

Conceptualisation d'un séchoir solaire hybride



TABLE DES MATIÈRES

SÉCHOIR SOLAIRE HYBRIDE.....	1
CONCEPTUALISATION D'UN SÉCHOIR SOLAIRE HYBRIDE.....	1
MODULES DU SÉCHOIR SOLAIRE HYBRIDE CONCEPTUALISÉ.....	2
1. Structure en bois.....	3
2. Caisse de séchage isolée.....	4
3. Caisson de chauffe solaire.....	5
4. Conduits de ventilation.....	6
5. Module de chauffe secondaire.....	7
6. Module de condensation à Peltier.....	8
7. Alimentation électrique.....	9
8. Système de régulation.....	10
SIMULATION NUMÉRIQUE.....	11
1. Données climatiques.....	11
2. Air de séchage.....	12
3. Calcul du point de rosée.....	13
4. Comportement du module de condensation.....	14
5. Comportement du corps de chauffe solaire.....	15
VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE.....	16
THÉORIE APPLIQUÉE.....	17
Loi fondamentale de la thermodynamique.....	17
Isolation thermique.....	18
Air humide.....	19
L'humidité.....	19
Humidité absolue.....	19
Masse volumique de l'air humide.....	19
La masse volumique de l'air sec.....	19
La pression partielle de la vapeur d'eau.....	19
La pression de vapeur saturante.....	20
Le point de rosée.....	21
CP de l'air humide.....	22
Enthalpie de l'air humide.....	23
Condensation de la vapeur d'eau par le froid.....	24
CONCLUSION.....	26

Séchoir solaire hybride



Un séchoir solaire hybride est conçu pour exploiter principalement l'énergie solaire, tout en intégrant des sources d'énergie secondaires (électrique, biomasse, etc.) pour conditionner l'air nécessaire au séchage des aliments. Ce type de séchoir est particulièrement adapté aux conditions climatiques variables, lorsque l'énergie solaire seule ne suffit pas.

Pour maximiser son efficacité, il est essentiel de :

Connaître les conditions climatiques du lieu d'installation (température et humidité annuelle).

Dimensionner correctement les modules du séchoir pour une utilisation optimale tout au long de l'année.

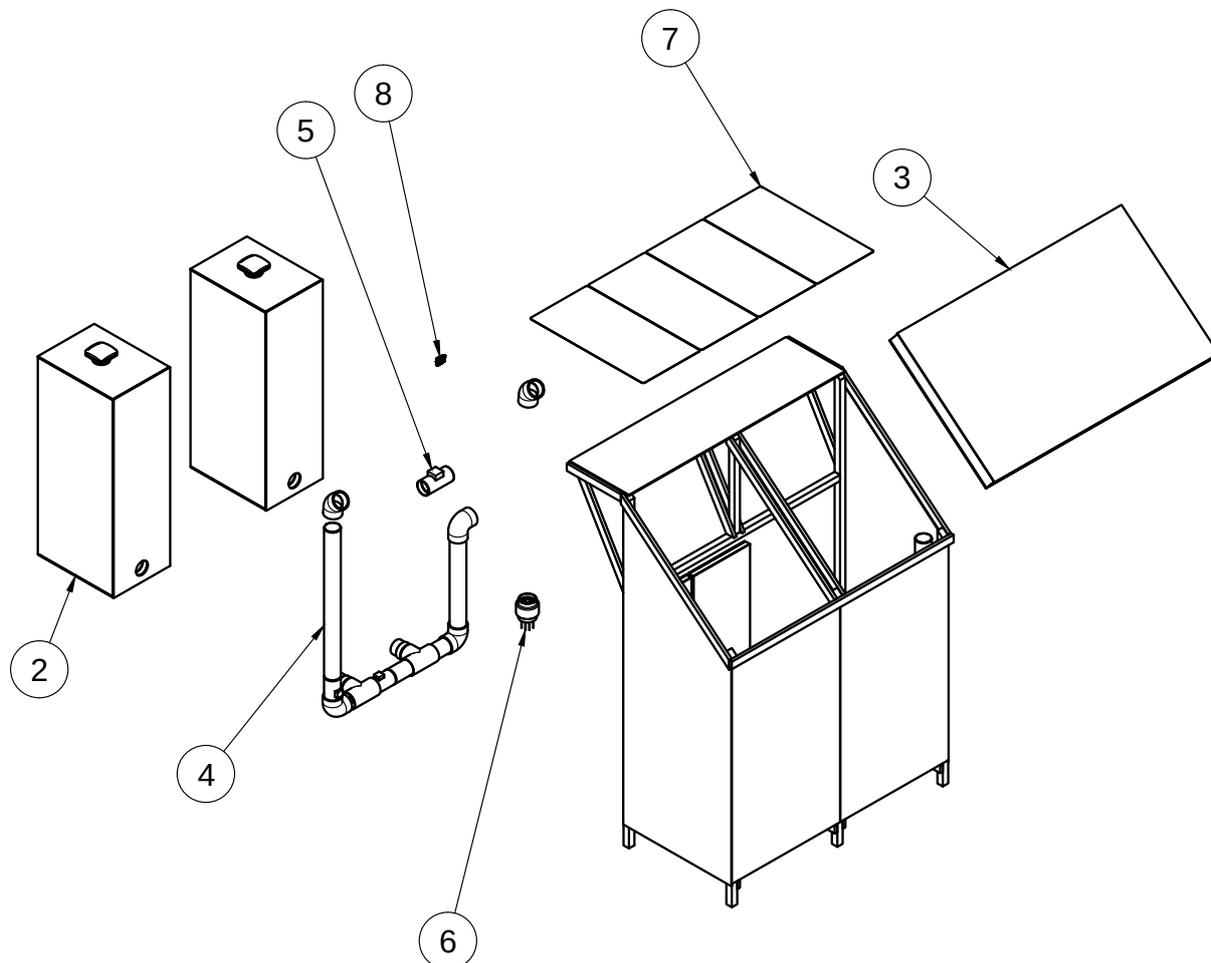
Utiliser un système de régulation réactif aux variations de l'humidité et de la température de l'air extérieur.

Construire la **structure avec des matériaux résistants aux intempéries**.

Prévoir des caisses de séchage amovibles et interchangeables pour divers types d'aliments.

Modules du séchoir solaire hybride conceptualisé

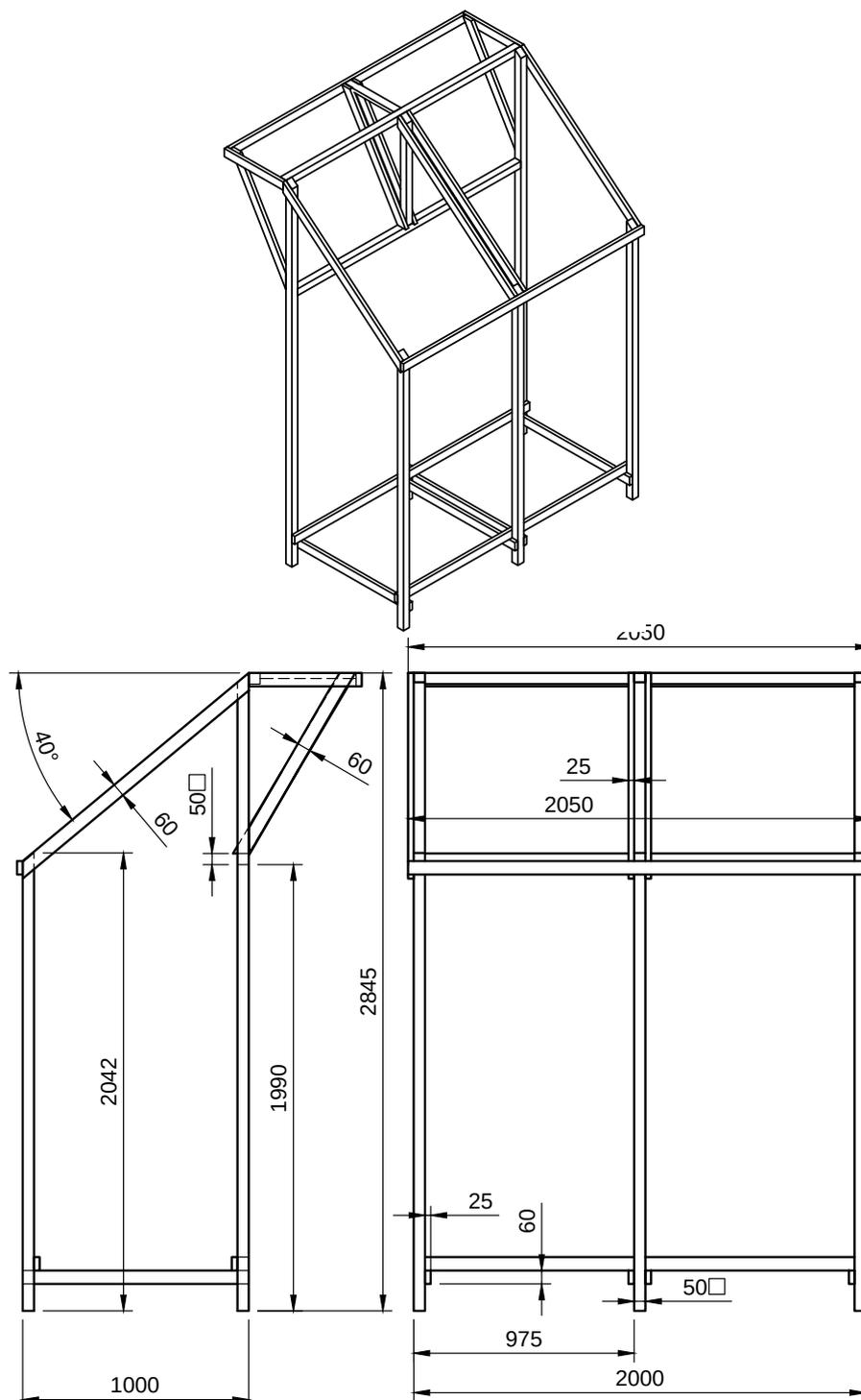
Voici les composants clés nécessaires pour conceptualiser un séchoir hybride efficace.



- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1 | Structure bois |
| 2 | Caisse de séchage isolée |
| 3 | Caisson de chauffe solaire |
| 4 | Conduits d'aération |
| 5 | Chauffage à Résistance électrique |
| 6 | Module de condensation à Peltier |
| 7 | Alimentation électrique |
| 8 | Système de régulation |

1. Structure en bois

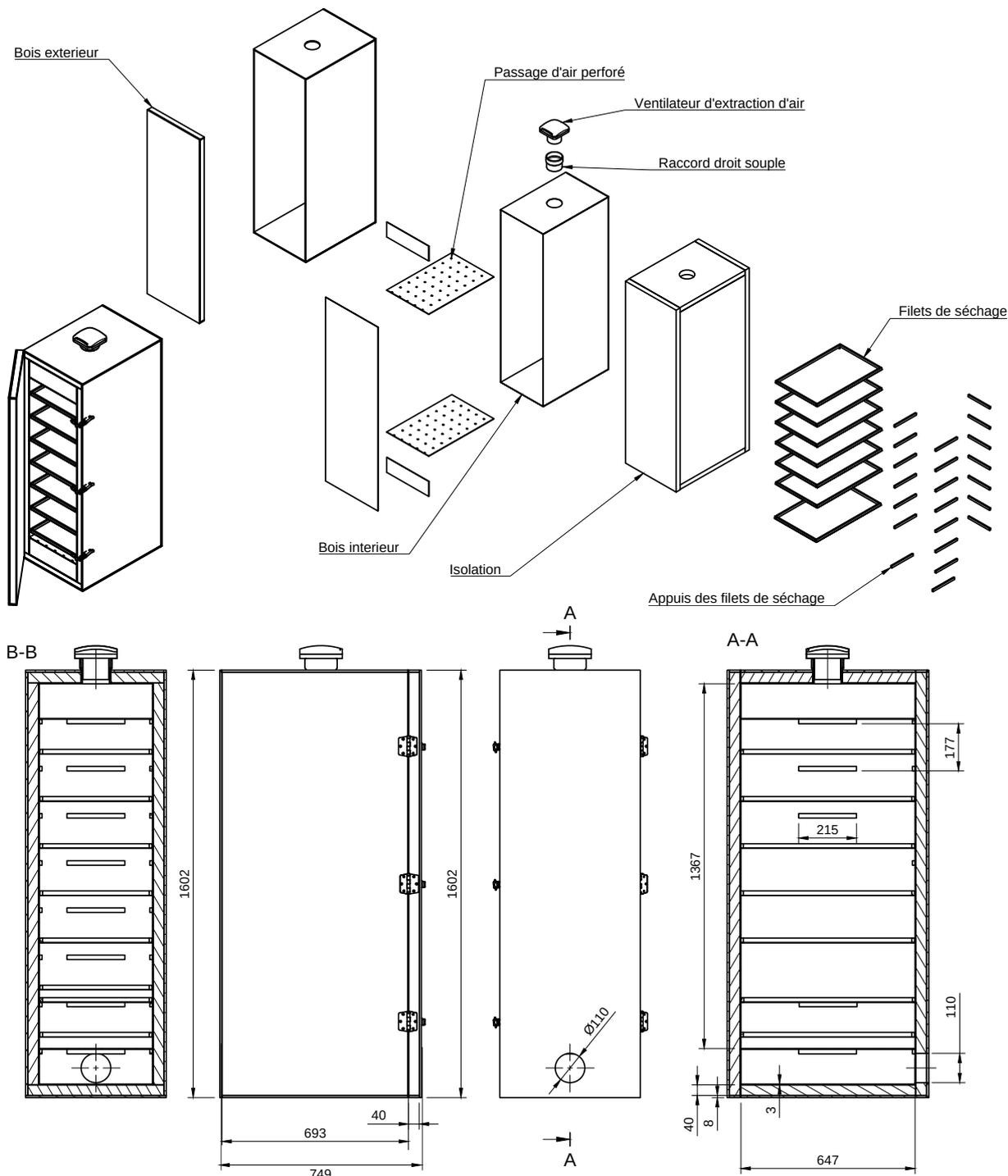
La structure en bois **supporte l'ensemble du séchoir** et a un angle d'inclinaison adapté pour le lieu de l'installation. Pour un **captage solaire optimal**, l'**angle d'inclinaison** annuel moyen correspond à la latitude du site, ajusté à latitude +15° en hiver et l'attitude -15° en été.



Cotes en mm.

2. Caisse de séchage isolée

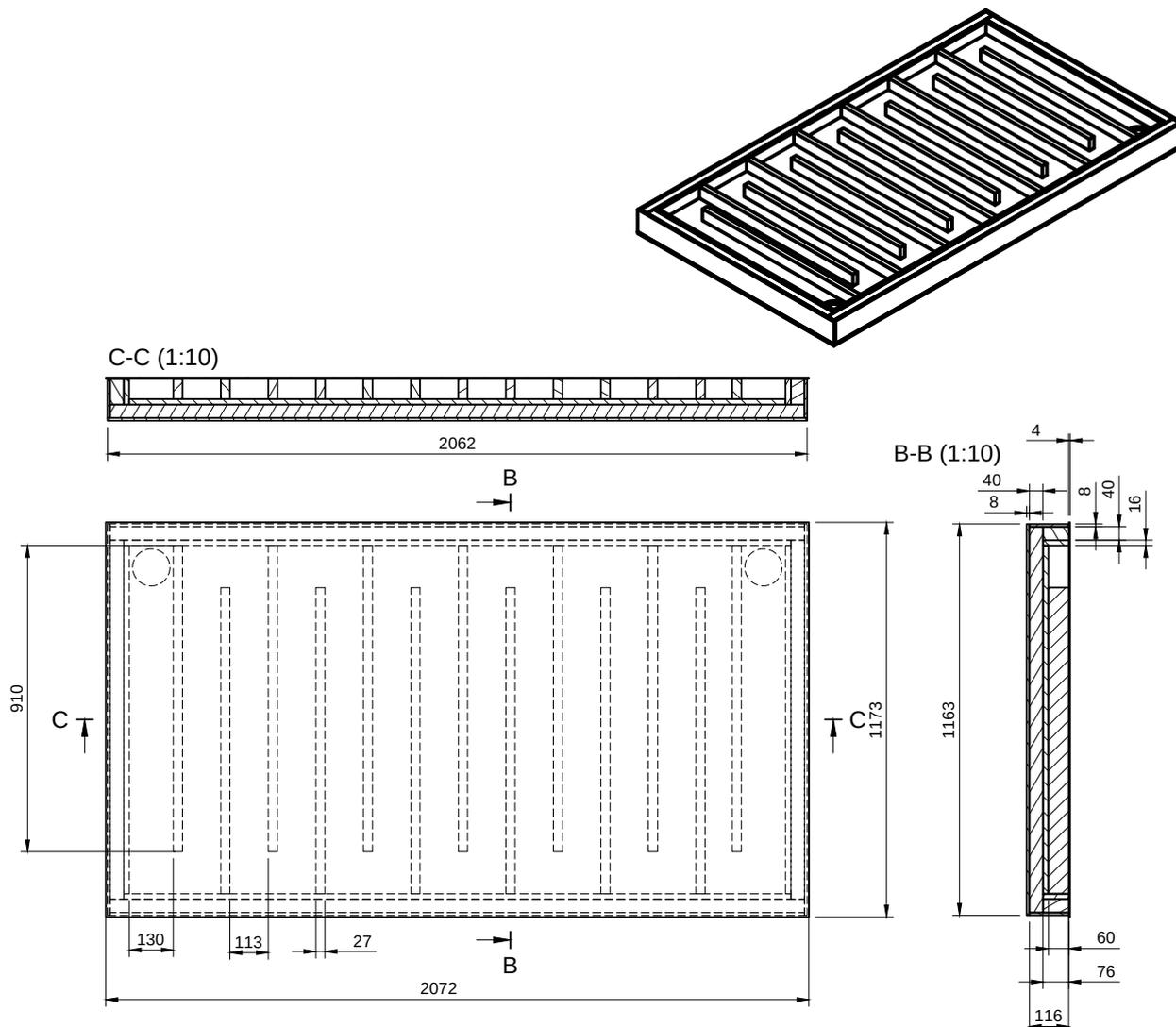
Les aliments à sécher sont placés dans les caisses de séchage, traversées par de l'air sec conditionné par les autres modules du séchoir. L'isolation est un facteur clé pour garantir la stabilité des conditions de séchage tout au long du processus.



Isolation thermique et étanchéité à l'air avec ventilateur d'extraction 12v et connectable sur de la tuyauterie de diamètre 110mm.

3. Caisson de chauffe solaire

Fixé sur l'inclinaison de la structure en bois avec la bonne inclinaison, et avec la bonne orientation du séchoir solaire, la surface de captage solaire permet de chauffer l'air tout en réduisant son humidité relative par dilatation.



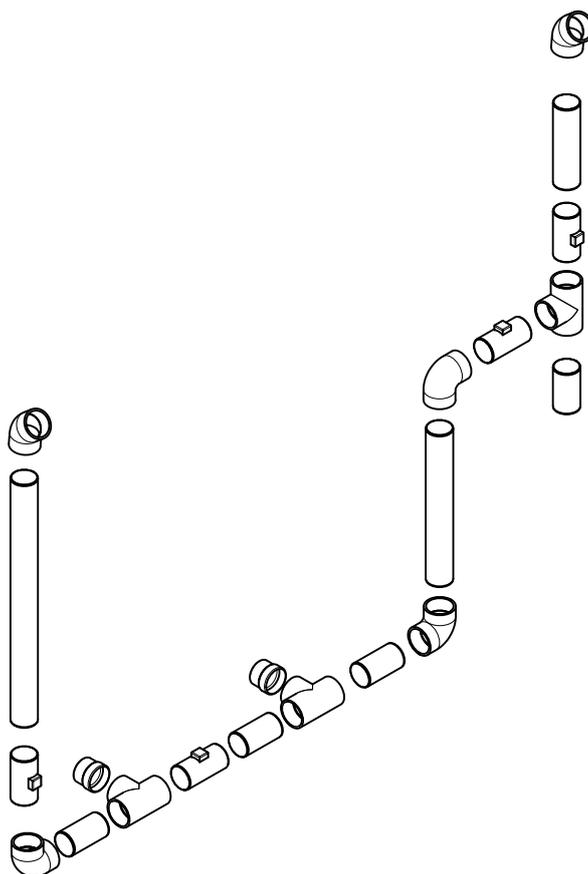
L'air traverse un **labyrinthe thermique** pour maximiser les échanges de chaleur dans le caisson. Composé principalement de **bois, isolation et verre**, la surface de captage sous la vitre est **peinte en noir** pour maximiser la capture des rayonnements solaires thermiques.

Le dimensionnement de la surface de captage dépend des conditions climatiques et de la masse d'aliments à sécher.

Le corps de chauffe solaire peut travailler en série avec le module de condensation pour pré-conditionner l'air, connecté en entrée et sortie par de entrées de 110mm.

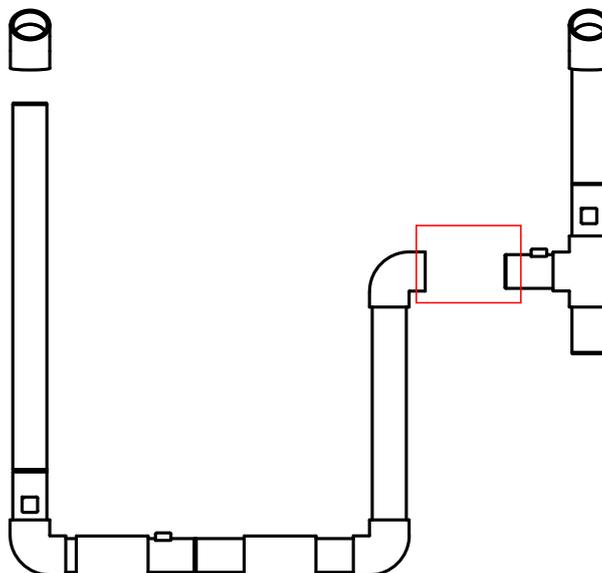
4. Conduits de ventilation

Les conduits de ventilation sont composés de tubes de 110mm de diamètre avec des coudes, des connexions en T puis des clapets anti-retour afin d'acheminer l'air entre les différents modules et les caisses de séchage. L'extraction de l'air se fait par les ventilateurs des caisses de séchage.



Pour une meilleure efficacité les conduits doivent être étanches en utilisant les éléments de connexion adéquat dans tous les points de raccordement. **Il est important d'isoler thermiquement les conduits** afin de conserver les caractéristiques souhaitées de l'air sec.

5. Module de chauffe secondaire

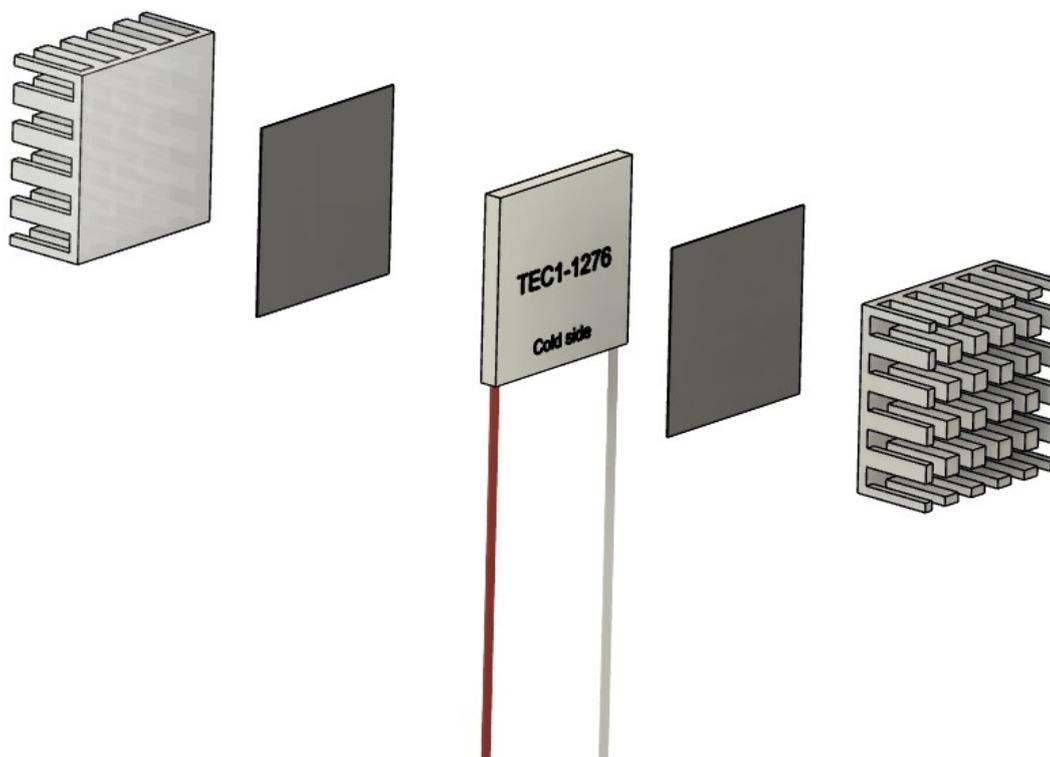


Le module de chauffe secondaire est une source d'énergie complémentaire pour conditionner l'air extérieur lorsque l'énergie solaire est insuffisante. Il se connecte dans le circuit de ventilation de 110mm.

Il est possible de chauffer l'air par :

- Résistance de chauffe alimentée par batterie solaire.
- Combustion de matériaux organiques.
- Combustion de bio gaz.

6. Module de condensation à Peltier



Composé de modules de Peltier, des parallélépipèdes en céramique qui permettent de transformer un courant électrique en chaleur et froid simultanément des deux cotés de parallélépipède.

Pour le refroidissement de l'air extérieur, ce dernier passe par les dissipateurs en aluminium lié avec de la pâte thermique pour conductibilité optimale.

Ayant plusieurs modules de Peltier ce module est piloté par la régulation le module permet de sécher l'air par condensation de la vapeur d'eau en diminuant la température de l'air sous le la température de point de rosée.

Alimenté par des panneaux solaires pour une autonomie énergétique. Le module est actionné par la régulation lorsque les mesures de température et humidité instantanées de l'air extérieur permettent d'atteindre le point de rosée selon le dimensionnement de la puissance du module.

Le dimensionnement du module de condensation se fait en fonction des conditions climatiques pour maximiser les heures de fonctionnement annuellement.

Une fois que l'air extérieur condensé passera par ce module, il sera plus froid et moins chargé en vapeur d'eau, donc plus moins énergivore pour atteindre la température souhaitée.

7. Alimentation électrique



La dans but d'avoir un appareil fonctionnent en autonomie des panneaux solaires photovoltaïques alimentent les modules du séchoir en électricité.

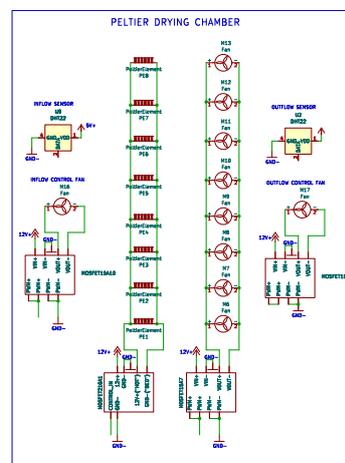
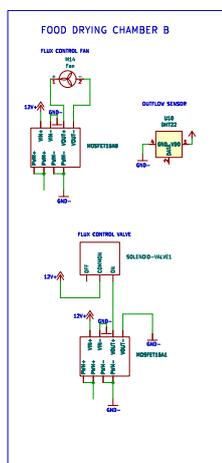
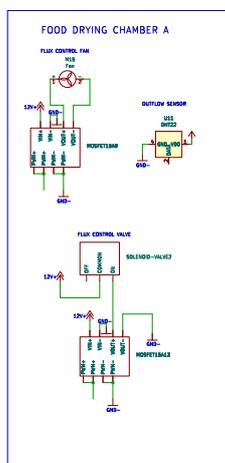
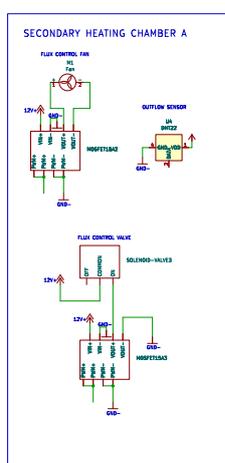
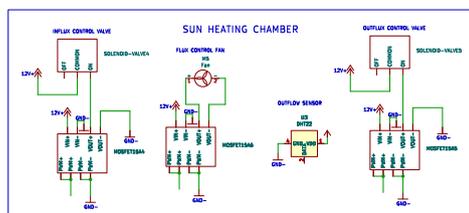
Couplés à des batteries pour un fonctionnement continu alimentant :

- L'électronique de la régulation
- Les ventilateurs d'extraction des caisses de séchage.
- Les modules Peltier de module de condensation.
- Les clapets anti-retour des conduits de ventilation.

8. Système de régulation

Les système de régulation est composé en d'une carte mère pour Arduino Mega2560, qui permet de contrôler les moteurs pas à pas, les ventilateurs, et les autres composants électroniques du séchoir pour garantir des conditions optimales de séchage.

HYBRID SOLAR DRYING
CONTROL SCHEMATIC V1.0
CC-BY-SA
AUTHORS
EVERTON RAMIRES DE OLIVEIRA
MARCO BERNARDO



Utilisant les sondes pour mesurer la température et l'humidité de l'air extérieur ainsi que la température des corps de chauffe, la régulation pilote :

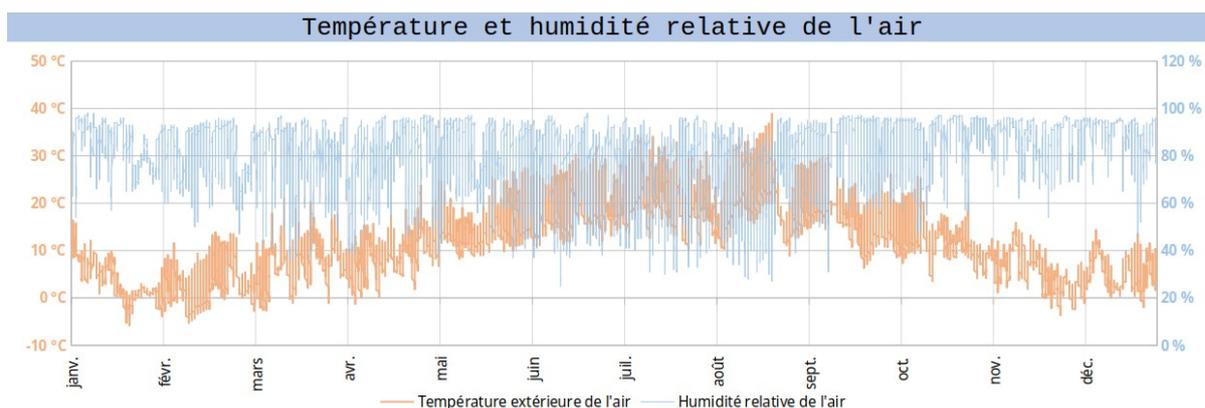
- Clapets de ventilation.
- Module de chauffe électrique ou biomasse.
- Module de condensation.
- Ventilateurs d'extraction.

Simulation numérique

La simulation numérique joue un rôle clé dans le dimensionnement d'un séchoir solaire hybride. Elle permet de combiner les données climatiques spécifiques au lieu d'installation avec les propriétés thermodynamiques de l'air pour concevoir un système efficace et adapté.

Voici les étapes et les principaux éléments pris en compte :

1. Données climatiques



Emplacement de l'installation
 Lieu de sonde de la base de données climatiques
 Nom de la base de données climatiques
 Année de simulation climatique
 Température maximale annuelle
 Température moyenne annuelle
 Température minimale annuelle
 Humidité maximale annuelle
 Humidité moyenne annuelle
 Humidité minimale annuelle
 Début de la saison hivernale
 Fin de la saison hivernale
 Température maximale hivernale
 Température moyenne hivernale
 Température minimale hivernale
 Humidité maximale hivernale
 Humidité moyenne hivernale
 Humidité minimale hivernale

Vernier	-
Versoix	-
InfoClimat Opendedata	-
2023	-
38,9	°C
12,4	°C
-5,8	°C
98,0	%
79,1	%
25,0	%
10.9.2023	-
5.1.2023	-
25,7	°C
7,0	°C
-5,8	°C
98,0	%
83,0	%
36,0	%

Les données climatiques du lieu d'installation sont essentielles pour adapter le séchoir aux conditions locales. Les paramètres analysés incluent :

- **Température et humidité relative de l'air extérieur** : Ces données déterminent les variations saisonnières et quotidiennes des conditions de séchage.
- **Ensoleillement** : La disponibilité de l'énergie solaire heure par heure permet d'évaluer la quantité d'énergie thermique accessible pour le séchage.

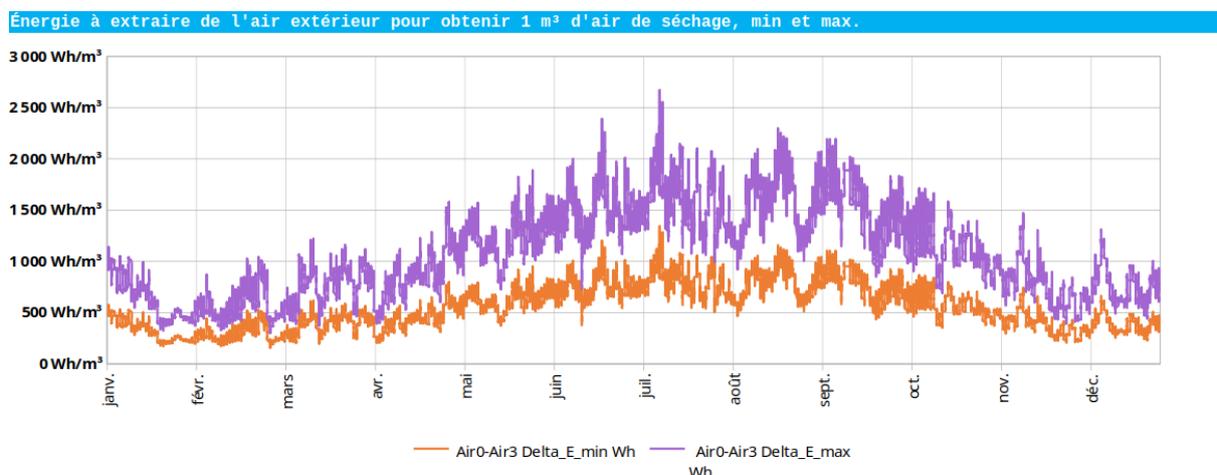
2. Air de séchage

Air de séchage en fonction des aliments à Sécher		
Aliment1 à sécher dans la caisse de séchage 1		
	Herbes	-
Quantité	0,500	kg
Teneur en eau de l'aliment	0,76	kg/kg
Condition d'humidité relative minimale pour le séchage	10	%
Condition d'humidité relative maximale pour le séchage	15	%
Évaporation d'eau de l'aliment pour séchage complet	80	%
Température minimale de séchage	20	°C
Température maximale de séchage	40	°C
Enthalpie de l'air de séchage maximale	65	kJ/m ³
Enthalpie de l'air de séchage minimale	29	kJ/m ³
Quantité d'eau à extraire de l'aliment	0,304	kg
Aliment1 à sécher dans la caisse de séchage 2		
	Legumes	-
Quantité	1,000	kg
Teneur en eau de l'aliment	0,86	kg/kg
Condition d'humidité relative minimale pour le séchage	10	%
Condition d'humidité relative maximale pour le séchage	15	%
Évaporation d'eau de l'aliment pour séchage complet	88	%
Température minimale de séchage	40	°C
Température maximale de séchage	60	°C
Enthalpie de l'air de séchage maximale	115	kJ/m ³
Enthalpie de l'air de séchage minimale	59	kJ/m ³
Quantité d'eau à extraire de l'aliment	0,757	kg
Quantité d'eau totale à extraire des aliments	1,061	kg
Enthalpie de séchage maximale pour les aliments sélectionnés	31,97	Wh/m³
Enthalpie de séchage minimale pour les aliments sélectionnés	16,26	Wh/m³

L'air de séchage est conditionné pour répondre aux besoins spécifiques des aliments à traiter. Les propriétés de l'air sec sont définies en fonction des aliments à sécher :

- **Humidité relative maximale et minimale** : Ces seuils garantissent un séchage efficace tout en évitant de dégrader les aliments.
- **Quantité d'eau à extraire** : Elle correspond à la masse d'eau à évaporer des aliments en fonction de leur poids initial et final.
- **Énergie à échanger avec l'air extérieur** : L'énergie nécessaire pour ajuster la température et l'humidité de l'air extérieur afin qu'il atteigne les conditions optimales de séchage.

Connaissant les conditions de l'air de séchage et air extérieur, il est possible d'évaluer l'énergie nécessaire à échanger avec l'air pour atteindre les conditions de séchage.

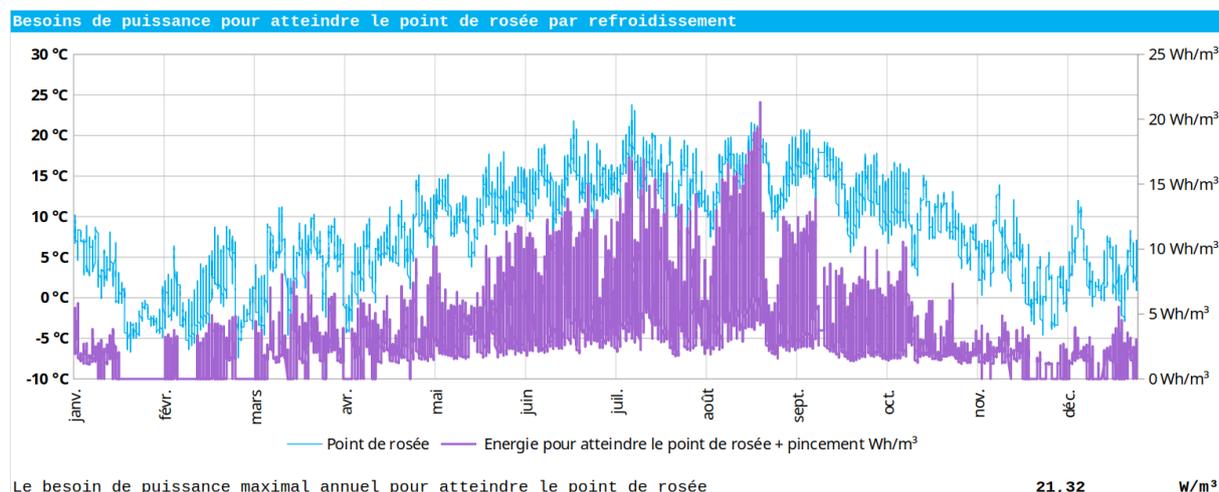


Le graphique ci-dessus indique l'énergie maximale et minimale à échanger avec l'air pour atteindre les conditions de séchage.

3. Calcul du point de rosée

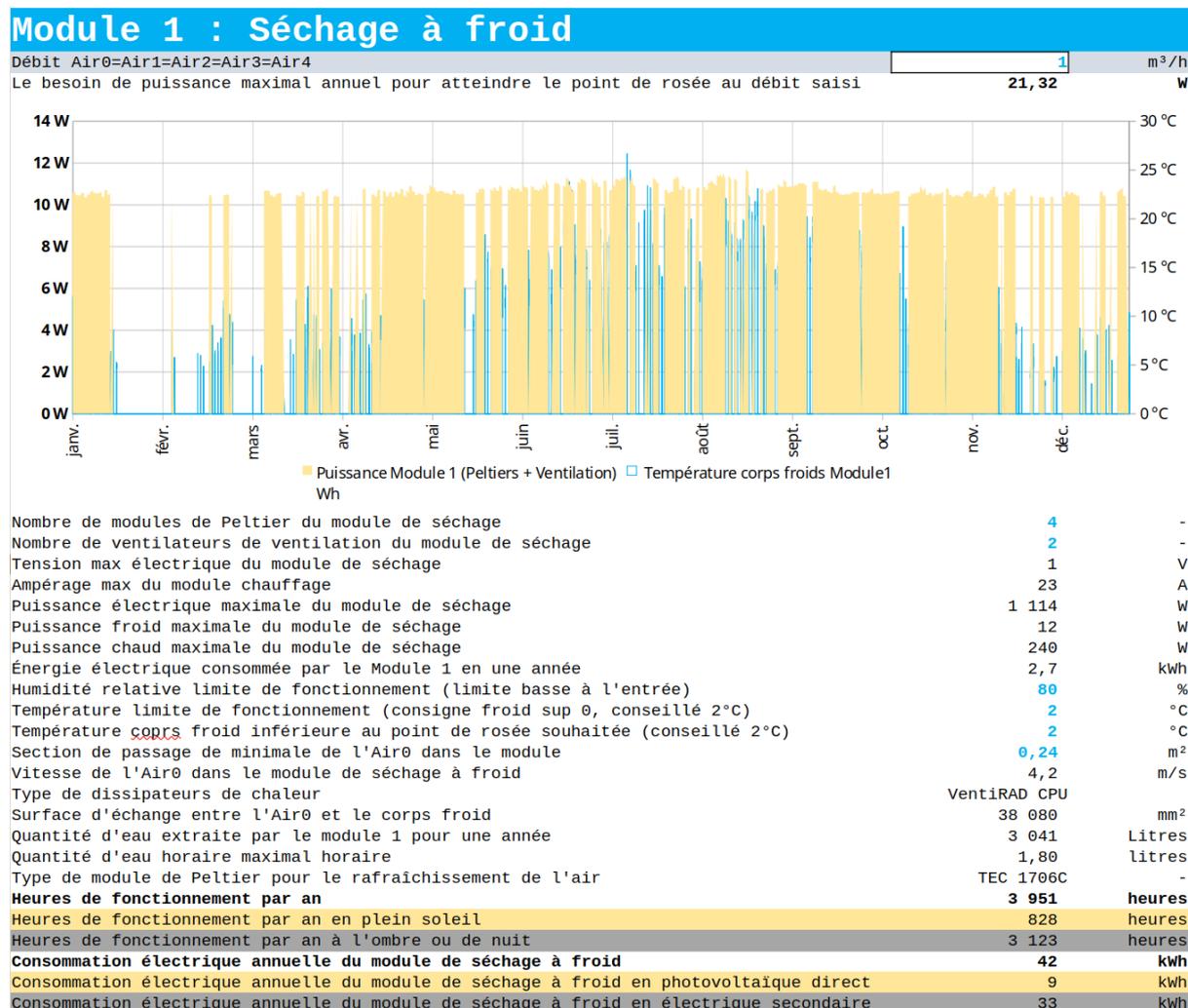
Le point de rosée correspond à la température à laquelle l'humidité de l'air se condense. La simulation évalue :

- **L'énergie nécessaire pour atteindre la condensation** : Calculée à partir des propriétés de l'air extérieur, cette énergie permet de réduire efficacement l'humidité avant le séchage.



Ci-dessus un graphique représentant l'énergie nécessaire heure par heure pour atteindre la température de rosée. En plus de l'énergie nécessaire heure par heure on connaît l'énergie maximale dans l'année pour atteindre la température de point de rosée pour 1m3 d'air extérieur. Cette dernière valeur nous permet de connaître la puissance du module de condensation.

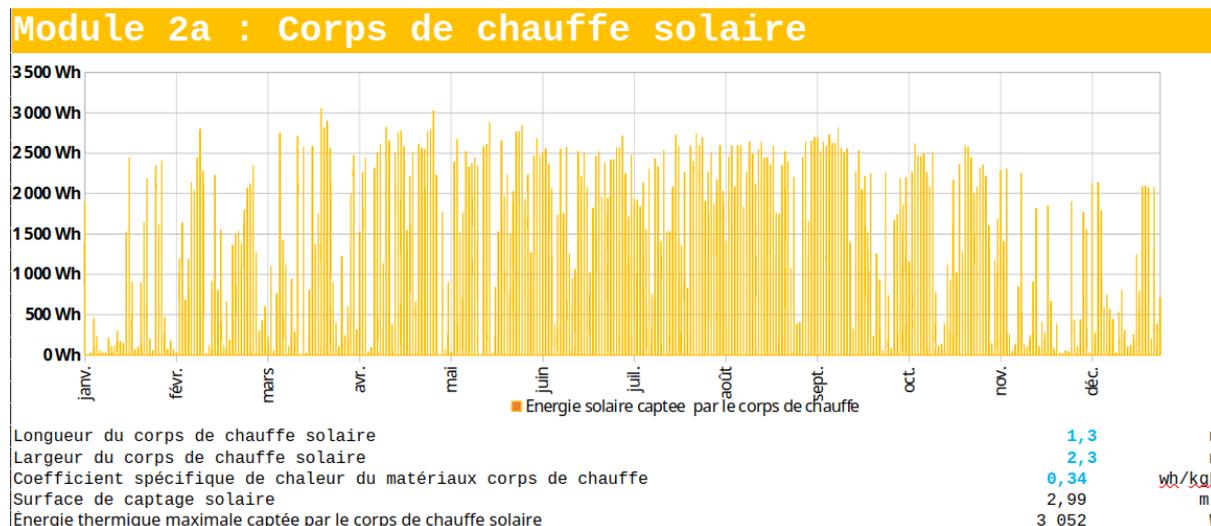
4. Comportement du module de condensation



Le module de condensation à Peltier joue un rôle crucial dans la préparation de l'air sec. La simulation permet de déterminer :

- **Conditions de fonctionnement** : Les limites d'humidité et de température pour un fonctionnement optimal du module.
- **Heures de fonctionnement** : En analysant les données climatiques, on identifie les périodes où le module peut opérer efficacement pour maximiser son usage annuel.

5. Comportement du corps de chauffe solaire



Le corps de chauffe solaire exploite l'énergie thermique captée pour conditionner l'air. La simulation évalue :

- **Ensoleillement** : Les variations horaires et saisonnières influent sur la quantité d'énergie thermique disponible.
- **Surface de captage** : Le dimensionnement optimal de la surface de captage solaire garantit une exploitation maximale de l'énergie solaire disponible.
- **Énergie thermique captée** : Calculée en fonction de l'ensoleillement et des propriétés du corps de chauffe (matériaux, inclinaison, orientation).

Validation du modèle numérique

Étant donné la complexité des calculs et des paramètres pris en compte pour le dimensionnement et la conception du séchoir solaire hybride, **il est crucial de valider le modèle numérique avec des données réelles**. Cette étape de validation garantit que les simulations et hypothèses utilisées reflètent fidèlement le fonctionnement du séchoir en conditions réelles.

Pour ce faire, une fois le séchoir construit, des mesures expérimentales doivent être réalisées :

1. **Mesures de performances globales** : Les conditions climatiques réelles (température, humidité, ensoleillement) seront comparées aux prévisions du modèle, ainsi qu'aux paramètres de fonctionnement des modules tels que l'énergie captée, l'humidité extraite et les températures atteintes.
2. **Validation des modules isolés** : Chaque module sera testé séparément pour analyser son comportement individuel :
 - Le **module de condensation** sera évalué pour sa capacité à réduire l'humidité de l'air et atteindre le point de rosée.
 - Le **corps de chauffe solaire** sera observé pour sa capacité à capter et transférer l'énergie thermique selon les prévisions.
 - Les **ventilateurs et conduits de ventilation** seront examinés pour s'assurer que le flux d'air est conforme aux attentes.
3. **Pilotage par le système de régulation** : Une fois les performances des modules validées individuellement, le système de régulation sera testé pour vérifier sa capacité à gérer les interactions entre les modules, en adaptant leur fonctionnement aux conditions climatiques et aux besoins du séchage.

Ces tests permettront d'ajuster le modèle numérique en fonction des écarts éventuels entre les résultats simulés et les mesures réelles. Ce processus d'ajustement est essentiel pour garantir que le séchoir hybride fonctionne de manière optimale et que son système de régulation réagisse correctement dans toutes les situations.

En validant chaque étape, le modèle devient une référence fiable pour optimiser le séchage, réduire la consommation énergétique et maximiser l'efficacité des modules.

Théorie appliquée

Loi fondamentale de la thermodynamique

Dans le cadre de la conception de ce séchoir hybride, nous utilisons l'équation fondamentale de la thermodynamique, également connue sous le nom d'équation de la chaleur, comme base théorique pour calculer et modéliser le comportement des modules des aliments systèmes. Cette équation, largement utilisée dans nos calculs, est la suivante :

$$E=m \cdot cp \cdot \Delta T$$

Cette équation nous permet de déterminer l'énergie (E) nécessaire pour chauffer une certaine quantité d'air humide (m) d'une température initiale à une température finale. Elle prend en compte la capacité thermique spécifique de l'eau (cp), qui mesure la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température de l'air d'une unité, ainsi que la différence de température (ΔT) entre les deux états.

Dans cette formule :

- E représente l'énergie thermique en joules (J) ou en calories (Wh).
- m est la masse de l'eau en kilogrammes (kg) ou en grammes (g).
- cp est la capacité thermique spécifique de l'air humide, exprimée en joules par kilogramme-kelvin (J/kg·K), en calories par gramme-kelvin (Wh/kg·K) ou par m³.
 - Il est important de noter que cette valeur est variable selon la température et le taux d'humidité.
- ΔT représente la différence de température entre la température finale et la température initiale de l'air, mesurée en kelvins (K) ou en degrés Celsius (°C).

Le cp de l'air humide varie uniquement en fonction de la température et son humidité. La pression de l'air n'a pas d'influence sur sa capacité thermique spécifique (cp).

Isolation thermique

Le coefficient d'isolation U (ou coefficient de transmission thermique) mesure la capacité d'un matériau à résister au transfert de chaleur entre deux milieux. Il est exprimé en watts par mètre carré-kelvin (W/m^2K). Permet de calculer par exemples les déperditions de la caisse de séchage dans l'environnement par saison froides.

Matériaux isolants :

- Plaques en polyuréthane : 0,023 - 0,028 W/m^2K
- PUR pulvérisé : 0,030 W/m^2K
- Laine minérale : 0,035 W/m^2K
- Laine de verre : 0,035 W/m^2K
- XPS : 0,035 W/m^2K
- EPS : 0,040 W/m^2K

Air humide

L'air extérieur est considéré comme air humide, son taux d'humidité dans l'air est variable et peut être influencé par la température et/ou la pression.

L'humidité

L'humidité est la quantité d'eau présente dans l'air sous forme de vapeur d'eau. Elle est exprimée en pourcentage de l'humidité relative (HR) ou en grammes par mètre cube d'humidité absolue (HA).

Humidité absolue

L'humidité absolue peut être calculée à partir de l'humidité relative, la température et la pression partielle de vapeur.

$$HA = (HR \times P_w) / (461,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \times T \text{ [g/kg}_{\text{airsec}}]$$

461,5 J·kg⁻¹·K⁻¹ est la constante des gaz spécifique pour la vapeur d'eau.

Masse volumique de l'air humide

La masse volumique de l'air humide (ρ) est fonction de la masse volumique de l'air sec (ρ_0) et de l'humidité relative (HR) :

$$\rho = (P_{\text{sec}}/R_a T) + (P_w/R_w T)$$

où :

P_{sec} : La pression de l'air sec **en Pa**

P_w : La pression de la vapeur d'eau **en Pa**

T : La température de l'air **en kelvins**

R_a : la constante de l'air sec, égale à 287,058 J·kg⁻¹·K⁻¹

R_w : la constante de la vapeur d'eau, égale à 461,495 J·kg⁻¹·K⁻¹

La masse volumique de l'air sec

(ρ_0) varie également en fonction de la température et de la pression atmosphérique :

$$\rho_0 = P_{\text{atm}} / (R \cdot T)$$

R – la constante de l'air sec, égale à 287,058 J·kg⁻¹·K⁻¹

La pression partielle de la vapeur d'eau

La pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide est un facteur direct du taux d'humidité relatif :

$$P_w = HR \times P_{\text{sat}} \text{ [hPa]}$$

La pression de vapeur saturante

La pression saturante de l'air humide, également appelée pression de vapeur saturante, est la pression maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir à une température donnée. L'équation de Tetens avec ses constantes permet une approximation :

$$P_{\text{sat}} = 0.61078 \cdot e^{((17.27 \cdot T) / (T + 237.3))} \text{ [kPa]}$$

La constante 0,61078 est un coefficient qui dépend de la pression de vapeur saturante de l'eau à 0°C (273,15 K).

17,27 : coefficient multiplicatif de la température (T) dans l'expression exponentielle

237,3 : valeur de référence pour l'addition à la température (T) dans l'expression exponentielle.

Il est important de noter que cette formule est spécifique à l'eau et est valable pour des températures comprises entre -50°C et 100°C.

$$P_{\text{vsat}} = 610,78 \times \exp(\text{SI}(T < 0; 21,8745584 \times T / (T + 265,5); 17,2693882 \times T / (T + 237,3))) \text{ [kPa]}$$

Des valeurs exemple de pression de vapeur saturante

- T = 20°C : $P_{\text{ws}} \approx 23,4 \text{ hPa}$
- T = 30°C : $P_{\text{ws}} \approx 43,2 \text{ hPa}$
- T = 40°C : $P_{\text{ws}} \approx 76,1 \text{ hPa}$

Il existe diverses formules qui permettant de connaître la pression de valeur saturante avec une approximation similaire.

Le point de rosée

Le point de rosée, également appelé température de rosée, est la température à laquelle l'air arrive à saturation et se transforme en gouttelettes d'eau. C'est le moment où l'humidité contenue dans l'air se condense sur les surfaces.

Il est important de connaître la température ambiante, car cette dernière influe directement sur le point de rosée. Plus la température est élevée, plus le point de rosée est élevé.

Le taux d'humidité influe également sur le point de rosée. Une humidité élevée conduit à un point de rosée plus bas.

La température de la surface froide de contact avec l'air humide permet à la vapeur d'eau de se condenser et de former de la rosée. Les surfaces les plus froides conductrices du type de vitres ou métal ou céramique sont les plus sensibles à la formation de rosée.

CP de l'air humide

La capacité thermique massique de l'air humide (c_p) est une combinaison directe de la capacité thermique massique de l'air sec (c_{pas}) et de la présence d'humidité sous forme de vapeur d'eau. Le c_p est un coefficient permettant de calculer les transferts de chaleur.

Le c_p de l'air humide peut être estimé en prenant en compte la proportion d'humidité relative (HR) et la masse volumique de l'air (ρ). Cependant, il n'y a pas de formule unique pour calculer c_p en fonction de c_{pas} et HR, car cela dépend des conditions spécifiques de température et d'humidité.

$$c_p = (1-W) \cdot c_{pas} + W \cdot c_{pvap}$$

Rapport de mélange massique W

Pour quantifier la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air nous utilisons également le rapport de mélange massique W. Il représente la masse de vapeur d'eau par unité de masse d'air sec en kg/kg et dépend de l'humidité relative (HR) et de la pression de vapeur saturante (P_{sat}) à une température donnée.

$$W = 0.622 \times (P_w) / (P_{atm} - P_w) \text{ [kgeau/kgair]}$$

0.622 est le rapport de la masse de vapeur d'eau dans l'air dans les conditions normales de température et d'humidité.

Il est important de noter que le rapport de mélange massique est distinct de l'humidité spécifique (HS), qui est le rapport de la masse d'eau dans l'air à la masse d'air humide. Les deux concepts sont liés, mais ils ont des significations différentes et sont utilisés dans des contextes spécifiques.

Cp air sec

La capacité thermique massique de l'air sec (c_{pas}) varie peu dans la plage de température utilisée en conditionnement d'air (0-50°C). Selon l'approximation la plus souvent utilisée la valeur de c_{pas} est de 1000 J/kg·K.

Cp de la vapeur d'eau

La capacité thermique massique (c_{pvap}) de la vapeur d'eau est principalement influencée par la température, et non par la pression. De manière relativement linéaire :

$$c_p \text{ (J/kg·K)} = 1843,5 + 0,695 T \text{ (K)}$$

184.3 J/kg·K : coefficient de base représentant l'enthalpie spécifique de l'air sec

0.695·T [K] : terme corrigeant pour la température, où T est l'abscisse en kelvins

Enthalpie de l'air humide

Elle représente la quantité de chaleur totale associée à une quantité d'air humide à une température et une humidité donnée, s'exprime en kJ/kgairsec et peut avoir des valeurs négatives.

L'enthalpie de l'air humide (H) est égale à la somme des enthalpies des deux constituants du mélange : l'air sec et la vapeur d'eau.

Enthalpie de l'air humide (H) = Enthalpie de l'air sec (Has) + Chaleur latente de vapeur d'eau (Lv)

Lorsque la température est égale à 0 °C et que l'air est sec, l'enthalpie est considérée comme nulle. Cette référence nous permet de connaître l'énergie nécessaire à échanger avec l'air pour atteindre les conditions de séchage idéales des différents modules.

Enthalpie de l'air sec (Has)

$$Has = C_{pas} \times T$$

Chaleur latente de vapeur d'eau (Lv)

La chaleur latente de vapeur d'eau représentante l'énergie libérée ou absorbée lors de la transformation de l'eau liquide en vapeur ou inversement, liée à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air.

$$Lv = W. (2\,501 + 1,83 \cdot T[^\circ\text{C}]) \quad [\text{kJ/kgairsec}]$$

L'enthalpie est liée à la quantité de chaleur mise en jeu pendant le séchage.

Elle permet de calculer la quantité de chaleur nécessaire pour sécher l'air et d'optimiser les performances énergétiques du séchoir.

Condensation de la vapeur d'eau par le froid

Calcul de l'eau extraite lors du séchage à froid de l'air extérieur Air0. Le séchage à froid consiste à refroidir l'air humide pour extraire l'eau contenue sous forme de vapeur d'eau.

Pour calculer l'eau extraite, nous devons utiliser les propriétés thermodynamiques de l'air humide, notamment l'enthalpie. La différence entre l'enthalpie de l'air humide (H) et l'enthalpie de l'air sec (Hs), représente l'énergie liée à la vapeur d'eau contenue dans l'air humide.

L'énergie liée à la vapeur d'eau permet de calculer la quantité d'eau extraite (m_eau) en utilisant la formule suivante :

$$m_eau = (H - Hs) / (Lv(0^{\circ}C) + C_{peau} \times (T - 0^{\circ}C))$$

- H : enthalpie de l'air humide (en kJ/kg d'air sec)
- T : température (en °C)
- P : pression (en kPa)
- Lv(0°C) : énergie de vaporisation de l'eau à 0°C (en kJ/kg)
- Cpeau : la chaleur spécifique de l'eau (en kJ/kg·K).

Calculs d'évaporation eau au séchage air sec équations

Les équations suivantes sont utilisées pour décrire l'évaporation d'eau au séchage avec air sec :

Équation de Willis Carrier (1911) :

$$pv(\theta_h) = p_{vs}(\theta_h) - [(p - p_{vs}(\theta_h)) * (\theta - \theta_h) / (1532,4 - 1,3 * \theta_h)]$$

Où :

- $pv(\theta_h)$ est la pression partielle de vapeur d'eau à la température θ_h (°C)
- $p_{vs}(\theta_h)$ est la pression de vapeur saturante à la température θ_h (°C)
- p est la pression atmosphérique
- θ est la température de l'air (°C)
- θ_h est la température d'évaporation de l'eau (°C)

Diagramme enthalpique de Mollier-Ramzin : L'enthalpie de l'air humide (H) est représentée en ordonnées et le taux d'humidité absolue (exprimé en kg d'eau/kg d'air sec) en abscisses. Les équations suivantes sont liées à ce diagramme :

- L'égalité des rapports de l'équation (8) se traduit par l'alignement des points 1, 2 et m sur le diagramme enthalpique de l'air humide.
 - Le séchage peut être effectué à des pressions autres que la pression atmosphérique.
3. **Enthalpie spécifique :** L'enthalpie spécifique est la somme des quantités de chaleurs sensible et latente de l'air sec et de la vapeur d'eau rapportée au kilogramme d'air sec.

Ces équations et diagrammes sont utilisés pour décrire et analyser le processus d'évaporation d'eau au séchage avec air sec, en prenant en compte les paramètres tels que la température, la pression et l'humidité de l'air.

Conclusion

Les principes fondamentaux de la thermodynamique ont permis de dimensionner le séchoir solaire hybride de manière à garantir un fonctionnement optimal tout au long de l'année. Toutefois, pour finaliser sa construction et en optimiser les réglages, il est essentiel de valider le modèle en conditions réelles.

Cela implique d'observer et de mesurer le comportement du séchoir ainsi que celui de ses différents modules, en tenant compte des paramètres climatiques et des variations environnementales. Les données recueillies permettront d'ajuster le système de régulation pour maximiser l'efficacité énergétique et garantir des performances optimales.

Cette étape finale de validation et d'ajustement est cruciale pour transformer la conception théorique en un outil pratique, fiable et adapté aux besoins réels du séchage.