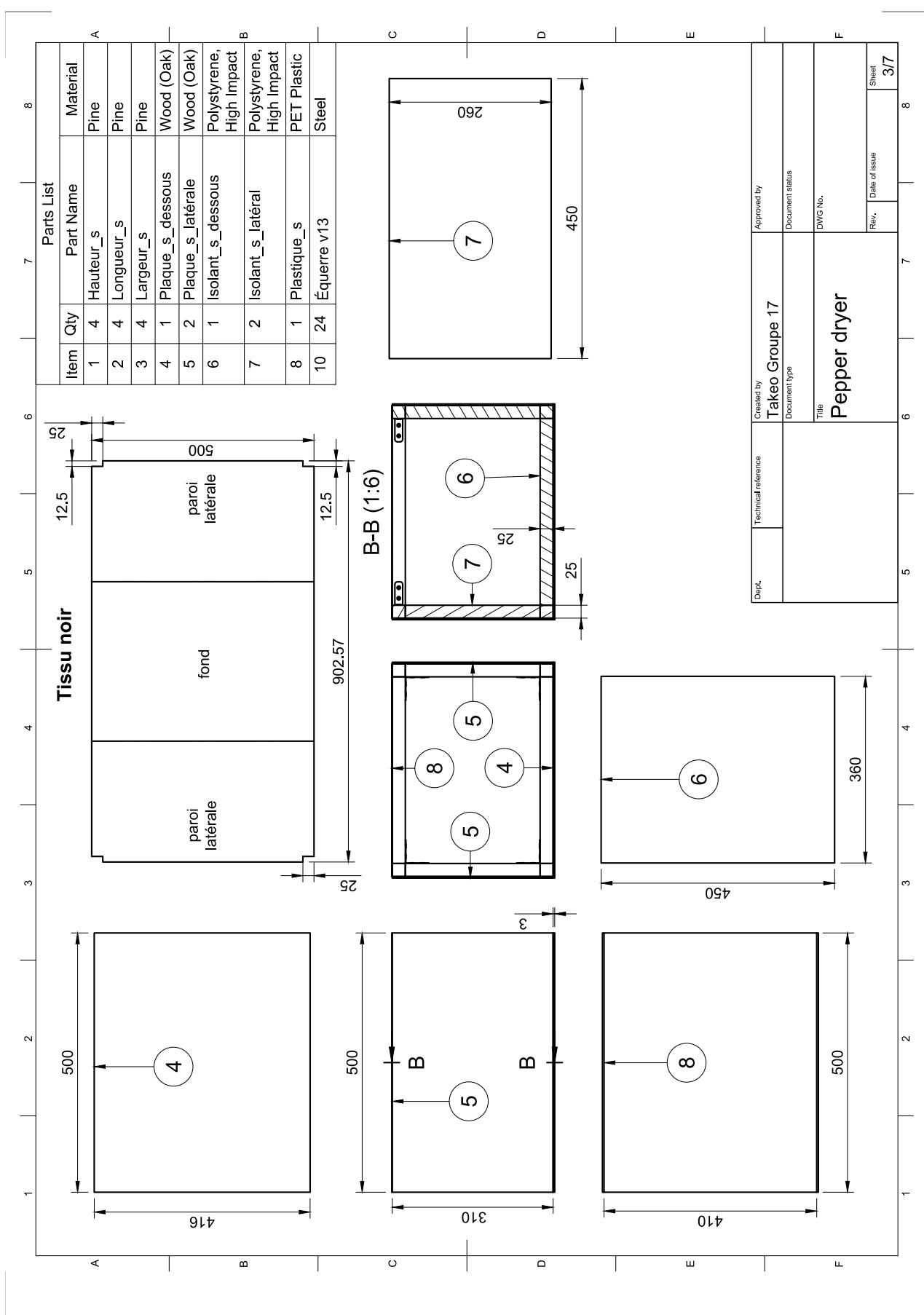
|                           |    |                                                                                                |          |
|---------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| largeur_tiges             | cm | 2.5 cm                                                                                         | 2.50     |
| largeur_s                 | cm | largeur_c + 2 * largeur_tiges + 2 * écart_c_s                                                  | 36.00    |
| hauteur_s                 | cm | hauteur_c + 2 * largeur_tiges + 2 * écart_c_s                                                  | 26.00    |
| longueur_s                | cm | 45 cm                                                                                          | 45.00    |
| longueur_c                | cm | longueur_tot - longueur_s                                                                      | 75.00    |
| épaisseur_plaques         | mm | 3 mm                                                                                           | 3.00     |
| épaisseur_plastique       | mm | 1 mm                                                                                           | 1.00     |
| épaisseur_isolant         | cm | largeur_tiges                                                                                  | 2.50     |
| écart_c_s                 | cm | 0.5 cm                                                                                         | 0.50     |
| hauteur_c                 | cm | 20 cm                                                                                          | 20.00    |
| largeur_c                 | cm | 30 cm                                                                                          | 30.00    |
| longueur_tot              | cm | 120 cm                                                                                         | 120.00   |
| diamètre_ventilateur      | mm | 50 mm                                                                                          | 50.00    |
| épaisseur_traverses       | mm | 3 mm                                                                                           | 3.00     |
| hauteur_traverses         |    | 1 / 3                                                                                          | 0.333333 |
| hauteur_clous             | mm | hauteur_traverses * hauteur_s + épaisseur_traverses - 1 mm - largeur_tiges - épaisseur_plaques | 60.667   |
| épaisseur_profilé_plateau | mm | 3 mm                                                                                           | 3.00     |
| largeur_profilé_plateau   | mm | 20 mm                                                                                          | 20.00    |
| largeur_plateau           | mm | largeur_c - 2 * marge_plateau                                                                  | 280.00   |
| longueur_plateau          | mm | longueur_s + 2 * largeur_tiges                                                                 | 500.00   |
| marge_plateau             | mm | 10 mm                                                                                          | 10.00    |
| épaisseur_grille          | mm | 0.2 mm                                                                                         | 0.20     |
| épaisseur_tissu           | mm | 0.5 mm                                                                                         | 0.50     |

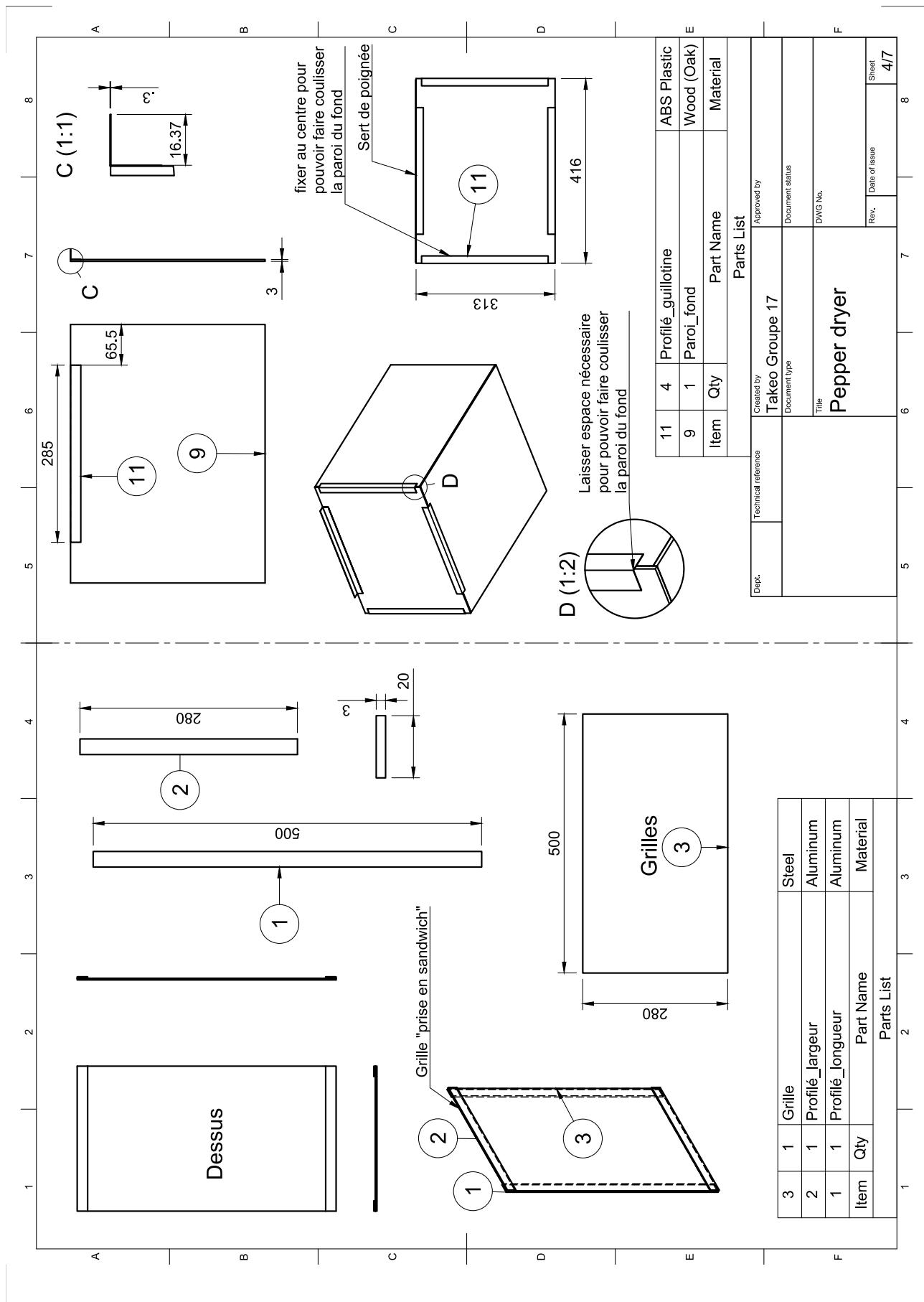
Les fichiers CAD sont disponibles sur le GitHub du projet : <https://github.com/ArnaudSaison/Takeo-Team-Projet-BA1>.

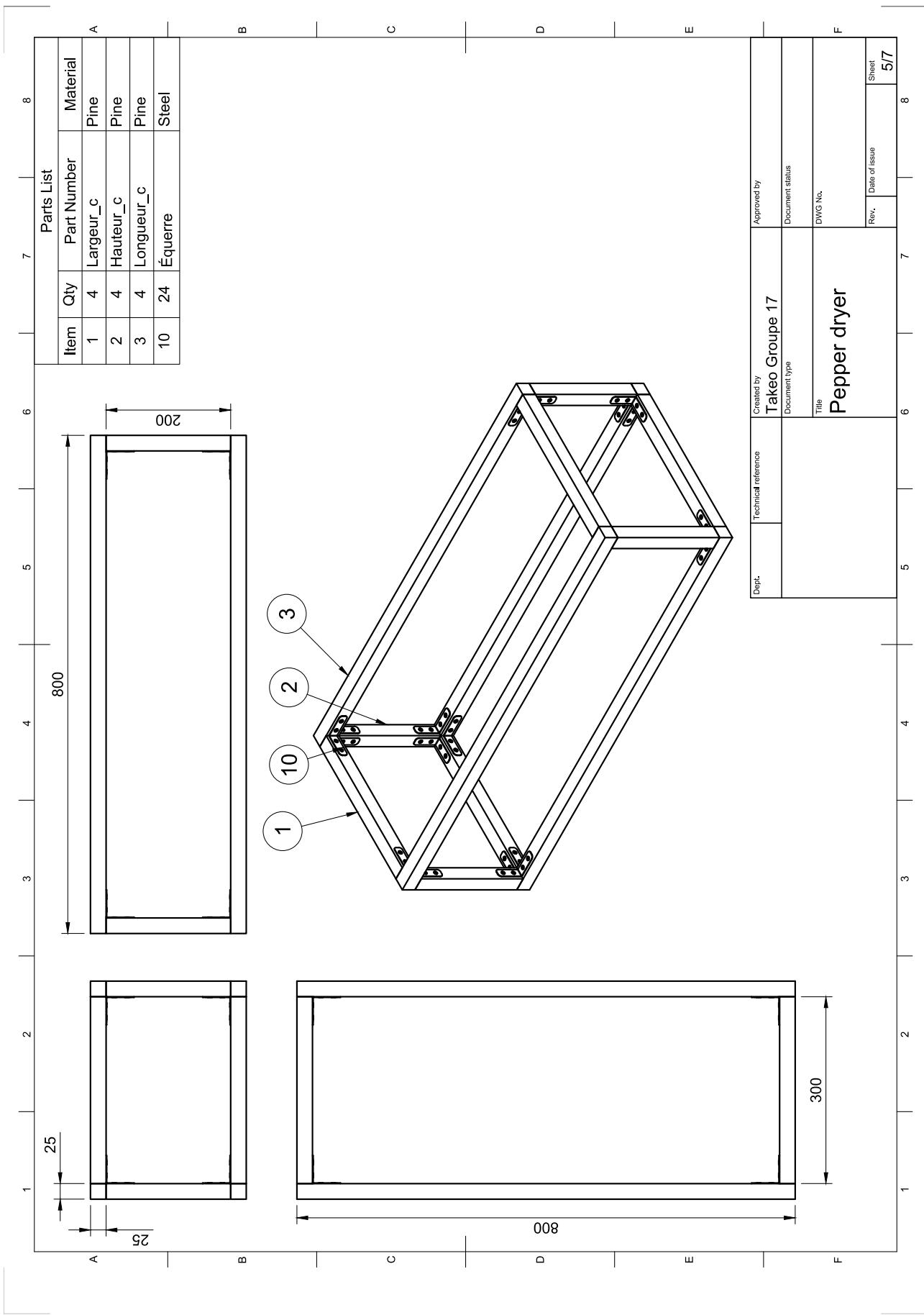
Il est important de noter que pour un séchoir plus grand, la ventilation doit être adaptée. Le plus important est que le flux d'air soit le plus laminaire possible. Dans tous les cas, le ventilateur doit idéalement être alimenté par un panneau photovoltaïque.

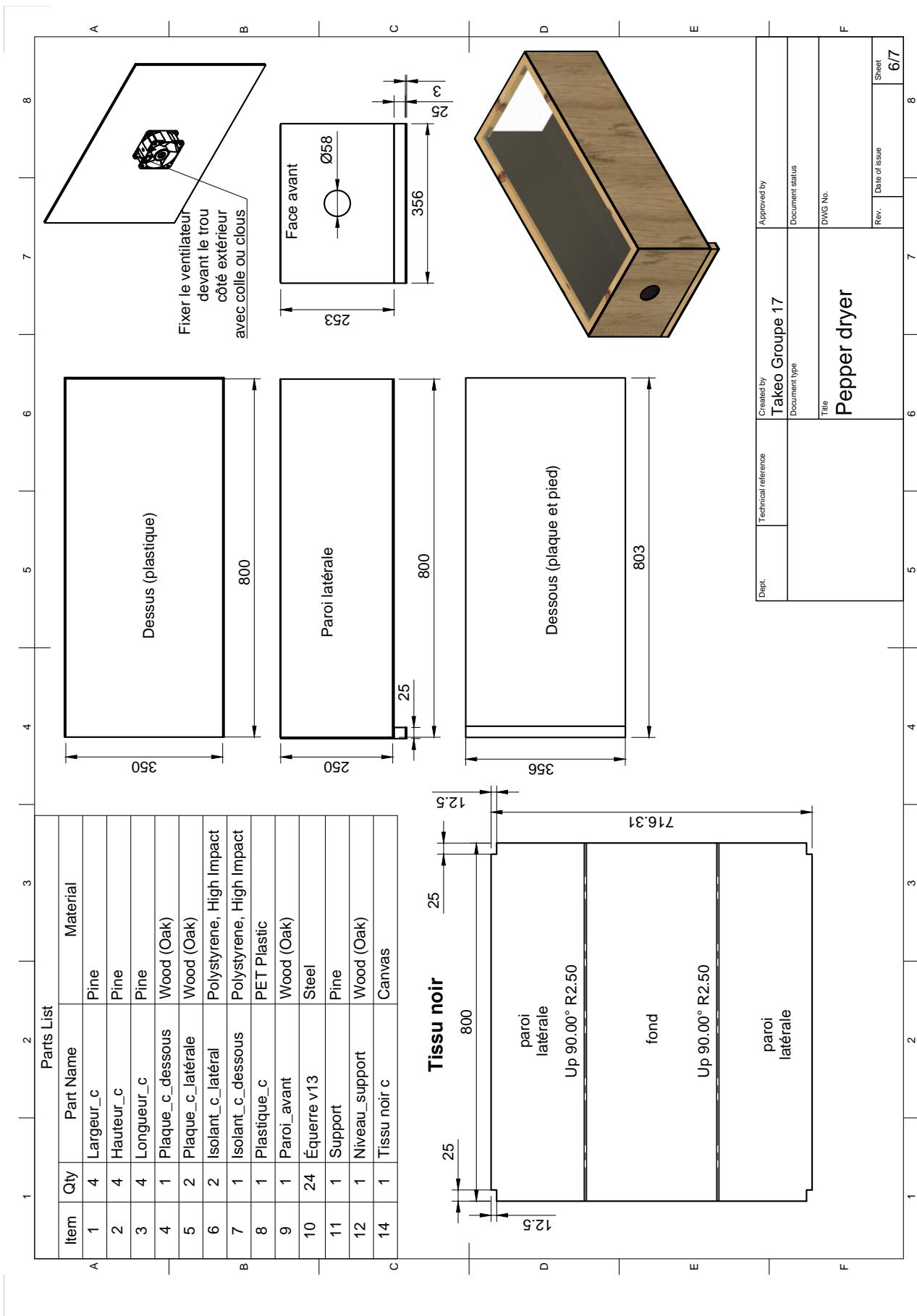


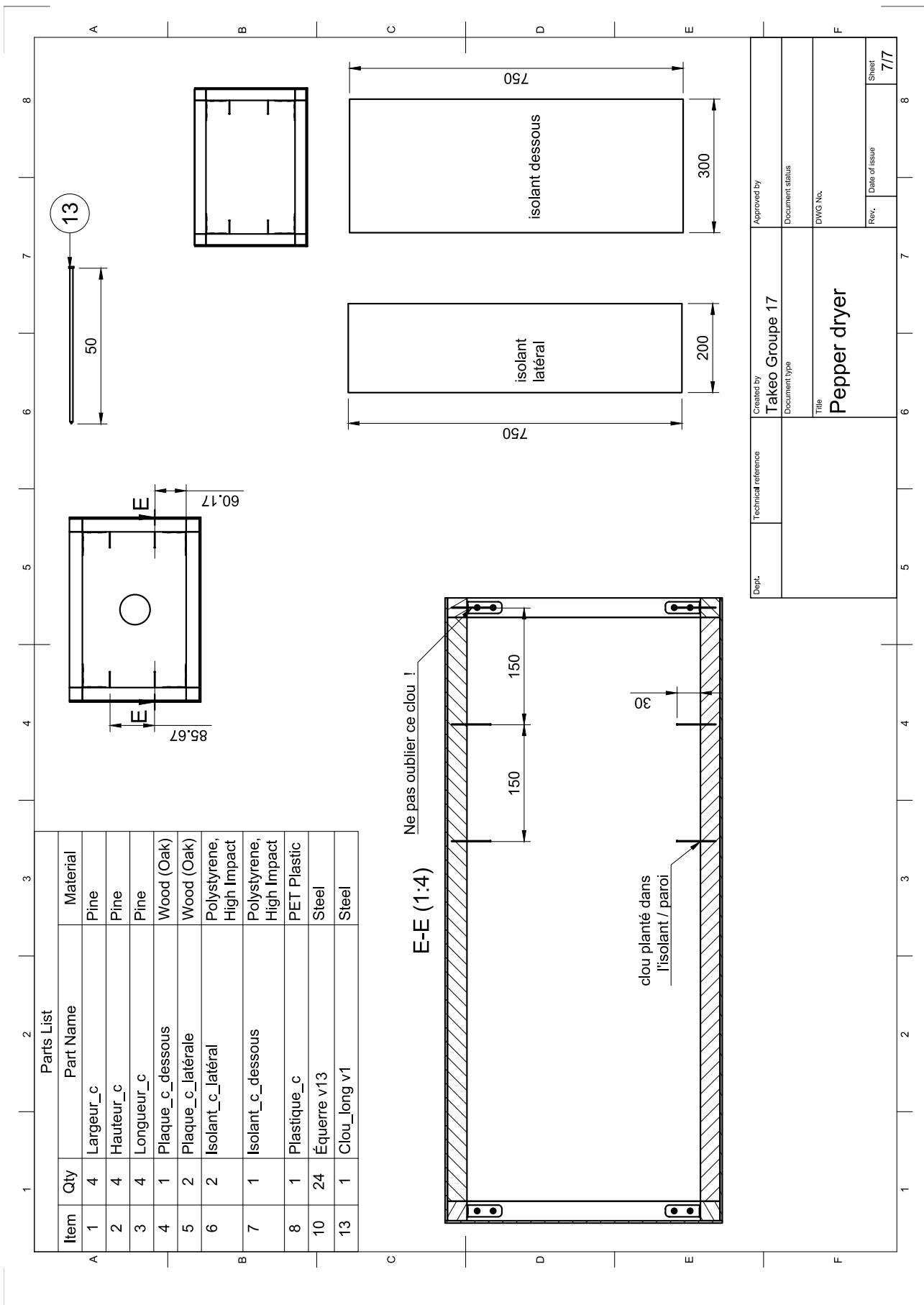












## Annexe 3 - Notations

| Données                                            | Symbolé              | Unité                     |
|----------------------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Débit d'air sec                                    | Q                    | $\frac{kg_{air\ sec}}{s}$ |
| Débit d'air humide                                 | J                    | $\frac{kg_{eau}}{s}$      |
| Humidité ambiante                                  | $Y_{amb}$            | /                         |
| Humidité maximale                                  | $Y_{max}$            | /                         |
| Temps de séchage                                   | $\Delta t_{séchage}$ | s                         |
| Fraction massique initiale                         | $X_i$                | /                         |
| Fraction massique finale                           | $X_f$                | /                         |
| Masse de poivre initiale                           | $M_p\ initiale$      | Kg                        |
| Masse de poivre finale                             | $M_p\ finale$        | Kg                        |
| Masse d'eau initiale                               | $M_{eau\ initiale}$  | Kg                        |
| Masse d'eau finale                                 | $M_{eau\ finale}$    | Kg                        |
| Masse de matière sèche                             | $M_{matière\ sèche}$ | Kg                        |
| Longueur de la section                             | L                    | m                         |
| Largueur de la section                             | H                    | m                         |
| Température que l'air doit atteindre dans la boîte | T                    | K                         |
| Température du sol de la serre                     | $T_s$                | K                         |
| Température du plastique de la serre               | $T_p$                | K                         |
| Flux solaire direct                                | $F_d$                | $\frac{W}{m^2}$           |
| Flux solaire indirect                              | $F_i$                | $\frac{W}{m^2}$           |
| Rayonnement émanant du sol de la serre             | $F_s$                | $\frac{W}{m^2}$           |
| Rayonnement émanant du plastique de la serre       | $F_p$                | $\frac{W}{m^2}$           |
| Coefficient d'échange thermique                    | h                    | $\frac{W}{K\ m^2}$        |
| Enthalpie massique d'évaporation de l'eau          | $\Delta H_{vap}$     | $\frac{J}{kg}$            |

## Annexe 4 - Tables de valeurs

**Table A.6** Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure (101325 Pa)

| T (K) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$ (J/kg·K) | $\mu$ (kg/m·s)         | $\nu$ (m <sup>2</sup> /s) | k (W/m·K) | $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s) | Pr    |
|-------|-----------------------------|----------------|------------------------|---------------------------|-----------|------------------------------|-------|
| Air   |                             |                |                        |                           |           |                              |       |
| 100   | 3.605                       | 1039           | $0.711 \times 10^{-5}$ | $0.197 \times 10^{-5}$    | 0.00941   | $0.251 \times 10^{-5}$       | 0.784 |
| 150   | 2.368                       | 1012           | 1.035                  | 0.437                     | 0.01406   | 0.587                        | 0.745 |
| 200   | 1.769                       | 1007           | 1.333                  | 0.754                     | 0.01836   | 1.031                        | 0.731 |
| 250   | 1.412                       | 1006           | 1.606                  | 1.137                     | 0.02241   | 1.578                        | 0.721 |
| 260   | 1.358                       | 1006           | 1.649                  | 1.214                     | 0.02329   | 1.705                        | 0.712 |
| 270   | 1.308                       | 1006           | 1.699                  | 1.299                     | 0.02400   | 1.824                        | 0.712 |
| 280   | 1.261                       | 1006           | 1.747                  | 1.385                     | 0.02473   | 1.879                        | 0.711 |
| 290   | 1.217                       | 1006           | 1.795                  | 1.475                     | 0.02544   | 2.078                        | 0.710 |
| 300   | 1.177                       | 1007           | 1.857                  | 1.578                     | 0.02623   | 2.213                        | 0.713 |
| 310   | 1.139                       | 1007           | 1.889                  | 1.659                     | 0.02684   | 2.340                        | 0.709 |
| 320   | 1.103                       | 1008           | 1.935                  | 1.754                     | 0.02753   | 2.476                        | 0.708 |
| 330   | 1.070                       | 1008           | 1.981                  | 1.851                     | 0.02821   | 2.616                        | 0.708 |
| 340   | 1.038                       | 1009           | 2.025                  | 1.951                     | 0.02888   | 2.821                        | 0.707 |
| 350   | 1.008                       | 1009           | 2.090                  | 2.073                     | 0.02984   | 2.931                        | 0.707 |
| 400   | 0.8821                      | 1014           | 2.310                  | 2.619                     | 0.03328   | 3.721                        | 0.704 |
| 450   | 0.7840                      | 1021           | 2.517                  | 3.210                     | 0.03656   | 4.567                        | 0.703 |
| 500   | 0.7056                      | 1030           | 2.713                  | 3.845                     | 0.03971   | 5.464                        | 0.704 |
| 550   | 0.6414                      | 1040           | 2.902                  | 4.524                     | 0.04277   | 6.412                        | 0.706 |
| 600   | 0.5880                      | 1051           | 3.082                  | 5.242                     | 0.04573   | 7.400                        | 0.708 |
| 650   | 0.5427                      | 1063           | 3.257                  | 6.001                     | 0.04863   | 8.430                        | 0.712 |
| 700   | 0.5040                      | 1075           | 3.425                  | 6.796                     | 0.05146   | 9.498                        | 0.715 |
| 750   | 0.4704                      | 1087           | 3.588                  | 7.623                     | 0.05425   | 10.61                        | 0.719 |
| 800   | 0.4410                      | 1099           | 3.747                  | 8.497                     | 0.05699   | 11.76                        | 0.723 |
| 850   | 0.4150                      | 1110           | 3.901                  | 9.400                     | 0.05969   | 12.96                        | 0.725 |
| 900   | 0.3920                      | 1121           | 4.052                  | 10.34                     | 0.06237   | 14.19                        | 0.728 |
| 950   | 0.3716                      | 1131           | 4.199                  | 11.30                     | 0.06501   | 15.47                        | 0.731 |
| 1000  | 0.3528                      | 1142           | 4.343                  | 12.31                     | 0.06763   | 16.79                        | 0.733 |
| 1100  | 0.3207                      | 1159           | 4.622                  | 14.41                     | 0.07281   | 19.59                        | 0.736 |
| 1200  | 0.2940                      | 1175           | 4.891                  | 16.64                     | 0.07792   | 22.56                        | 0.738 |
| 1300  | 0.2714                      | 1189           | 5.151                  | 18.98                     | 0.08297   | 25.71                        | 0.738 |
| 1400  | 0.2520                      | 1201           | 5.403                  | 21.44                     | 0.08798   | 29.05                        | 0.738 |
| 1500  | 0.2352                      | 1211           | 5.648                  | 23.99                     | 0.09296   | 32.64                        | 0.735 |

[11]

# Annexe 5 - Code du logiciel

Tout le code est disponible sur le GitHub de projet à l'adresse :

<https://github.com/ArnaudSaison/Takeo-Team-Projet-BA1>

## FICHIER 1 – CODE PRINCIPAL

""""

*Takeo*

*Logiciel pour le dimensionnement du séchoir à poivre créé dans le cadre du projet "Pepper Challenge".*

*Auteurs : Arnaud Saison, Michaël Feldman, Hind Bakkali Tahiri, Younes Bouhjar, Idil Ari, Joshua Nicdao Blanco*

*Date : 2018 - 2019*

""""

```
import Effet_de_serre as eds
import Environnement as env
import Ventilation as vent

mode_par_defaut = "énergie"
msg_erreur = "Valeur non valide, veuillez réessayer"
rho = 1.177
DHvap = 2346.2e3 # J/kg
Cairsec = 1009 # J/(kg * K)

Code pour formatter l'affichage
def printline(largeur=90):
 """Fonction qui imprime une ligne de séparation"""
 print(format("\n" + "#" * largeur, "gras"))

def format(s, c="rouge"):
 """Fonction qui met un texte dans le format demandé"""
 dico_styles = {"reset": "\u001b[0m", "erreur": "\u001b[31m", "gras": "\u001b[1m", "blanc": "\u001b[30;1m",
 "vert": "\u001b[32m",
 "bleu": "\u001b[34m", "rouge": "\u001b[31m"}
 assert c in dico_styles
 return dico_styles[c] + s + dico_styles["reset"]

Données de test
def donnees(mode=1):
```

```

"""Fonction qui permet d'appeler des valeurs de test"""
Tfluide = 65 + 273.15
a = .30
b = .2
Tamb = 20 + 273.15
Esol = 19.6
Temps_sol = 12
HRamb = 45
Masse_aliment = .5
Masse_epmsi = 3
Masse_epmsf = .1
Temps_sec = 5
HRmax = 20

if mode == 1:
 Fd = 900
 Fi = 100

else:
 # Calcul des flux solaires
 Fd, Fi = env.flux_solaires(Tamb, Esol, Temps_sol, HRamb)

return Tfluide, a, b, Tamb, Fd, Fi, HRamb, Masse_aliment, Masse_epmsi, Masse_epmsf, Temps_sec, HRmax

```

**def** inputIfDeci(msg, msg\_erreur=msg\_erreur):

"""

*Fonction qui vérifie que les inputs sont des nombres et re-demande tant que ce n'en sont pas.*

```

:param msg: message à afficher quand on demande un input
:param msg_erreur: message à afficher quand l'input d'est pas un nombre
:return: input
"""

val = ""
cond = "True"

while cond:
 try:
 val = float(input(msg))
 cond = False
 except:

```

```

 print(format("Erreur : " + msg_erreur, "erreur"))

return val

def inputIfDuree(msg_lever, msg_coucher, msg_erreur=msg_erreur):
 """
 Fonction qui récupère une duree d'ensoleillement à partir d'une heure de lever et d'une heure de coucher.

 :return: (float) duree d'ensoleillement
 """

 Temps = 0
 cond = "True"

 while cond:
 try:
 # On récupère les heures de coucher et lever
 lever = input(msg_lever)
 coucher = input(msg_coucher)

 # On essaye de les convertir en une duree
 Temps = env.duree_journee(lever, coucher)

 # On arrête la boucle en mettant la condition à False
 cond = False
 except:
 print(format("Erreur : " + msg_erreur, "erreur"))

 return Temps

def userInputs(mode=mode_par_defaut):
 """
 Fonction qui traite les inputs.

 :return: toutes le valeurs des inputs dans l'ordre suivant :
 Tfliude, a, b, Tamb, Fd, Fi, HRamb, Masse_aliment, Masse_epmsi, Masse_epmsf, Temps_sec, HRmax
 """

 # Effet de serre
 printline()
 print(format("► Partie Effet de serre :\n", "gras"))

 Tfliude = inputIfDeci("T que l'on veut atteindre [C°] = ") + 273.15
 a = inputIfDeci("Longueur de la section de la boîte [m] = ")

```

```

b = inputIfDeci("Hauteur de la section de la boîte [m] = ")

Environnement : température et humidité ambiante, temps d'ensoleillement et énergie totale captée en une
journée

printline()
print(format("► Partie Environnement :\n", "gras"))

Tamb = inputIfDeci("Température ambiante [C°] = ") + 273.15
HRamb = inputIfDeci("Humidité relative ambiante en pourcents = ")

Calcul des flux solaires

if mode == "énergie":
 Esol = inputIfDeci("Energie solaire reçue au sol au cours d'une journée [MJ/m²] = ")
 Temps_sol = inputIfDuree("Heure de lever du soleil (exemple : 18h30)= ",
 "Heure de coucher du soleil (exemple : 18h30)= ",
 format("Echec de la conversion en duree. Veuillez à bien formater les heures. Veuillez
réessayer.", "erreur"))
 Fd, Fi = env.flux_solaires(Tamb, Esol, Temps_sol, HRamb)

elif mode == "flux moyen":
 Fd = inputIfDeci("Flux solaire direct [W/m²] = ")
 Fi = env.flux_indirect(Tamb, HRamb)

elif mode == "labo":
 Fd = inputIfDeci("Flux solaire direct [W/m²] = ")
 Fi = inputIfDeci("Flux solaire indirect [W/m²] = ")

Ventilation

printline()
print(format("► Partie Ventilation :\n", "gras"))

Masse_aliment = inputIfDeci("Masse de l'aliment que vous souhaitez sécher [kg] = ")
Masse_epmsi = inputIfDeci("Masse d'eau par kg de matière sèche initiale [kg] = ")
Masse_epmsf = inputIfDeci("Masse d'eau par kg de matière sèche que l'on souhaite atteindre au final [kg] = ")

assert Masse_epmsi > Masse_epmsf, "Erreur : vous avez entré une masse d'eau finale dans l'aliment
supérieure à la masse d'eau initiale !"

Temps_sec = inputIfDeci("Temps de séchage souhaité [heures] = ")
HRmax = inputIfDeci("Humidité relative maximale dans le séchoir en pourcents = ")

return Tfluide, a, b, Tamb, Fd, Fi, HRamb, Masse_aliment, Masse_epmsi, Masse_epmsf, Temps_sec, HRmax

```

```

def dimensionnement(P, I, Q, T, Tamb, J):
 """
 Fonction qui calcule la longueur de la zone de chauffage permettant d'obtenir la température voulue dans la zone de séchage.

 :param P: puissance développée par effet de serre par mètre carré de serre en W / m^2
 :param I: largeur de la boîte de chauffage en m
 :param Q: débit d'air nécessaire en kg / s
 :param T: température que l'on veut atteindre dans la zone de séchage
 :param Tamb: température de l'air ambiant
 :return: longueur de la zone de chauffage
 """

 L = ((J * DHvap) + ((T - Tamb) * Cairsec * Q)) / (P * I)
 return L

```

```

def main(mode="labo"):
 """
 Fonction principale qui exécute tout le code.
 """

 # INPUTS
 if "test" in mode:
 if mode == "test":
 Tfluid, a, b, Tamb, Fd, Fi, HRamb, Masse_aliment, Masse_epmsi, Masse_epmsf, Temps_sec, HRmax =
 donnees(0)

 elif mode == "test1":
 Tfluid, a, b, Tamb, Fd, Fi, HRamb, Masse_aliment, Masse_epmsi, Masse_epmsf, Temps_sec, HRmax =
 donnees(1)

 else:
 Tfluid, a, b, Tamb, Fd, Fi, HRamb, Masse_aliment, Masse_epmsi, Masse_epmsf, Temps_sec, HRmax =
 userInputs(mode)

 # OUPUTS
 Yamb = env.HRversY(HRamb, Tamb)
 Ymax = env.HRversY(HRmax, Tfluid)

 Q, J = vent.Bloc_ventilation(Masse_aliment, Masse_epmsi, Masse_epmsf, Yamb, Ymax, Temps_sec)
 P, succes = eds.Bloc_effet_de_serre(Tfluid, Fd, Fi, a, b)

 D = Q / rho

```

```

L = dimensionnement(P[0], a, Q, Tfluide, Tamb, J)

#print
printline()
print(format("► Résultats : ", "gras"))

if succes is True:
 print(format("Le logiciel a trouvé une solution", "vert"))
 print("\u0001b[1;32m" + "\nLongueur =", round(L, 2), "m" + "\u0001b[0m",
 "\nJ =\t", round(J, 6), "kg/s",
 "\nQ =\t", round(Q, 6), "kg/s",
 "\u0001b[1;32m" + "\nDébit =\t", round(D, 6), "m\u0003/s",
 "\nDébit =\t", round(D * 60, 6), "m\u0003/min",
 "\nDébit =\t", round(D * 3600, 3), "m\u0003/h",
 "\nDébit =\t", round(D / (0.02 ** 2 * 3.1416), 3), "m/s (pour 4cm de dimaètre)" + "\u0001b[0m",
 "\nYamb =\t", round(Yamb, 6), "kg d'eau par kg d'air sec",
 "\nYmax =\t", round(Ymax, 6), "kg d'eau par kg d'air sec",
 "\nFd =\t", round(Fd, 1), "W/m\u0003",
 "\nFi =\t", round(Fi, 1), "W/m\u0003",
 "\nP =\t", round(P[0], 1), "W/m\u0003",
 "\nPuissance théorique totale =", round(L * a * P[0], 2), "W",
 "\nTs =\t", round(P[1], 1), "K\t=", round(P[1] - 273.15, 1), "\u00b0C",
 "\nTp =\t", round(P[2], 1), "K\t=", round(P[2] - 273.15, 1), "\u00b0C",
 "\nFs =\t", round(P[3], 1), "W/m\u0003",
 "\nFp =\t", round(P[4], 1), "W/m\u0003",
 "\nRa =\t", int(P[5]),
 "\nRa / 10\u00b9\u2077 =", round(P[5] / 10 ** 7, 2),
 "\u0001b[1;35m" + "\nValidité des corrélations :", 10 ** 7 < P[5] < (2 * 10 ** 11), "\u0001b[0m", # détermine

```

*si la nombre de Rayleigh est valable par rapport au nombre de Nusselt*

```

"\nNu =\t", round(P[6], 3),
"\u0001b[1;35m" + "\nh =\t", round(P[7], 2)), "\u0001b[0m"

```

**else:**

```

print(format("Le logiciel n'a pas trouvé de solution. \nVeuillez vérifier que vos valeurs rentrent dans le
domaine de validité du programme.", "erreur"))

```

**return None**

```

if __name__ == '__main__':
 # Impression des instructions
 printline()

```

```

print("""Choisissez le mode de fonctionnement du logiciel :
- test : calcul classique des flux solaires et données issues de la section \"données\" du code
- test1 : toutes les données, y compris les flux solaires, sont à entrer dans la section \"données\" du code
- labo : vous entrez directement les valeurs, y compris celles de flux solaire
- flux moyen : vous devez entrer le flux direct moyen, le flux indirect est calculé automatiquement
- énergie : vous devez entrer l'énergie totale reçue sur une journée par mètre carré, ainsi que les heures de lever et coucher du soleil
- appuyez sur ENTER pour utiliser le logiciel en mode classique (flux moyen). Vous devrez alors entrer toutes les données de terrain."")
```

```

input du mode de fonctionnement
m = input("\n\nmode (Choisissez le mode de fonctionnement : [test / test1 / labo / flux moyen / énergie]) : ")
if m not in ["test", "test1", "labo", "flux moyen", "énergie"]:
 m = mode_par_defaut

print("\nmode activé :", format(m, "vert"))

Exécution du programme
main(m)
```

## FICHIER 2 – EFFET\_DE\_SERRE

""""

*Takeo*

### CODE DU BLOC EFFET DE SERRE

|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| <i>grandeur</i> | <i>symbole [unités]</i> |
|-----------------|-------------------------|

*Les inputs :*

- Température que l'on veut atteindre dans la serre      *T*      [C°]
- Flux solaire direct                                            *F<sub>d</sub>*      [W/m<sup>2</sup>]
- Flux solaire indirect                                        *F<sub>i</sub>*      [W/m<sup>2</sup>]
- constantes : sigma, g, v, alpha, Pr, k                    *c*      (facultatif)
- longueur section                                            *a*      [m]
- hauteur de la section                                      *b*      [m]

*Les outputs :*

- (list)      Puissance développée par la serre :

*P, Ts, Tp, Fs, Fp (puissance, température au sol, température du plastique, rayonnement du sol, rayonnement du plastique)*

""""

```
import numpy as np
```

```

import scipy.optimize as sp_op
import scipy.constants as cste

g = cste.g # accélération gravifique
SIGMA = cste.sigma # constante de Stefan Boltzmann pour équation corps noir

Constantes : sigma, g, v, alpha, Pr, k,
constantes300 = (SIGMA, g, 1.578e-5, 2.213e-5, 0.713, 0.02623)
constantes310 = (SIGMA, g, 1.659e-5, 2.340e-5, 0.709, 0.02684)
constantes320 = (SIGMA, g, 1.754e-5, 2.476e-5, 0.708, 0.02753)
constantes330 = (SIGMA, g, 1.851e-5, 2.616e-5, 0.708, 0.02821)
constantes340 = (SIGMA, g, 1.951e-5, 2.821e-5, 0.707, 0.02888)

def Bloc_effet_de_serre(T, Fd, Fi, a, b, c=constantes340):
 """
 Calcule la puissance du capteur solaire en W/m^2.
 """

 # Constantes convection
 sigma, g, v, alpha, Pr, k, beta = c[0], c[1], c[2], c[3], c[4], c[5], (1 / T)

 # Longueur caractéristique
 L = 2 * a * b / (a + b)

 # Définition du système d'équations
 def sys(x):
 # Inconnues
 P, Ts, Tp, Fs, Fp = x[0], x[1], x[2], x[3], x[4]

 # Inconnues convection
 Ra, Nu, h = x[5], x[6], x[7]

 # Vecteur qui va contenir les équations
 E = np.empty(8)

 # Equations
 E[0] = h * (Tp - T) + h * (Ts - T) - P
 E[1] = sigma * Tp ** 4 - Fp
 E[2] = sigma * Ts ** 4 - Fs
 E[3] = P + Fp - Fd - Fi
 E[4] = Fs + h * (Ts - T) - Fd - Fp

 return E

```

```

Equations de la convection

E[5] = (h * L / k) - Nu
E[6] = ((g * beta * (((Tp + Ts) / 2) - T) * L ** 3) / (alpha * v)) - Ra
E[7] = (0.14 * (Ra ** (1 / 3)) * ((1.0 + 0.0107 * Pr) / (1.0 + 0.01 * Pr))) - Nu

return E

Matrice d'initialisation qui va servir de base pour trouver les racines du système

x0 = np.array([100.0, 300.0, 300.0, 400.0, 400.0, 1.0, 1.0, 4.0])
x0 = np.array([1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 4.0])

Calcul des racines du systèmes

sol = sp_op.root(sys, x0)

print("\n\n\n", sol, "\n\n\n")

return sol.x, sol.success

```

## FICHIER 3 – ENVIRONNEMENT

""""

*Takeo*

### CODE DU BLOC EFFET DE SERRE

grandeur                  symbole    [unités]

*Les inputs :*

- énergie solaire reçue   Esol      [MJ/m<sup>2</sup>]
- température ambiante   Tamb      [C°]
- temps d'exposition   Texp      [heures]
- humidité relative      HR      [adimensionnel] (exprimé en pourcents)

*Les outputs :*

- flux solaire direct   Fd      [W/m<sup>2</sup>]
- flux solaire indirect   Fi      [W/m<sup>2</sup>]
- humidité absolue      Y      [adimensionnelle]

""""

**import** math

**import** scipy.constants **as** cste

### # CONSTANTES

# température dont on connaît la pression de saturation (60°C) [K]

```

T0 = 333.15
constante des gaz parfaits [J/K]
R = cste.R
pression atmosphérique [Pa]
PATM = cste.atm
chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau [J/mol]
LAMBDA = 42440
constante de Stefan-Boltzmann [W/m²K⁴]
SIGMA = cste.sigma

```

.....

### Fonctions qui calculent le nombre d'heures dans une journée.

.....

```
def time2min(time):
```

"""Trasnforme l'heure en minutes"""

```
 return time[0] * 60 + time[1]
```

```
def min2time(min):
```

"""Trasnforme un nombre de minutes en heures"""

```
 hour = min // 60
```

```
 min = min % 60
```

```
 return (hour, min)
```

```
def min2hours(temp):
```

"""Converti un temps exprimé en heures et minutes vers un temps en heures"""

```
 return temp[0] + temp[1] / 60
```

```
def min2sec(min):
```

```
 return min * 60
```

```
def duree(debut, fin):
```

"""Renvoie la durée entre les deux heures données"""

```
 temps = time2min(fin) - time2min(debut)
```

```
 if temps < 0:
```

```
 temps += 24 * 60
```

```
 return min2time(temps)
```

```

def duree_journee(lever="6h30", coucher="18h30"):

 """Calcule la durée d'une journée à partir des heures de lever et de coucher du soleil."""

 # Nettoyage et découpage des heures

 lever = lever.replace(" ", "").split("h")

 lever[0], lever[1] = float(lever[0]), float(lever[1])

 coucher = coucher.replace(" ", "").split("h")

 coucher[0], coucher[1] = float(coucher[0]), float(coucher[1])

 # Calcul de la durée

 temps = duree(lever, coucher)

 temps = temps[0] + temps[1] / 60

 return temps

```

:::::

## Fonctions du bloc environnement

:::::

```
def FPsat(T):
```

:::::

*Fonction qui calcule la pression de saturation Psat en fonction de la température T.*

:::::

```
if T == T0:
```

```
 res = 2 * 10 ** 4
```

```
else:
```

```
 deltaT = 1 / T - 1 / T0 # [1/K]
```

```
 expo = -LAMBDA * deltaT / R # [adim]
```

```
 res = FPsat(T0) * math.exp(expo) # [Pa]
```

```
return res
```

*# on attribue des valeurs par défaut pour les grandeurs dans le cas où elles ne sont pas données (Tamb de 30°C, Esol de 19.6 MJ/m², HR de 80%)*

```
def flux_solaire(Tamb=303.15, Esol=19.6, Texp=12.0, HR=80.0):
```

:::::

*Fonction qui calcule le flux solaire direct et indirect grâce à l'énergie solaire qui atteint le sol en une journée.*

**:param** Tamb: (float) température ambiante en degrés Celsius

**:param** Esol: (float) énergie solaire reçue au cours d'une journée complète

```

:param Texp: (float) temps que dure une journée en heures
:return: - (float) Flux direct en W/m²
 - (float) Flux indirect en W/m²
"""

passage pourcents -> décimales
HR = HR / 100

flux direct :
Fd = 10 ** 4 * Esol / (36 * Texp) # 10**4 et 36 viennent de la conversion MJ -> J et h -> s

flux indirect :
Fi = flux_indirect(Tamb, HR)

return Fd, Fi

def flux_indirect(Tamb, HR):
 HR /= 100

 # flux indirect :
 Tr = LAMBDA * Tamb / (LAMBDA - R * Tamb * math.log(HR)) # Tr est la température de rosée [K] et le log
 est un ln dans ce module

 Tr -= 273.15 # passage de K à °C
 Tciel = Tamb * (0.711 + 0.0056 * Tr + 7.3 * 10 ** (-5) * Tr ** 2) ** 0.25 # on néglige le cosinus car il est proche
 de 0
 Fi = SIGMA * Tciel ** 4

 return Fi

def HRversY(HR, T):
 """

 Fonction qui calcule l'humidité absolue à partir de l'humidité relative

 :param HR: (float) humidité relative en pourcent (ex : HR = 80.0 est 80%)
 :return: (float) humidité absolue en kg d'eau par kg de matière sèche
 """

 HR = HR / 100 # passage pourcents -> décimales

 # humidité absolue :
 Psat = FPsat(T)
 Y = HR * 0.62 * Psat / (PATM - HR * Psat) # 0.62 = Mew/Mair

```

```
return Y
```

## FICHIER 4 – VENTILATION

:::::

Takeo

### CODE DU BLOC VENTILATION

| grandeur | symbole | [unités] |
|----------|---------|----------|
|----------|---------|----------|

Les inputs :

|                                           |               |                                    |
|-------------------------------------------|---------------|------------------------------------|
| - Masse de l'aliment que l'on veut sécher | Masse_aliment | [kg]                               |
| - Masse d'eau par matière sèche initiale  | Masse_epmsi   | [kg d'eau par kg de matière sèche] |
| - Masse d'eau par matière sèche finale    | Masse_epmsf   | [kg d'eau par kg de matière sèche] |
| -                                         | Yamb          | []                                 |
| -                                         | Ymax          | []                                 |
| - Temps de séchage souhaité               | Dt            | [secondes]                         |

Les outputs :

|                   |   |                  |
|-------------------|---|------------------|
| - débit d'air sec | Q | [kg d'air sec/s] |
|-------------------|---|------------------|

:::::

```
def Bloc_ventilation(Masse_aliment, Masse_epmsi, Masse_epmsf, Yamb, Ymax, Dt=16*3600):
```

:::::

Ce programme nous permet de trouver le débit d'air nécessaire à notre séchoir

Ce débit d'air est très important, car il va réguler l'humidité de la machine.

:::::

# Données

```
Masse_init_eau = Masse_epmsi / (Masse_epmsi + 1) * Masse_aliment
```

```
Masse_fin_eau = Masse_epmsf / (Masse_epmsi + 1) * Masse_aliment
```

```
D_masse = Masse_init_eau - Masse_fin_eau
```

```
Dt = Dt * 3600 # Conversion du temps en secondes
```

# Equations permettant de calculer par la suite le débit d'air sec

```
J = D_masse / Dt
```

```
Dy = Ymax - Yamb
```

# Calcul du débit d'air

```
Q_min = J / Dy
```

```
return Q_min, J
```

# Annexe 6 - Bibliographie

1. Histoire du poivre de Kampot | KADODÉ [Internet]. [cité 17 mars 2019]. Disponible sur: <https://kadode-kampot.com/fr/histoire-poivre-kampot>
2. Heilporn C. Contribution au développement d'une nouvelle technologie de séchage solaire: application à la mangue. [Bruxelles]: Université libre de Bruxelles, Ecole polytechnique de Bruxelles – Chimie et Science des Matériaux; 2013.
3. nF01a\_PropAir.pdf [Internet]. [cité 18 mars 2019]. Disponible sur: [https://media.xpair.com/auxidev/nF01a\\_PropAir.pdf](https://media.xpair.com/auxidev/nF01a_PropAir.pdf)
4. Air\_humide [Internet]. [cité 16 mars 2019]. Disponible sur: [http://sites-final.uclouvain.be/term/cours/auce2363/Air\\_humide.pdf](http://sites-final.uclouvain.be/term/cours/auce2363/Air_humide.pdf)
5. Les grandeurs hygrométriques [Internet]. [cité 16 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11243#02>
6. Thermodynamique. - Humidité absolue, humidité relative [Internet]. [cité 16 mars 2019]. Disponible sur: [http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/uc\\_HumiditeAbsolueRelative.html](http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/uc_HumiditeAbsolueRelative.html)
7. Formule de Clapeyron : définition de Formule de Clapeyron et synonymes de Formule de Clapeyron (français) [Internet]. [cité 16 mars 2019]. Disponible sur: <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Formule%20de%20Clapeyron/fr-fr/>
8. Zumdahl SS, DeCoste DJ. Chemical principles. 8th ed. Australia: Cengage Learning; 2017. 888 p.
9. Le rayonnement thermique du corps noir [Internet]. Encyclopédie de l'environnement. 2017 [cité 17 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-environnement.org/physique/le-rayonnement-thermique-du-corps-noir/>
10. Debaste F. Radiative transport of heat. :28.
11. Lienhard V JH, Lienhard IV JH. A heat transfer textbook. Quatrième édition. Cambridge: Phlogiston Press; 2004. 756 p.
12. Cambodia: Climate Data | IAMAT [Internet]. [cité 9 déc 2018]. Disponible sur: <https://www.iamat.org/country/cambodia/climate-data>
13. Required Air to Remove Moisture [Internet]. Engineering ToolBox. 2010 [cité 10 déc 2018]. Disponible sur: [https://www.engineeringtoolbox.com/moisture-remove-room-air-flow-d\\_1636.html](https://www.engineeringtoolbox.com/moisture-remove-room-air-flow-d_1636.html)
14. Wood. In: Wikipedia [Internet]. 2018 [cité 14 déc 2018]. Disponible sur: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wood&oldid=871304218>
15. Huile de lin. In: Wikipédia [Internet]. 2018 [cité 7 déc 2018]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Huile\\_de\\_lin&oldid=153553807](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Huile_de_lin&oldid=153553807)

16. DOP [Internet]. [cité 13 déc 2018]. Disponible sur: <https://www.peltierbois.com/nos-produits/certificats-et-doc-techniques/102-dop.html>
17. Energie Q. Comparatif : quel isolant est le moins cher ? [Internet]. QuelleEnergie. [cité 7 déc 2018]. Disponible sur: <https://www.quelleenergie.fr/magazine/economies-energie/comparatif-prix-isolants-18495/>
18. Quel isolant choisir ? [Internet]. [cité 7 déc 2018]. Disponible sur: <http://www.terrevivante.org/486-quel-isolant-choisir-.htm>