



HAUTE ÉCOLE  
D'INGÉNIERIE ET DE GESTION  
DU CANTON DE VAUD

[www.heig-VD.ch](http://www.heig-VD.ch)

# OPTIMISATION D'UNE INSTALLATION HYBRIDE SOLAIRE/GAZ BUTANE POUR LE SECHAGE DES FRUITS AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
MASTER

**SPECIALITE : ENERGIES RENOUVELABLES**

-----

Présenté et soutenu publiquement le 30/06/2017 par

**Clovis BOUNOU (201430993)**

**Mémoire dirigé par : M. Yezouma COULIBALY,**  
Maître de conférences CAMES  
Enseignant-chercheur en Energie, 2iE

**Encadrant 2iE : M. Daniel YAMEGUEU NGUEWO,**  
Maître Assistant CAMES  
Enseignant-chercheur en Génie Energétique, 2iE

**Encadrant externe : M. Alexis DURET,**  
Enseignant-chercheur, HEIG-VD, Suisse

Jury d'évaluation du stage :

Président : M. Yezouma COULIBALY, Maître de Conférences

Membres et correcteurs :

M. Daniel YAMEGUEU NGUEWO, Maître Assistant  
M. K. Edem N'TSOUPOUE, Maître Assistant  
M. Sayon SIDIBE, Maître Assistant

**Promotion [2016/2017]**



## DÉDICACES

*Je dédie ce mémoire:*

- *Au père céleste et à son fils Jésus-Christ pour le soutien et les grâces dont il ne cesse de me combler depuis sa décision de me faire venir à l'existence. Père reçoit mes remerciements profonds et mes promesses de dur labeur pour les jours futurs.*
  
- *A ma très belle chérie Vivianne L. PONE pour tout le soutien qu'elle m'a apporté pendant tout ce périple et toutes ces critiques ainsi que les frustrations endurées à cause à ce long moment d'absence. Que Dieu nous rende au quintuple.*
  
- *A mes petits frères et grands frères pour tous le soutien et cet amour familial qu'ils ne cessent de me témoigner je pense à Martial Djihabong, William Azébazé, Éric Cheudjieu.*
  
- *A ma grande sœur Olive Mawamba qui se repose aujourd'hui auprès du seigneur tout puissant. Tu resteras à jamais dans nos cœurs.*

## REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas abouti sans le fruit et l'aide d'un ensemble d'acteurs. Qu'il me soit permis de leur témoigner ici ma gratitude. Ainsi je dis :

Merci à Dieu le Père pour le courage, la santé et toutes ses bénédictions durant tout ce parcours.

Merci à l'Ambassade de France au Cameroun pour la bourse d'études du Service de Coopération et d'Action culturelle qui m'a permis de réaliser ses études.

Merci à tous les différents partenaires du projet, pour tous leurs apports pour une fin positive de ce travail. Je pense au LESBAT, la fondation 2iE, au CEAS Suisse, CEAS Burkina, le groupe WAKA.

Merci à mon très cher maître de stage Dr Alexis DURET pour toute sa disponibilité, son suivi et tout le savoir-faire mis à ma disposition pour le succès de ce travail. Un homme formidable.

Merci au chef de laboratoire LESEE Dr Daniel YAMEGUEU pour m'avoir accueilli permettant ainsi la réalisation de ce travail. Je n'oublie pas ses multiples conseils, ses critiques également son implication personnelle pour l'aboutissement de ce travail.

Merci au Professeur Yezouma Coulibaly mon maître de stage à l'école pour tout son suivi, ses conseils et ses différentes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Merci à toute la grande et aimable équipe du LESBAT pour leur accueil, l'aide et conseils pour le travail effectué au sein de cette institution. Je pense à Guillaume Martin, Alexis, Pierryves, Stéphane chef du laboratoire, Sébastien ....

Merci à tout le corps professoral industriel du 2ie en particulier celui du département énergie et professeurs. Je pense plus particulièrement à Pr Yezouma COULIBALY, Dr Daniel YAMEGUEU, Dr Ahmed BAGRE, Dr Soro MOUSSA, Dr Edem N'TSOUKPOE, Dr Sayon SIDIBE, Dr Marie SAWADOGO, M. Henri KOTTIN, M. Francis SIMPORE....

Mes remerciements à la famille Tagny Collins pour tout son soutien au Burkina depuis le début de cette formation.

Mes remerciements à toute la promotion GEE 2015/2016 pour toute l'ambiance, le partage d'idées et le travail de groupe et l'entraide.

Mes remerciements également à mes compatriotes de la promotion. Je pense à Martial NGOUJOU, Hervis NYOUWA, Éther Mvomo, Wilfried OSSOGO, Leonel NANA

Mes remerciements à l'endroit de la grande communauté camerounaise de 2ie ( AEIC-2iE).

## RÉSUMÉ

Le séchage est une activité qui permet en particulier dans le secteur de l'agroalimentaire, la conservation des denrées sur de longues durées. La filière séchage, particulièrement « la filière mangues séchées » est en plein essor au Burkina Faso. Cependant, elle connaît un frein, celui du coût de production et de la qualité des produits. Le présent travail s'inscrit dans une logique de recherche de solutions à cette problématique. Ce travail propose des moyens d'amélioration des coûts de production notamment par la valorisation du potentiel solaire avec le processus de séchage de mangue du séchoir ATESTA et les moyens d'optimisation du point de vue énergétique de ce séchoir. L'étude menée montre une réelle possibilité de valorisation de l'énergie solaire pour le séchage des mangues pour le cas des sécheries de grandes capacités de production. Pour la qualité et la baisse des coûts de production, un nouveau séchoir a été construit qui intègre les mesures d'amélioration de la qualité des produits également un système de production optimisé par rapport au séchoir « ATESTA classique ». Un réseau d'air extérieur à notre séchoir permettant son approvisionnement en air sec et chaud a été établi. Ce réseau est composé d'un générateur d'air chaud et d'un échangeur de chaleur permettant le renouvellement de l'air dans le réseau avec récupération de la chaleur de l'air rejeté. Les premiers tests réalisés sur ce système ont donné des résultats satisfaisants, mais montrent également les possibilités d'amélioration du système. Une montée rapide en température dans les cellules de séchage. L'obtention des températures recommandées pour le séchage et l'homogénéité de la température dans le système. Avec les pertes de charges importantes du système, la mesure des vitesses de l'air, n'a pas donné des valeurs souhaitées pour une meilleure circulation de l'air. Sur la durée de l'expérience, le test avec les linges mouillés a donné de faibles vitesses d'évaporation, mais satisfaisantes. Les différents résultats de ces tests sont convenables, mais montrent également les possibilités d'amélioration du système.

### Mots-clés :

- 1- Séchage des mangues**
- 2- Séchoir ATESTA**
- 3- Optimisation**
- 4- Ventilation forcée**
- 5- Expérimentation**

## ABSTRACT

Drying is an activity that allows foodstuffs to be stored for long periods of time, particularly in the food processing industry. The drying sector, particularly the "dried mango industry", is booming in Burkina Faso. However, it has hindrances: the cost of production and the quality of products. This study is part of a logic of seeking solutions to this problem. Means of improving production costs are proposed, in particular by valorising the solar potential with the mango drying process of the ATESTA dryer and the energy optimization means of this dryer. The potential of using solar energy to dry mangoes in the case of driers with large production capacity is shown. A new dryer has been built that integrates measures to improve the quality of the products also a system of production optimized compared to the dryer "ATESTA classic". An air network outside our dryer has been set up to provide dry and warm air. This network is composed of a hot air generator and a heat exchanger allowing the renewal of the air in the network with recovery of the heat of the rejected air. The first tests carried out on this system gave satisfactory results, but also show the possibilities of improvement of the system. A rapid rise in temperature in the drying cells. The achievement of recommended temperatures for drying and homogeneity of temperature in the system. With the high pressure drops of the system, the measurement of the air velocities, did not give the desired values for a better circulation of the air. Over the duration of the experiment, the test with the wet cloths gave low evaporation rates but satisfactory. The different results of these tests are suitable, but also show the possibilities of improvement of the system.

### Keywords:

- 1- Mangoes drying**
- 2- ATESTA Dryer**
- 3- Optimization**
- 4- Forced ventilation**
- 5- Experimentation**

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>Notation Principale</b>	<b>Unités</b>
$\rho$ : Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$ : Coefficient de frottement de Darcy	
$\delta$ : Rapport de masse atomique vapeur d'eau – Air	
$\varepsilon$ : Rugosité du matériau	mm
$\Delta P$ : Pertes de charge ( aéraulique)	P <sub>a</sub>
$C_0$ : Investissement initial ( année zéro)	FCFA
$C_p$ : Capacité calorifique massique	J/kg.°C
$D$ : Diamètre	m
$E$ : Energie	J
$e$ : Humidité relative	/
FNT (F) :Flux net de la Trésorerie	FCFA
$h$ : Enthalpie massique	J/kg
$I$ : Irradiation solaire	W/m <sup>2</sup>
$L$ : Longueur caractéristique	m
$L_v$ : Chaleur latente d'évaporation de l'eau	J/kg
$m$ : Masse	kg
$N$ : Quantité ou nombre entier	
$n_r$ : Rendement énergétique	
$P_a$ :Pression atmosphérique	P <sub>a</sub>
PCI : Pouvoir calorifique inferieur	J/kg
$P_v$ : Pression de vapeur d'eau	P <sub>a</sub>
$Q$ : Chaleur	J
$R_e$ : Nombre de Reynolds	
$S$ : Surface	m <sup>2</sup>
$T$ : Température	°C
TRI : temps retour sur Investissement	Année
VAN : Valeur actualisée nette de l'investissement	FCFA
$W$ : Teneur en eau des produits	
$X$ : Humidité absolue	g/kgas

## Notation indicielle

a : Atmosphérique

as : Air sec

c : Cheminée

e : eau

ex : Extrait

h : bulbe d'air humide

H : Hydraulique

k : nombre entier

m : massique

max : Maximum

p : Pertes ou Paroi

s : sec

sat (s) : Saturation

T : Total

th : Thermique

v : Vapeur

val : Valorisé ou valorisable

## SOMMAIRE

<b>CITATIONS</b> .....	<b>I</b>
<b>DÉDICACES</b> .....	<b>II</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>III</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTES DES TABLEAUX</b> .....	<b>X</b>
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1. LES OBJECTIFS DU PROJET .....	<b>2</b>
2. PRÉSENTATION DU CADRE D'ACCUEIL DU STAGE ET DE TRAVAIL .....	<b>3</b>
<b>II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DU SÉCHOIR ATESTA ET THÉORIE DU SÉCHAGE</b> .....	<b>3</b>
1. PRÉSENTATION DE LA FILIÈRE MANGUE SÉCHÉE AU BURKINA FASO.....	<b>3</b>
2. SÉCHOIR ATESTA « CLASSIQUE » .....	<b>4</b>
3. LA THÉORIE DU SÉCHAGE .....	<b>7</b>
<b>III. MÉTHODES ET CALCULS</b> .....	<b>12</b>
1. PRÉSENTATION DU PRODUIT SÉCHÉ : LA MANGUE.....	<b>12</b>
2. PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE ACTUELLE DU SÉCHOIR ATESTA .....	<b>13</b>
3. POTENTIEL SOLAIRE VALORISABLE DE LA ZONE DE PRODUCTION (BOBO DIOLASSO) .....	<b>20</b>
4. MESURES D'OPTIMISATION .....	<b>24</b>
<b>IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS</b> .....	<b>27</b>
1. PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE ACTUELLE DU SÉCHOIR ATESTA CLASSIQUE .....	<b>27</b>
2. POTENTIEL SOLAIRE VALORISABLE DE LA ZONE DE PRODUCTION (BOBO DIOLASSO) .....	<b>29</b>

3.	CALCUL DE L'ÉNERGIE VALORISÉE ET L'ÉCONOMIE DU GAZ COMBUSTIBLE .....	35
4.	COÛTS ÉCONOMIQUES DES MESURES D'OPTIMISATION DU SÉCHOIR .....	35
5.	ETUDE DES POSSIBILITES DE L'INVESTISSEMENT SOLAIRE.....	38
<b>V.</b>	<b>CONSTRUCTION D'UN SECHOIR ATESTA OPTIMISE .....</b>	<b>44</b>
1.	CAHIERS DE CHARGE DE LA CONSTRUCTION DU SECHOIR ATESTA OPTIMISE .....	44
2.	CARACTÉRISTIQUES DU GÉNÉRATEUR D'AIR CHAUD.....	46
3.	CAISSON ET L'ÉCHANGEUR DE CHALEUR AIR - AIR.....	47
4.	CONCEPTION DU SÉCHOIR OPTIMISÉ. ....	48
5.	LES PERTES DE CHARGES AÉRAULIQUES ET IMAGE DU SYSTÈME .....	49
<b>VI.</b>	<b>RESULTATS EXPERIMENTAUX ANALYSES ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>51</b>
1.	PRESENTATION DES INSTRUMENTS DE MESURE ET PROTOCOLE DE TEST .....	51
2.	RESULTATS ET ANALYSES DES DIFFERENTS TESTS .....	52
3.	RECOMMANDATIONS .....	60
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>63</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>64</b>
	<b>ANNEXE I. ....</b>	<b>65</b>
	<b>ANNEXE II.....</b>	<b>66</b>
	<b>ANNEXE III. ....</b>	<b>74</b>
	<b>ANNEXE IV. PRÉSENTATION DU CADRE D'ACCUEIL DU STAGE ET DE TRAVAIL.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANNEXE V . PLANS DÉTAILLÉS DU SÉCHOIR ET DU CAISSON DE L'ÉCHANGEUR.....</b>	<b>80</b>

## Liste des figures

<b>FIG. 1</b>	EXEMPLE DE SACHET DE MANGUE SÉCHÉE BIO BURKINA FASO.....	4
<b>FIG. 2</b>	SCHÉMA DU PRINCIPE DE SÉCHAGE CONVECTIF DU SÉCHOIR ATESTA.....	8
<b>FIG. 3</b>	ÉVOLUTION DE L'AIR LORS DE L'OPÉRATION DE SÉCHAGE.....	10
<b>FIG. 4</b>	POURCENTAGE EAUX LIBRES ET EAU LIÉES À EXTRAIRE .....	14
<b>FIG. 5</b>	ÉNERGIE UTILE PAR PHASE .....	27

FIG. 6 RÉPARTITION CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE D'UN CYCLE .....	28
FIG. 7 IRRADIATION GLOBALE JOURNALIÈRE (KWH/M2/J) .....	30
FIG. 8 TEMPÉRATURE MOYENNE JOURNALIÈRE (°C).....	30
FIG. 9 HUMIDITÉ RELATIVE MOYENNE JOURNALIÈRE .....	30
FIG. 10 PROFIL DE CHARGE DU SÉCHOIR SUR UN CYCLE .....	31
FIG. 11 UN PROFIL DE PRODUCTION HORAIRE DES CAPTEURS SOLAIRES .....	32
FIG. 12 CALCUL ÉNERGIE SOLAIRE VALORISÉE : CAS 1) 7 CAPTEURS SOLAIRES CAS 2) 10 CAPTEURS SOLAIRE.....	33
FIG. 13 TAUX DE COUVERTURE SOLAIRE.....	34
FIG. 14 ÉNERGIE SOLAIRE PRODUITE ET VALORISÉE .....	34
FIG. 15 INVESTISSEMENT VALORISATION POTENTIEL SOLAIRE.....	39
FIG. 16 ÉCONOMIE DU GAZ GÉNÉRÉ SUR UNE CAMPAGNE - SYSTÈME SOLAIRE .....	40
FIG. 17 TEMPS DE RETOUR SUR INVESTISSEMENT SOLAIRE.....	41
FIG. 18 VALEUR ACTUELLE NETTE (VAN) POUR CHAQUE INVESTISSEMENT .....	42
FIG. 19 VUE D'ENSEMBLE DU SYSTÈME DE SÉCHAGE CONSTRUIT.....	50
FIG. 20 PROFIL TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE ENTRÉE SÉCHOIR .....	54
FIG. 21 PROFIL TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE SORTIE SÉCHOIR .....	55
FIG. 22 PROFIL DE TEMPÉRATURE CELLULE GAUCHE CLAIE 1,7 AVANT, 12.....	55
FIG. 23 CELLULE GAUCHE SÉCHOIR : COMPARAISON TEMPÉRATURE CLAIE 1,7AV, 12.....	56
FIG. 24 CELLULE GAUCHE SÉCHOIR : COMPARAISON TEMPÉRATURE CLAIE 7 ARRIÈRE & AVANT.....	57
FIG. 25 TEST LINGES MOUILLÉS CELLULE DROITE CLAIE 7: VARIATION DE LA TEMPÉRATURE ENTRÉE-SORTIE .....	58
FIG. 26 TEST LINGE MOUILLÉ CELLULE DROITE CLAIE 7: VARIATION HUMIDITÉ ABSOLUE ENTRÉE-SORTIE .....	58
FIG. 27 TEST LINGE MOUILLÉ ENTRÉE - SORTIE SÉCHOIR: VARIATION HUMIDITÉ ABSOLUE .....	59
FIG. 28 TEST LINGE MOUILLÉ ENTRÉE - SORTIE SÉCHOIR: MASSE D'EAU EXTRAITE .....	59

## Listes des Tableaux

TABLEAU 1 DURÉE ET VITESSE AU COURS D'UN CYCLE DE SÉCHAGE .....	14
TABLEAU 2 INCLINAISON OPTIMAL DES CAPTEURS SOLAIRES .....	22
TABLEAU 3 RÉPARTITION CONSOMMATION ET ÉNERGÉTIQUES UTILES SUR UN CYCLE.....	27
TABLEAU 4 RÉPARTITIONS DES PERTES ÉNERGÉTIQUES SUR UN CYCLE .....	28
TABLEAU 5 RÉPARTITION PAR PHASE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE SUR UN CYCLE.....	29
TABLEAU 6 DÉBITS MASSIQUES ET VOLUMIQUES DU GAZ ET DE L'AIR .....	31
TABLEAU 7 POTENTIEL DES PERTES VALORISABLE À TRAVERS L'ÉCHANGEUR DE CHALEUR RECAIR RS160 .....	35
TABLEAU 8 COÛT ÉCHANGEUR DE CHALEUR.....	36
TABLEAU 9 COÛT CONDUITES D'AIR EXTERNE .....	37
TABLEAU 10 COÛT D'ACQUISITION DU SÉCHOIR OPTIMISÉ.....	37
TABLEAU 11 COÛT TOTAL MESURES D'OPTIMISATION DU SÉCHOIR ATESTA "CLASSIQUE" .....	37
TABLEAU 12 : LE PRIX ET LE PCI DU GAZ BUTANE .....	39
TABLEAU 13 RÉSULTATS CALCUL PERTES DE CHARGE AÉRAULIQUE DU SYSTÈME .....	50
TABLEAU 14 MESURES DE VITESSE À DIFFÉRENTS POINTS DU SYSTÈME .....	53

## I. INTRODUCTION

Le problème alimentaire reste une préoccupation majeure dans les pays en voie de développement en particulier les pays de l'Afrique subsahariens. Dans ses régions d'Afrique, les études estiment à 40% (Eduon, et al., 2011) les pertes postes récoltes. Cette situation représente un frein important pour le développement des politiques alimentaires solides pour garantir la sécurité alimentaire dans ces différents pays. L'amélioration de cette situation passe par le développement et la diffusion des technologies modernes agro-transformations adaptées aux contextes socio-économiques locales et propres à chacun de ses pays.

Le Burkina Faso, pays de l'Afrique de l'Ouest, est particulièrement concerné par cette problématique. Dans ce pays, la mangue est l'une des principales récoltes agricoles. Avec une production annuelle estimée à 160 000 tonnes en 2014 (Simone Carboni, 2016), le Burkina est parmi les premiers producteurs mondiaux de mangue fraîche (Arnoldus, and al., 2011). Avec un climat très aride, la récolte de mangue est concentrée sur trois mois de l'année Mai, Juin, Juillet. Il s'ensuit une surproduction importante sur une campagne et les pertes post-récoltes très importantes sont évaluées à plus de 40% (Eduon et al., 2011). Naturellement les problèmes de conservations et de satisfactions de la demande du marché intérieur et extérieur au-delà de cette courte période de production sont réels. Avec ce constat et l'importance économie que représente la filière mangue dans ce pays, plusieurs acteurs de la coopération et de l'économie en Afrique de l'Ouest en particulier le Burkina Faso ont développé des modèles de séchoir de mangues.

Le Centre Ecologique Albert Schweitzer (CEAS), œuvre depuis les années 1980 au Burkina Faso dans le développement et le transfert de technologies des séchoirs modernes adaptées aux conditions socio-économiques locales. Le séchoir ATESTA est l'une des créations du CEAS Suisse des années 1997. Ce séchoir qui fonctionne au gaz butane, a connu le plein succès auprès des utilisateurs ceci à cause de son mode d'utilisation simplifié et fiable. De nos jours, plus de 90% de mangues séchées au Burkina sont produites par ce séchoir. Le coût de production et la qualité des produits restent les principaux problèmes de ce séchoir. Ces deux maux sont des principaux freins à l'émergence de la filière mangue séchée au Burkina Faso. Pour pallier à cette problématique, il a été soumis à notre étude un projet d'optimisation du séchoir ATESTA et de la valorisation du potentiel solaire de la région à travers son processus de production. Étant le séchoir le plus ancien et le plus représenté sur le

territoire, ce séchoir ATESTA a été l'objet de plusieurs études pour l'amélioration de ses performances. Le projet ONUDI financé par la Banque Mondiale dont l'objectif était la création d'un séchoir mixte solaire/gaz ou solaire/Diésel à partir du séchoir ATESTA « classique ». Les résultats de ce projet sont restés à l'échelle du laboratoire et n'ont pas été diffusés auprès des sécheurs. Nous avons également le projet d'amélioration du séchoir ATESTA initié et financé par le CEAS Suisse qui a donné une version dite « améliorée » du séchoir ATESTA avec la convection forcée et la réduction de près de 50% de la permutation des claies au cours d'un cycle. Toutefois, après les différents projets dont ce séchoir a fait l'objet, le coût de production et la qualité du produit restent des problèmes majeurs de la filière mangue séchée au Burkina Faso.

## 1. Les objectifs du projet

Sortie des ateliers de technologie de l'association CEAS Suisse depuis des années 1995, la technologie du séchoir ATESTA est ancienne et connaît des limites à nos jours. Dans un contexte où le prix du gaz combustible ne cesse de croître et le rendement thermique du séchoir très faible de l'ordre de 30% (Rivier et al., 2009). Le coût de production du séchoir est aujourd'hui très élevé pour garantir la rentabilité de l'activité de séchage de mangues. La qualité des produits en fonction des normes du marché qui évoluent au fil du temps se trouve menacer ce qui réduit davantage le développement de cette filière. Notre objectif principal est d'optimiser ce séchoir afin d'améliorer la qualité des produits séchés en particulier les mangues et diminuer les coûts de production pour une meilleure rentabilité de cette activité. De façon plus détaillée, il s'agit :

- De faire une analyse des performances générales du séchoir actuel en conditions réelles de production dans les sécheries,
- D'étudier les possibilités de valorisation de la ressource solaire de la région de production à travers le processus de production de ce séchoir
- De réaliser un cahier des charges des mesures d'optimisation du séchoir
- De définir des séries de mesures d'optimisation pour la qualité des produits et la diminution des coûts de production.
- D'implémenter des mesures d'optimisation définie sur un séchoir existant et la validation en condition réelle de production

## 2. Présentation du cadre d'accueil du stage et de travail

Ce projet d'étude faisant intervenir plusieurs partenaires dont le Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT) de la Heig-Vd Suisse qui est le leader de ce projet, le Laboratoire d'Energie Solaire et Economie d'Energie(LESEE) (2IE), le Centre Ecologique Albert Schweitzer(CEAS) ONG Suisse, le CEAS Burkina Faso la branche du CEAS Suisse totalement indépendante et le groupe WAKA. Les travaux de ce mémoire ont été réalisés dans les enceintes de plusieurs de ses partenaires le LESBAT, le LESEE, et le CEAS Suisse. La présentation détaillée de chacune de ses institutions ou ONG est en **annexe V**.

# II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DU SÉCHOIR ATESTA ET THÉORIE DU SÉCHAGE

## 1. Présentation de la filière mangue séchée au Burkina Faso

Le marché européen est premier dans les importations de mangues séchées dans le monde. Il représente plus de 90% des parts de marchés dans lequel la Suisse et le Royaume Unis représentent plus de la moitié des importations. Le leader dans l'exportation de la filière est l'Afrique du Sud qui détient près de 50% des parts de marché. Le Burkina Faso est le leader de la production de la mangue séchée biologique (**Fig.1**) qui représente près de 15% des exportations totales (Arnoldus et al., 2011). En 2011, le prix du kilogramme à l'importation était estimé à 7,00 euros (Simone Carboni, 2016) en moyenne pour la mangue biologique séchée burkinabé et 5,08 euros pour la mangue séchée conventionnelle.



**Fig. 1** Exemple de sachet de mangue séchée bio Burkina Faso

Depuis la filière mangues séchées du Burkina Faso n'a cessé de croître. Ceci suite à l'amélioration et au développement de nouvelles technologies d'agro-transformation ainsi qu'à l'acquisition de différentes certifications pour la production des fruits frais comme séchés par les propriétaires de vergers et les sécheurs de la filière. L'augmentation de la demande, l'expansion des vergers, ainsi que l'arrivée de nouvelles technologies importées de transformation semi-industrielle sur le territoire burkinabé ont également contribué de l'essor important de la filière. Le volume des exportations de 1987 l'année de production des premiers kilogrammes exportés de mangues séchées à nos jours sont en constante augmentation malgré les difficultés que rencontrent parfois les vergers dus à des parasites responsables des infections des fruits. On note une production de près de 12 tonnes de mangues séchées dans les années 1995 selon le rapport du cercle des sécheurs (Arnoldus et al., 2011). Aujourd'hui l'entreprise TENSYA GAMPRI (ATB, 2017) située dans la région des Hauts-bassin, équipé de près de 57 séchoirs ATESTA et séchoir tunnels exporte annuellement plus de 150 tonnes de mangues séchées. Cette croissance est en partie due à l'accroissement du nombre de sécherie sur le territoire national. Le marché national est approvisionné par des produits de second choix issus du séchage et commercialisé au prix de 500 CFA par unité de 100g.

## **2. Séchoir ATESTA « classique »**

### **2.1. Présentation**

Le séchoir ATESTA sous sa forme classique (**Fig. 2 annexe I**) sortie des ateliers du CEAS Suisse (Guissou, 1996), est composé de cinq parties. La semelle, le socle, le boxe ou la chambre de séchage, le casque ou la hotte et la cheminée.

#### **2.1.1. La semelle**

C'est la partie du séchoir qui repose sur le sol (**Fig 3 annexe I**). Elle est construite soit en banco ou en béton suivant la disponibilité du matériau. Sa base est carrée de dimension 1.80 m et sa hauteur mesure 0.70 m. Elle est constituée de deux compartiments avec chacun une ouverture à l'arrière et sur la face avant. Chacun de ses compartiments est équipé d'un bruleur à gaz de type rampe. Les ouvertures sur la face avant permettent l'introduction et l'allumage des bruleurs, le contrôle de la flamme et le nettoyage du séchoir des débris de fruits tombés des claies et des raille de la chambre de séchage. L'alimentation en air du

séchoir pour la combustion et le séchage est assurée pas les ouvertures arrières. Ses ouvertures sont constituées d'un grillage pour barrer toute éventuelle infiltration grossière de poussières et d'insectes, d'un dispositif permettant d'assurer la stabilité de la flamme contre toute variation brusque de la vitesse du vent. Chaque bruleur est constitué de deux tuyaux métalliques de 20 mm de diamètre, percé de 3 rangées de trous et de deux robinets à gaz.

### **2.1.2. Le boxe ou chambre de séchage**

C'est la partie centrale du séchoir, dans laquelle sont disposés les produits à sécher. Les parois internes sont couvertes de contreplaqués de 10 mm d'épaisseur. Ceci pour une meilleure isolation afin de minimiser les pertes thermiques. La base est construite en bois rouge plus solide pour une meilleure adhésion et déplacement sur la semelle. La partie centrale est divisée en deux compartiments suivant ceux de la semelle. Chaque compartiment compte 10 claies de 0,7 m<sup>2</sup> d'une capacité de traitement de 5 kg de pulpes de mangues fraîches par claie supportées par des rails en bois blanc montés sur les parois internes. La circulation horizontale de l'air sur chaque claie est assurée par des chicanes faites en contreplaqué. Les claies sont des cadres rectangulaires (**Fig 4 annexe I**) également fabriquées en bois blancs avec le fond tissé sous forme de grillage à l'aide du fil nylon pour permettre meilleure circulation de l'air entre les produits. Sur la face avant du box on a deux portes métalliques supportées par des paumelles. Sur chacune d'elles sont montés deux thermomètres en haut et en bas pour le contrôle de la température au cours du séchage et des joints pour une meilleure étanchéité.

### **2.1.3. Le socle**

C'est un cadre rectangulaire arrondi aux différents sommets. Il est construit en bois rouge avec des entailles sur les différents sommets. Le socle permet de monter et de maintenir une étanchéité entre le box et la semelle. Il permet également un éventuel déplacement du box sur la semelle. Une mousse d'environ 3cm est utilisée afin de garantir l'étanchéité avec le box.

### **2.1.4. La cheminée**

C'est l'élément le plus haut du séchoir (**Fig 5 annexe I**). Elle est de forme cylindrique d'environ 2,5 m de longueur et 37 cm de diamètre. Elle est construite en tôle métallique avec la surface intérieure recouverte d'une couche d'environ 10 mm de contreplaqué. Ceci afin de limiter les échanges thermiques pour une meilleure circulation de l'air qui sort du séchoir. La

cheminée porte un chapeau en métal qui empêche les pluies et les poussières de pénétrer dans le séchoir. Elle est suffisamment haut pour éviter tout obstacle au tirage de l'air du séchoir.

## 2.2. Principe de fonctionnement du séchoir ATESTA « classique »

Le but du séchage d'un produit est la déshydratation de ce produit de façon à abaisser sa teneur en eau en dessous d'une valeur prescrite par le cahier de charge. Dans le cas présent des mangues, la teneur en eau finale prescrite est entre 15 à 18% de la masse du produit séché (Rivier et al., 2009). L'air constitue l'élément essentiel du processus de séchage. Pratiquement tout le séchage est conditionné par les propriétés de l'air en circulation dans le séchoir. Il s'agit de la température, de l'état hygrométrique et la vitesse de l'air dans le système. Le renouvellement d'air dans le séchoir est assuré par la trappe arrière pratiquée sur la semelle du séchoir. Sur cette trappe couverte d'une grille métallique est montée une plaque en tôle coulissante permettant de varier le débit d'air admis. Une partie de l'air admis est utilisée pour la combustion et l'autre chauffée par les gaz de combustion pour des fins de séchage. La combustion est réalisée par les brûleurs de type rampes qui assurent le mélange gaz butane-Air avec un débit de gaz variable. L'air chauffé est diffusé en convection naturelle dans le box. Un diffuseur est monté entre la semelle et la chambre de chauffage pour assurer l'homogénéité de la diffusion de l'air chauffé dans cette dernière. Dans la chambre de séchage, le fond de chaque claie est tissé sous forme de grillage afin de permettre une meilleure circulation d'air horizontale et verticale entre les produits exposés. Les chicanes en contre-plaqué de faibles épaisseurs sont judicieusement disposées horizontalement pour favoriser la diffusion horizontale de l'air sur les claies. Ces claies sont disposées en serpent (lignes brisées) (**Fig 6 annexe I**) afin de permettre une circulation de l'air chaud jusqu'à la dernière claie. Ces claies sont permutées toutes les deux heures pendant le processus de séchage pour des raisons d'homogénéité du séchage. Les produits sont chargés par l'ouverture des portes ainsi que la permutation des claies. Le réglage de la température dans le box est manuel et délicat. Il s'effectue par la variation du débit du gaz du brûleur. L'air humide et chaud issu de la chambre de séchage est évacué à travers le casque par la cheminée dans l'atmosphère. Le contrôle du pourcentage de la teneur en eau des produits au cours du séchage s'effectue par les pesées régulières des claies (claies plus tranches de produits) et la comparaison de la masse avec la masse initiale avant le début du processus.

### 2.3. Revue des modifications du séchoir ATESTA (1998 – 2015)

Les exigences normatives de qualité du marché d'exportation vont grandissantes ainsi que les commandes qui augmentent au fil des années. Face à tous cela, le CEAS Suisse, CEAS-Burkina et également certains chercheurs se sont intéressés au séchoir ATESTA afin de répondre à des questions d'ordres techniques et économies soulevées par des sécheurs. A cet effet, plusieurs projets d'appuis à la filière mangue séchée ont été élaborés et exécutés.

#### ➤ **Projet d'appuit à la structuration de la filière mangue séchée 2004**

**Yezouma C. et Rivier M.** ( Yézouma et al. , 2005) ont obtenu avec les différentes modifications apportées au séchoir ATESTA « classique », les résultats notables. La diminution de 8h pour la durée d'un cycle de séchage avec l'installation de la convection forée. Ils ont également noté une bonne qualité de produits avec plus de 90% de production de premier choix.

#### ➤ **Projet d'Amélioration et Technique de Production de la mangue séchée au Burkina Faso** (Konseibo & Soulama, 2015a)

A l'issu de ce projet, un modèle dit « amélioré » du séchoir ATESTA classique (Konseibo & Soulama, 2015b) a été construit intégrant une convection forcée et la recirculation de l'air avec une réduction de moitié du nombre de permutation des claies sur un cycle, une augmentation du taux de production des produits de premiers choix.

#### ➤ **Projet développement d'un séchoir mixte solaire / gaz naturel « séchoir mixte CEAS** (CEAS Suisse, 2011)

Ce projet avait pour objectif la mise au point d'un séchoir ayant pour source d'énergie principale le solaire et le gaz butane comme source d'appoint en cas de non ensoleillement. Le séchoir issu de ce projet porte le nom de « séchoir Mixte » (CEAS Burkina, 2011) et intègre effectivement le solaire et le gaz pour la production des mangues séchées. L'échec connu par ce séchoir réside sûrement dans le coût d'acquisition et la complexité de la technologie par rapport au séchoir ATESTA « classique ».

## 3. La théorie du séchage

### 3.1. Définition

Le séchage est une application pratique de l'air humide que l'on rencontre régulièrement dans le domaine du résidentiel et industriel. C'est une pratique qui consiste à retirer de l'eau à un

produit afin de l'amener à une teneur en eau nécessaire selon le cahier des charges de l'opération. Le séchage trouve l'importance dans la conservation des aliments et les produits organiques sur le long terme. En ce sens, il est un moyen adéquat pour la lutte contre l'insécurité alimentaire et la malnutrition en particulier dans les pays du Sud. Étant donné les problèmes de disponibilité d'électricité au Burkina Faso, le séchage se présente comme un moyen sûr, adéquat pour la conservation, le conditionnement et le transport sur le long terme des produits organiques en particulier alimentaires.

### 3.2. Principe et description du séchage

Pour les activités de séchage, naturellement on a besoin d'un séchoir ou un système approprié permettant la transformation de l'air afin de le ventiler sur les produits bien disposés. Pour sécher un produit, la méthode la plus élémentaire est de le ventiler avec un air suffisant chaud et sec pour établir des échanges de chaleur et d'humidité (la matière) entre le produit et l'air. Pour une installation de séchage dit convectif, nous pouvons schématiser le processus comme suit :

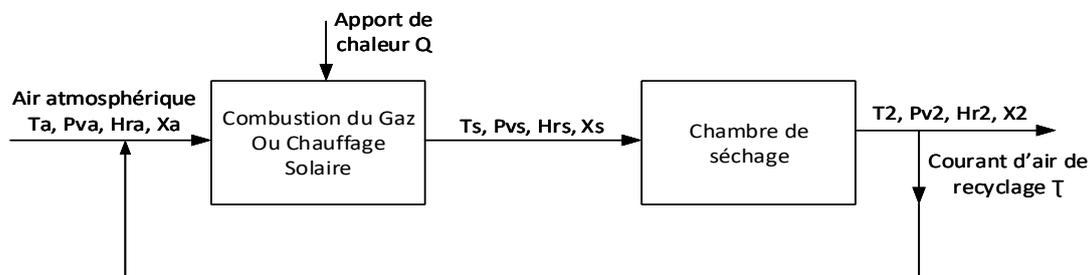


Fig. 2 Schéma du principe de séchage convectif du séchoir ATESTA

L'air pris dans l'atmosphère à l'état hygrométrique  $T_a$ ,  $P_{v_a}$ ,  $H_{r_a}$ ,  $X_a$  passe dans la chambre de chauffage où il est éloigné davantage de son point de saturation par apport de chaleur supposé à pression de vapeur constante en suite son passage dans la chambre de séchage sur les produits entraîne son humidification au contact des produits humides. Cette dernière transformation est supposée adiabatique dans le cas d'une enceinte bien isolée. Dans l'enceinte de séchage durant tout le processus, la température de surface des produits est supposée égale à la température de bulbe humide de l'air ( $T_{h2}$ ). Lors de ces différentes transformations de l'air de séchage, les différents paramètres caractérisant son état hygrométrique peuvent être calculés soit à l'aide du diagramme de l'air humide dans les cas de faibles températures (inférieure à  $50^\circ\text{C}$ ) ou par le biais des formules de l'air humide et des

outils de calcul (Jacque, 2017) développés à cet effet pour des transformations à hautes températures. Suivant ce principe décrit (Fig. 9), il faut un apport de chaleur suffisante à l'aire de séchage et une vitesse d'air suffisante pour entrainer la vapeur d'eau extraite des produits. Les paramètres essentiels pour le suivi de l'opération de séchages sont :

➤ **La température de séchage**

Elle est fixée en fonction de plusieurs paramètres de l'opération. La cinétique du produit à sécher, la différence de pression de vapeur d'eau entre l'air de séchage et la surface du produit exposé. Dans le cas d'un séchage à convection naturel, la vitesse de circulation de l'air est définie par cette température.

➤ **La vitesse de séchage**

L'étude expérimentale du séchage de certains fruits à forte teneur en eau a montré plusieurs phases de séchage (Jeannot, 2011) la phase d'évaporation d'eau libre et celle d'évaporation d'eau liée. La cinétique des produits est différente en fonctions de ces différentes phases de l'opération. Pour une meilleure conservation de l'intégrité des produits séchés, la fixation de la vitesse de séchage dépendra également de ses différentes phases.

➤ **La teneur en eau ou humidité relative des produits**

Ce paramètre permet de suivre et d'identifier la fin de l'opération. Sa valeur finale est fixée par le cahier des charges de l'opération. Dans les cas des mangues, la valeur finale varie entre 15 à 18% de la masse finale du produit sec. Initialement, ce paramètre noté ( $w$ ) qui vaut 85% en moyenne pour la mangue fraîche, représente la quantité d'eau contenue dans le produit rapporté à la masse soit de matière sèche (en base sèche) ou totale du produit (en base humide) à sécher exprimer en kilogramme d'eau par kilogramme de produit ( $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{produit}}$ )

➤ **Le rendement massique de séchage**

Sur le diagramme de l'air humide, nous pouvons représenter l'opération de séchage par la figure suivante :

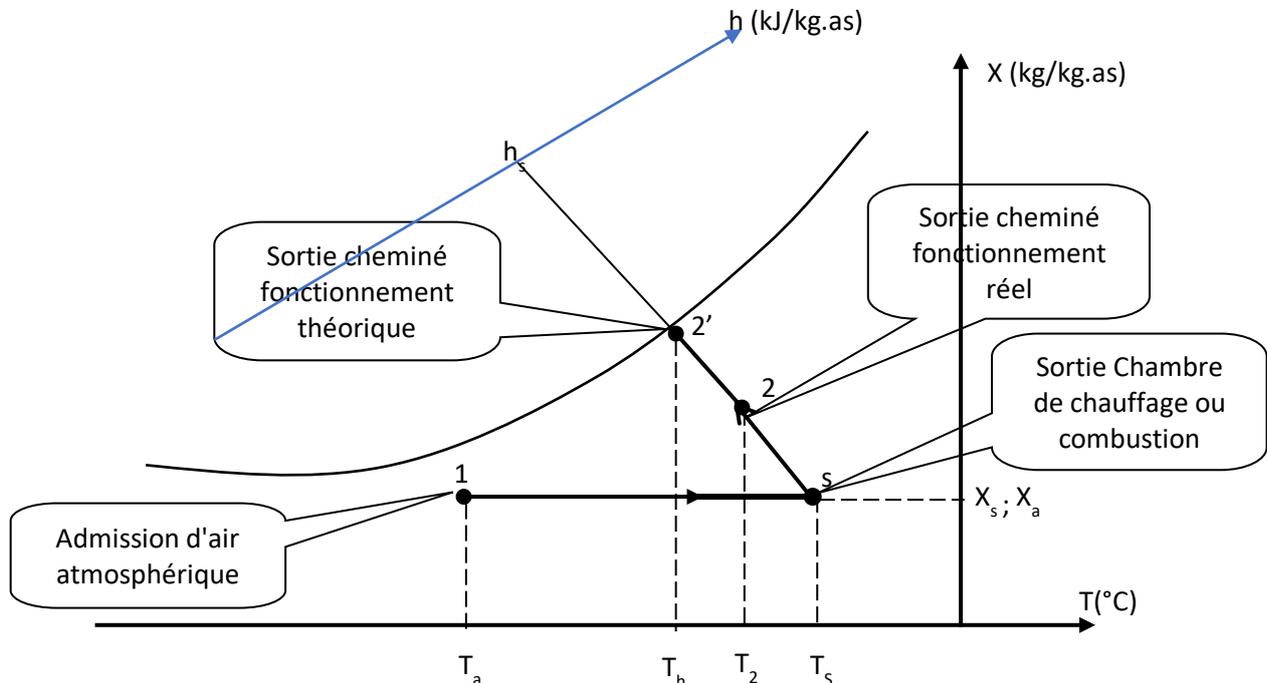


Fig. 3 Evolution de l'air lors de l'opération de séchage

L'état (1) représente l'air atmosphérique, l'état (S) l'air à la sortie de la chambre de chauffage, l'état (2) l'air dans la cheminée et l'état (2') l'air dans la cheminées cas idéal (l'air à l'état de saturation).

Le rendement massique permet de caractériser un séchoir et le calcul de son pouvoir évaporation (PE). Il est défini comme étant le rapport de la masse d'eau des produits effectivement évaporée sur celle évaporée dans les conditions idéales position (2') sur la figure 10 ci-dessus (l'air sortant du séchoir dans un état saturé)

$$\eta_m = \frac{X_2 - X_a}{X_{2'} - X_a} \quad (1.1)$$

Il dépend fortement de la température de séchage, de la cinétique du produit ainsi que de la vitesse de séchage. Le débit massique d'eau évaporée en condition réelle est défini par :

$$\Delta \dot{m} = \dot{m}_{as} \eta_m (X_{2'} - X_a) \quad (1.2)$$

➤ **Le rendement énergétique du séchage**

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport de l'énergie effectivement consommée par la quantité totale d'eau évaporée sur un cycle de séchage (énergie utile) sur la consommation d'énergie du système (énergie fournie à l'air dans la chambre de chauffage).

$$\eta_r = \frac{\dot{m}_{air} \cdot L_v}{1 + X_a \cdot Q} \quad (1.3)$$

Suivant la figure 10 ci-dessus, on définit le rendement théorique de l'opération par :

$$\eta_{théo} = \frac{(X_2 - X_s) \cdot L_v}{h(T_s) - h(T_a)} \quad (1.4)$$

$L_v$  est la chaleur latente d'évaporation de l'eau,  $h(T)$  l'enthalpie massique de l'air,  $X_i$  l'humidité absolue de l'air,  $\eta_{th}$  le rendement thermique de l'opération

### 3.3. Le séchage comme application d'air humide

Définition de quelques paramètres essentiels de l'air humide nécessaires pour un séchage convectif.

#### ➤ Pression de vapeur $P_v$ et la pression de saturation $P_s(T)$

L'air humide (air atmosphérique) considéré comme un gaz parfait, est un mélange de vapeur d'eau de masse  $m_v$  et d'autres constituants en quantité réduite que l'on appelle air sec de pression partielle  $P_{as}$ . La pression totale  $P$  de l'air humide est la somme des pressions partielles de ses constituants. L'état de saturation de l'air correspond à un état d'équilibre liquide-vapeur d'eau contenu dans l'air. Dans cet état, nous avons :

$$P_v = P_s(T) \quad (1.5)$$

La loi d'Antoine permet le calcul de la pression de saturation

$$P_s(T) = P_0 * \exp\left(A - \frac{B}{T - C}\right) \quad (Pa) \quad (1.6)$$

Pour l'eau, les paramètres sont :  $A = 11,68$  ;  $B = 3816 \text{ K}$  ;  $C = 46 ; 13 \text{ K}$

#### ➤ L'humidité relative ou degré hygrométrique de l'air humide

C'est la fraction de masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport à la masse maximale de vapeur que peut contenir cet air pris à la même température. Pour un état de l'air donné, elle peut être calculée à partir des relations suivantes :

$$e = \frac{m_v}{m_{v,max}} \quad \text{ou} \quad e = \frac{P_v}{P_s(T)} * 100 \quad (1.7)$$

#### ➤ Humidité absolue ou teneur en vapeur d'eau de l'air humide

C'est la fraction de la vapeur d'eau contenue dans un volume d'air par rapport à la masse d'air sec contenu dans le même volume. Pour un volume d'air humide donné, on l'exprime par des relations suivantes :

$$X = \frac{m_v}{m_{as}} \quad ; \quad X = \delta \frac{P_v}{P_0 - P_v} \quad ; \quad e = \frac{X}{X + \delta} * \frac{P_0}{P_s} \quad (1.8)$$

$\delta$  est la densité de la vapeur d'eau ou rapport de masse vapeur eau – air .  $\delta = 18/29$  soit 0,622

#### ➤ L'enthalpie de l'air humide

L'enthalpie totale de l'air humide est égale à la somme des enthalpies de l'air sec et de la vapeur d'eau contenue dans cet air. A parti de l'état de référence (  $T=0^\circ\text{C}$  ;  $X = 0 \text{ kg/kgas}$  ) il est donné par la relation en unité de masse d'air sec.

$$h(T) = c_{p_{as}} * T + (L_v + c_{pv} * T) X \quad (\text{kJ} / \text{kgas}) \quad (1.9)$$

### III. MÉTHODES ET CALCULS

Le but de ce travail en partie consiste à l'optimisation du point du vu énergétique du séchoir ATESTA à l'état actuel. Pour cette raison, nous devons faire une mise au point de la situation énergétique du séchoir en termes des besoins, la consommation énergétique réels, et la quantification des pertes thermiques.

#### 1. Présentation du produit séché : la mangue

La mange fait partie des fruits les plus récoltés au Burkina Faso. On dénombre un rendement de 7 à 8 tonnes par hectare (Yezouma, and al., 2005) et une production annuelle nationale estimée à 160 mille tonnes (Rivier et al., 2009). La durée moyenne pour une première récolte est de trois ans. Les fruits sont de tailles variées, de masse variable de 0,1 à 2kg en fonction de la variété (**tableau 1 annexe III**). Le fruit est formé de trois parties : la peau, la pulpe qui est la partie comestible et le noyau. Sur le plan national, on rencontre en particulier trois variétés l'Amélie, la Brooks et Kent. Les plus séchées sont l'Amélie qui est produite en début de campagne (généralement mai-juin) et la Brooks en fin de campagne. La teneur en eau de la mangue est pratiquement la même, quelles que soit les variétés. Elle varie

entre 80 à 86% en masse de matière humide. Pour les activités de séchage, la teneur en eau des produits séchés conseillée pour une bonne conservation est 14 à 15% définie par rapport à la masse du produit séché.

Pour les travaux de ce mémoire, nous avons travaillé avec la variété Amélie. Ceci parce que le test du prototype est prévu en début de la campagne. La composition moyenne retenue pour cette variété est regroupée dans **le tableau 2 de l'annexe III** de la section ci-dessous. La teneur en eau du produit séché est fixée à 15% par rapport à la matière sèche donc 0% d'eau libre.

## **2. Performance énergétique actuelle du séchoir ATESTA**

A l'état actuel, la caractérisation du point de vue énergétique du séchoir ATESTA est incomplète. Par rapport aux retours d'expériences, nous avons les informations sur la consommation énergétique sur un cycle ainsi que la consommation du gaz par unité de kilogramme de produits séchés. Avant de porter un regard sur les mesures d'optimisations énergétiques, nous allons en avance évaluer les performances énergétiques du séchoir à l'état actuel.

### **2.1. Calculs d'air humide**

Théoriquement, le process du séchoir ATESTA peut être représentée sur le diagramme de l'air humide voir figure (Fig. 10) précédente. Dans la pratique, l'opération de déshydratation des mangues se déroule en deux phases distinctes. La première en début d'opération d'une durée de 10 à 12 heures, est caractérisée par l'évaporation complète de l'eau libre des produits, de fortes vitesses de séchage, de fortes températures de séchage pouvant atteindre les 90°C. Pour cette phase, la vitesse de séchage est quasiment constante et elle peut être accélérée en augmentant la vitesse de circulation de l'air dans le séchoir. La deuxième phase d'une durée de 10 à 14 heures correspond à l'évaporation partielle à vitesse limitée de l'eau liée du produit. Nous avons de faibles températures de séchage (45-55°C) ceci afin de conserver au mieux l'intégrité du produit séché. En l'absence d'eau libre dans le produit, la migration de l'eau liée en surface du produit est freinée et le risque de croûtage est grand.

#### **2.1.1. Hypothèses de calculs**

Pour 100 kg de pulpes de mangues fraîches, nous avons la composition présentée dans **le tableau 2** de l'annexe III.

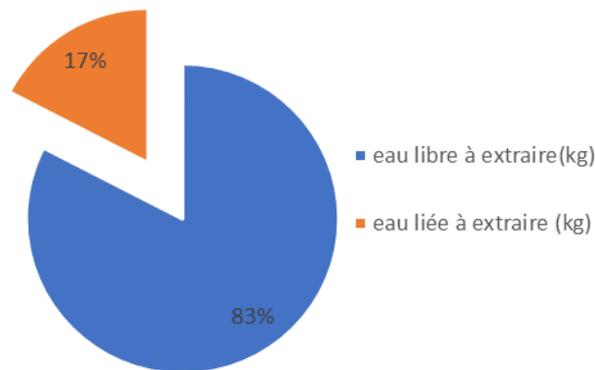


Fig. 4 pourcentage eaux libres et eau liées à extraire

Nous avons fait des hypothèses suivantes pour la suite de nos calculs.

- La durée d'un cycle et de chaque phase du séchage

Par rapport à la quantité d'eau à extraire par phase, la deuxième phase du processus est considérée très longue. Pour ce travail, nous avons considéré la répartition entre les deux phases donnée dans le tableau ci-dessous. A noter que cette répartition n'est valide que pour le séchoir ATESTA.

- La vitesse de séchage ou vitesse d'évaporation de l'eau en surface du produit

Nous avons considéré une vitesse constante par phase. Ces vitesses ont été calculées en divisant la quantité d'eau à évaporer pour chaque phase du cycle par la durée de phase. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 Durée et vitesse au cours d'un cycle de séchage

	Cycle	phase 1	phase 2
durée en heure	20	10	10
vitesse de séchage (Kg vap/h)		6.8	1.5

- Pour des calculs, nous avons considéré négligeable la variation des propriétés thermophysiques de l'air en fonction de la température et la pression.

### 2.1.2. Calcul des paramètres de l'air après chaque transformation subit au cours du séchage

Pendant l'opération de séchage, sur chaque phase l'air en circulation dans le système subit successivement les transformations telles que représentées sur la figure 10(31). Chacune d'elles entraîne la modification des caractéristiques hygrométriques de l'air de séchage.

- L'état 1 correspond à l'admission de l'air humide (atmosphérique ou ambient) dans le système. Les caractéristiques de l'air sont calculées à partir des données de la météo du lieu d'opération **tableau 3(74) annexe III**.

- L'état (s) correspond à l'air chaud et sec à la sortie de la chambre de chauffage du séchoir.

La transformation (1 → S) est le chauffage de l'air atmosphérique. Au cours de cette opération, l'humidité absolue et la pression de vapeur d'eau restent constantes. Connaissant les températures finales, on calcul les caractéristiques de l'air à l'état (S) les résultats sont consignés dans le **tableau 4 annexe III (74)**.

- L'état 2 sur le graphe correspond à l'état de l'air dans la cheminée après passage sur les produits humides.

Pendant la transformation (S → 2), l'air chaud et sec venant de la chambre de chauffage s'humidifie en déshydratant les produits. La température de surface des produits étant égale à celle de bulbe humide de l'air, alors il n'y a pas d'échange formel d'énergie entre les produits et l'air, mais un échange de matière (la vapeur d'eau). L'échange d'énergie s'effectue entre l'air sec et l'eau extraite des produits. Cette transformation supposée adiabatique s'effectue à enthalpie de l'air constante. La vitesse d'évaporation telle que considérée précédemment nous permet de calculer l'humidité absolue d'air. En considérant la conservation de l'enthalpie entre l'état initial et l'état final, on calcule la température de l'air et la vitesse de séchage ( $\Delta\dot{m}_v$ ).

$$\Delta\dot{m}_v = (X_2 - X_s) * \dot{m}_{as}$$

Alors l'humidité absolue est donné par la relation suivante :

$$m_{air} = m_v + m_{as} = (1 + X_a) m_{as} \quad \text{soit} \quad \dot{m}_{as} = \frac{\dot{m}_{air}}{1 + X_a} \quad (1.10)$$

Avec la composition de l'air nous avons :

$$X_2 = \frac{(1 + X_s)}{\dot{m}_{air}} * \Delta\dot{m}_v + X_a \quad (1.11)$$

Le caractère isenthalpique de la transformation nous permet d'écrire :

$$h(T_s) = h(T_2) \quad \Rightarrow \quad T_2 = \frac{(h(T_s) - L_v(T_2) * X_2)}{(c_{pas} + c_{pv} * X_2)} \quad (1.12)$$

Avec le calcul de la pression de saturation, l'air sera entièrement calculé. Les paramètres de l'air à l'état 2 sont calculés et consignés dans le tableau 5 annexe III.

- L'état 2' sur le graphe correspond à l'état saturé de l'air. Ce cas de figure correspond au fonctionnement théorique ou idéal du séchoir. Dans le cas idéal, l'air dans la cheminée après passage sur les produits est dans un état saturé. La transformation ( S→2') étant toujours isenthalpique avec rien que des échanges de matières, alors l'état sauté (2') est calculé presque de la même façon que l'état (2) en calculant tout d'abord l'humidité absolue à l'aide de la température de bulbes humide d'air. La seule différence c'est la vitesse de séchage, mais une vitesse théorique qui représente la limite supérieure de la vitesse d'évaporation du séchoir ATESTA. Les paramètres de l'air dans cet état saturé sont calculés et consignés dans le **tableau 6 de l'annexe III (74)**. Dans ce tableau, on peut constater les valeurs de la vitesse de séchage pour chaque phase qui sont pratiquement le double de la vitesse « réelle » calculée précédemment.

## 2.2. Le rendement énergétique du séchoir ATESTA « classique »

### 1. Calcul de l'énergie utile du séchoir

L'énergie utile du séchoir est la quantité d'énergie nécessaire pour l'évaporation de la quantité d'eau suffisante pour ramener la teneur en eau du produit à la valeur requise. Dans le cas présent du séchage de mangue, cette énergie est la somme deux énergies à savoir : l'énergie nécessaire pour porter l'eau à extraire à la température d'évaporation  $T_h$  (température de bulbe humide de l'air) et l'énergie de changement d'état de l'eau extraite. Alors pour chaque phase du séchage nous avons :

$$Q_i = m_{ex} * C_{pe} (T_h - T_a) + m_{ex} L_v (T_h) \quad (1.13)$$

$m_{ex}$  est la masse d'eau extraite,  $C_{pe}$  la capacité calorifique ou chaleur massique de l'eau,  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

#### 2.2.1. Evaluation de la consommation réelle du séchoir

Connaissant la consommation du combustible (Gaz) sur un cycle de séchage (**Rivier et al., 2009**), et son pouvoir calorifique inférieure (PCI) on calcul l'énergie totale consommée par le système sur un cycle.

$$Q = m_{gaz} * PCI \quad (1.14)$$

$m_{gaz}$  la masse totale de gaz consommée qui vaut 14 kg/cycle et PCI le pouvoir calorifique du Gaz butane qui vaut 46 000 kJ/kg

### 2.2.2. Calcul du rendement Thermique du système

Le rendement énergétique du séchoir est la fraction d'énergie totale réellement utilisée pour la vaporisation de l'eau des produits.

$$\eta_{th} = \frac{\sum Q_i}{Q} * 100 \quad (1.15)$$

### 2.3. Identification et quantification des différentes pertes thermiques du séchoir ATESTA

D'après le système de fonctionnement du séchoir, nous avons des pertes thermiques non valorisables que l'on peut qualifier de naturelles et les pertes thermiques valorisables qui sont en générales dues à la conception du système et à des limites du process.

#### 2.3.1. Les pertes thermiques par la cheminée

Expérimentalement, l'air du séchage après passage sur les produits sort par la cheminée dans un état hygrométrique très différent de l'état saturé (point 2 figure 3 (10)). Pour un fonctionnement idéal, l'air sortirait de la cheminée dans un état de saturation (point 2' figure 3 (10)). L'écart entre ses deux états de l'air correspond à des pertes thermiques. En effet, un air chaud et humide sortant de la cheminée à une humidité absolue inférieure au point de saturation montre que le séchoir n'est pas capable d'utiliser tout le pouvoir séchant de l'air sec et chaud. Globalement, ces pertes sont égales à la somme de deux chaleurs :

- La chaleur liée aux défauts de masses d'eau extraite due à l'écart entre l'état d'hygrométrique de l'air dans la cheminée en conditions réelles d'exploitation et le cas idéal.
- La chaleur sensible liée à l'écart de température entre l'état de saturation de l'air de la cheminée et l'air ambiant admis dans le séchoir.

Le défaut de masse d'eau évaporée entre le point de saturation et celui de l'air dans la cheminée fonctionnement réel est donné par :

$$\Delta m_{vp} = (X_{sat} - X_2) * m_{as} \quad (1.16)$$

En considérant l'air composé uniquement de vapeur d'eau et d'air sec, à l'entrée de la chambre de chauffage, nous avons :

$$m_{air} = m_{va} + m_{as} = (1 + X_a) m_{as} \quad \text{soit} \quad m_{as} = \frac{m_{air}}{1 + X_a} \quad (1.17)$$

Avec  $X_a$  l'humidité absolue de l'air ambiant

Avec cette considération nous exprimons la quantité d'eau nécessaire pour le refroidissement de l'air chaud et sec en fonction du débit d'air à l'entrée du séchoir.

$$\Delta \dot{m}_{vp} = \frac{(X_{sat} - X_2)}{1 + X_a} * \dot{m}_{air} \quad \text{avec } X_{sat} = X_2, \quad (1.18)$$

$X_{sat}$  est l'humidité de l'air dans la cheminée à l'état de saturation.

En fin la chaleur perdue par ce défaut de masse d'eau est quantifiable par l'expression suivante pour chaque phase du cycle.

$$Q_{pc1i} = \frac{\Delta m_{vpi} * L_{vi}(T_{hi})}{3600} \quad \text{en } (kwh) \quad (1.19)$$

La connaissance du débit d'air à l'admission permettra une quantification totale de ces pertes sur la durée totale de chacune des phases du processus de séchage et sur un cycle complet.

Les pertes dues à l'écart de température entre l'état de l'air saturé et l'admission sont données pour chaque phase du cycle par :

$$Q_{pc2i} = \frac{1}{3600 * (1 + X_a)} * m_{airi} [X_{sati} c_{pe} + c_{pas}] (T_{hi} - T_a) \quad \text{en } (kwh) \quad (1.20)$$

En fin les pertes thermiques totales  $Q_{pc}$  du séchoir par la cheminée est la somme des deux pertes thermiques.

$$Q_{pc} = Q_{pc1} + Q_{pc2} \quad (1.21)$$

### 2.3.2. Les pertes dues à la manutention au cours du séchage

Ces pertes sont particulièrement dues à l'ouverture des portières du séchoir pour les actions de permutations des claies pendant son fonctionnement. La technologie de construction du séchoir ATESTA « classique », est à l'origine de ses pertes par l'ouverture des portières. Ces pertes sont fonction de la durée pendant laquelle ses portières restent ouvertes pour la permutation des 20 claies que compte le séchoir au cours d'un cycle de séchage complet. La chambre de chauffage de l'air est directement ouverte sur les deux portières du séchoir qui permettent d'orienter le courant d'air chaud sur les claies. Avec cette configuration, nous supposons par l'ouverture de ses portières, les pertes d'énergie équivalentes à 30% de la chaleur dégagée par la combustion du gaz (30% de l'air de séchage passent au travers la portière ouverte) sur tout le temps qu'elles restent ouvertes. Pour un débit de gaz de combustion donnée, ces pertes  $Q_{pp}$  sont quantifiables par la relation suivante :

$$Q_{pp} = \frac{0,3 * t_p * \dot{m}_{gaz} * PCI}{3600} \quad \text{en } kwh \quad (1.22)$$

Avec  $t_p$ , la durée totale en heure pour la permutation des claies au cours d'un cycle de séchage, PCI le pouvoir calorifique inférieur du gaz butane.

#### **Hypothèses de calcul :**

- Durée de la permutation de 10 claies pour un compartiment du box fixé à 02 minutes
- Pendant l'opération de permutation, 30% de l'énergie produit par le brûleur est perdue
- Un seul compartiment du box est ouvert à la fois pendant l'opération de permutation
- Une opération de permutation par cellule de séchage toutes les deux heures de fonctionnement du système

#### **2.3.3. Les pertes dues au brûleur à gaz**

Pour le cas spécifique du séchoir ATESTA classique, le brûleur indiqué dans le guide d'utilisateur du séchoir ne précise aucune information sur le rendement de conversion. Pendant la production, la quantité d'air admise dans le séchoir est suffisante pour qu'à chaque instant, la combustion du gaz soit complète c'est-à-dire un taux de conversion énergétique de 100% pour le brûleur. Pour le séchoir ATESTA, nous considérons nulles les pertes d'énergie au niveau du brûleur. Dans le cas contraire d'un utilisateur qui fais le choix d'un brûleur de nature et/ou en puissance différente (plus grande), que de celui indiqué dans le guide d'utilisation, il peut avoir des situations de combustion incomplète pas manque d'air ainsi que le noircissement des produits séchés par dépôt de carbone solide dû à l'oxydation incomplète du gaz.

#### **2.3.4. Les pertes dues à l'étanchéité des joints du séchoir**

Ces pertes sont difficiles à quantifier. Leurs quantifications demandent plusieurs essais expérimentaux du séchoir. Toute fois elles sont évitables lors de la construction du séchoir si le technicien met l'accent sur l'étanchéité au niveau des joints.

#### **2.3.5. Les pertes thermiques par les parois du séchoir**

Ces pertes sont assez faibles pour ce séchoir. La composition des parois (deux feuilles de contreplaqués de 10mm d'épaisseur, une lame d'air de 70mm d'épaisseur) permet d'avoir un coefficient global de transfert de chaleur à travers la paroi très faible. Ce qui limite considérablement le transfert de la chaleur vers l'extérieur ainsi que le rayonnement thermique des parois. Mais toute fois, ayant quantifier les pertes par la cheminée, la

manutention et sur le bruleur, alors on peut estimer ses pertes égales à la différence entre les pertes thermiques totales à la somme de toutes les pertes quantifiées.

$$Q_{po} = Q - (Q_{pc} + Q_{pp}) \quad (1.23)$$

### 3. Potentiel solaire valorisable de la zone de production (Bobo Dioulasso)

La période de concentration des récoltes de mangues s'étend en moyenne sur trois mois (Mai – Juin – Juillet). Cette période coïncide avec le début de la saison humide dans la région de Bobo Dioulasso, région de fortes concentrations des vergers. L'analyse des relevés météo de la région pour la période de correspondance rapporte un potentiel solaire important. Une irradiation globale moyenne journalière de l'ordre de 5kWh/m<sup>2</sup>. Dans le but de proposer un meilleur scénario pour la valorisation de ce potentiel solaire avec le séchage des mangues, nous allons mener une étude plus détaillée des données solaires de cette région à forte densité des sèchereries.

#### 3.1. Etude du potentiel solaire de la zone d'étude

Les relevés météo utilisés pour ce travail sont ceux de Meteonorm (Meteonorm, 2017) de la station de Bobo Dioulasso. Méteonorme fournit les données de l'ensoleillement en particulier l'irradiation globale suivant l'inclinaison précisée. Les coordonnées géographiques avec lesquelles les relevés de Méteonorme ont été obtenus sont celles de la région de Bobo Dioulasso. Ceci afin d'avoir les relevés plus représentatifs de la réalité de la région d'étude. Dans l'optique d'une meilleure analyse de ses données par rapport à notre objectif, nous les avons traités sur plusieurs plans. Nous avons :

- Fait une conversion des relevés d'irradiation en kilowatt heure par mètre carré,
- Analysé ces données sur une journée entière, ceci pour chaque jour de la période de production choisie.
- Nous avons également calculé une journée moyenne permettant une représentation des relevés moyens de toute la période.

Toutes ses représentations nous permettent de mieux appréhender les fluctuations horaires, journalières ou mensuelles de la météo de la région. Les résultats et analyses du traitement de ces données sont présentés au chapitre suivant.

### 3.2. Calcul du profil de charge du système de séchage

Le profil de charge du séchoir est établi suivant les données de la consommation en gaz combustible du séchoir sur un cycle. Pour le calcul de ce profil de charge, les hypothèses suivantes ont été considérées :

- Sur chaque phase du cycle, le débit de gaz et le débit d'air admis sont constants.
- La première phase du séchage qui correspond à l'extraction de l'eau libre des produits, est considérée comme celle avec le besoin énergétique le plus important du cycle.
- De l'analyse des performances énergétiques faite précédemment (page 24), le besoin en énergie de la deuxième phase du cycle correspond aux tiers de la consommation totale du séchoir. Bien que le pourcentage en eau libre des mangues fraîches ne soit pas dans les mêmes proportions.

Avec ces hypothèses, nous calculons le besoin énergétique du système pour chaque heure de fonctionnement sur tout le cycle qui a une durée totale de 20 heures (Coulibaly et al., 2005).

Le Débit massique du gaz et le débit volumique de l'air pour chaque phase sont calculés comme suit.

$$\dot{m}_{\text{gaz1}} = \frac{2}{3 * t_1} m_{\text{cycle}} \quad \text{et} \quad \dot{m}_{\text{gaz2}} = \frac{1}{3 * t_2} m_{\text{cycle}} \quad (1.24)$$

$\dot{m}_{\text{gaz1}}$  et  $\dot{m}_{\text{gaz2}}$  représente le débit massique du gaz respectivement de la phase 1 et la phase 2

Pour chaque phase, le besoin énergétique en d'autres termes est l'énergie nécessaire pour chauffer l'air ambiant admis jusqu'à la température de séchage 80°C pour la première phase et 50°C pour la seconde. De cette façon, la consommation de l'énergie de chaque phase peut s'exprimer en fonction de l'enthalpie de l'air à des températures ambiante et de chauffage ( $T_{si}$ ,  $T_a$ ) et l'humidité absolue de l'air par l'expression :

$$Q_{\text{phasei}} = \frac{m_{\text{air}}}{(1 + X_a)} [h(T_{si}, X_a) - h(T_a, X_a)] \quad (1.25)$$

La masse totale de l'air par phase est calculée par :

$$m_{\text{air}} = \frac{Q_{\text{phasei}} (1 + X_a)}{h(T_{\text{si}}, X_a) - h(T_a, X_a)} \quad (1.26)$$

Le débit massique et volumique d'air par :

$$\dot{m}_{\text{air}} = \frac{1}{t_i} m_{\text{air}} \quad \text{et} \quad \dot{V}_{\text{air}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} \quad (1.27)$$

$\rho_{\text{air}}$  est la masse volumique de l'air ambiant.

### 3.3. Calcul du profil de production solaire journalière des capteurs

Les coordonnées géographiques de Bobo Dioulasso 11°10'37N Latitude Nord et 2°20'W Longitude Ouest. Avec ses coordonnées, l'inclinaison optimal des capteurs solaires ( $\alpha_{\text{op}}$ ) orientation plein Sud est donnée par :

$$\alpha_{\text{op}} = \delta - L \quad (1.28)$$

Avec  $\delta$  et  $L$  respectivement la déclinaison solaire et la latitude de la région de Bobo Dioulasso. La déclinaison est donnée par la relation suivante :

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(\frac{2\pi}{365}(284 + j)\right) \quad (1.29)$$

Avec  $j$  le numéro d'ordre du jour de l'année ( $1 \leq j \leq 365$ )

Le résultat de calcul de la déclinaison solaire moyenne et l'angle d'inclinaison optimal pour chaque mois de la campagne de récoltes des mangues ont donné :

**Tableau 2** Inclinaison optimal des capteurs solaires

	Mai	Juin	Juillet
Déclinaison (°)	18.4	23.0	21.4
Inclinaison(°)	7.4	12.0	10.4

Le mois de juillet étant le plus défavorable des trois mois (ensoleillement faible Fig.9) l'inclinaison optimal retenu est celui de ce mois. Pour les raisons de dépoussiérage et l'évacuation des retenues d'eau, l'inclinaison finale utilisée pour les calculs dans la suite de ce rapport est :

$$\alpha = \alpha_{\text{op}} + 3^\circ = 14^\circ \quad (1.30)$$

En notant  $\eta_c$  le rendement du capteur solaire (considéré constante égale à une valeur moyenne) et  $I_g$  l'irradiation solaire global, alors l'énergie par unité de surface transmise à l'air par le capteur est donnée par :

$$Q_c = \eta_c \cdot I_g \cos \alpha \quad \text{en kWh/m}^2 \quad (1.31)$$

L'énergie totale fournie chaque heure de la journée ainsi que la surface totale des capteurs (orienté suivant la latitude du lieu 10°N) sont connues une fois que le nombre N des capteurs est fixé.

$$S_T = N \cdot S_{cap} \quad \text{et} \quad Q_{Tcap} = S_T \cdot Q_c \quad (1.32)$$

Avec  $S_T$ ,  $Q_{Tcap}$  et  $N_c$  respectivement la surface totale, l'énergie totale fournir par les capteurs à l'air et le nombre total des capteurs à installer.

Pour nos calculs solaires nous avons considéré le rendement des capteurs solaires à air égale 70%. A partir des données de la station météo, nous calculons le profil de production horaire journalière des capteurs installés.

### 3.4. Calcul de l'énergie solaire valorisée

Le profil de charge du séchoir connu, le calcul de la l'énergie solaire valorisée s'effectue en comparant ce profil au profil de production journalière des capteurs solaires. Nous avons judicieusement choisi le début du cycle de séchage en fonction du profil de production des capteurs. Ceci dans l'optique de faire correspondre les périodes de fortes demandes en énergie du séchoir avec celle de la production maximale des capteurs. En comparant ses profils, nous calculons l'énergie solaire valorisée.

- Le rendement et le nombre de capteurs solaires à installer sont fixés ;
- Les profils horaires de production solaire des capteurs sur toute la période de production sont calculés.
- On compare ces profils de production au profil de charge du séchoir et l'énergie solaire valorisable par heure est évaluée.

$$E_{val}/h = \begin{cases} Q_{besoin} & \text{si } Q_{cap} \succ Q_{besoin} \\ Q_{cap} & \text{si } Q_{cap} \prec Q_{besoin} \end{cases} \quad (1.33)$$

$Q_{cap}$  est la production horaire des capteurs et  $Q_{besoin}$  le besoin énergétique horaire du séchoir. Sur tout le cycle, on somme l'ensemble les quantités d'énergie valorisée ( $E_{val}$ ) sur toute la durée du cycle de séchage heure par heure.

$$E_{val} = \sum_1^{20} Q_{val}/h \quad (1.34)$$

Après le calcul de l'énergie valorisée suivant chaque profil de production solaire, nous calculons le taux de couverture solaire du séchoir sur une campagne en fonction de l'énergie solaire totale valorisée et le besoin énergétique total du séchoir sur une campagne de production.

$$\tau_{couv} = \frac{\sum_{cycle} Q_{val}^k}{N_{cycle} \cdot Q_{gaz}} \quad (1.35)$$

En fonction du nombre de capteurs, les résultats de ces calculs sont présentés et discutés dans le prochain chapitre.

## 4. Mesures d'optimisation

Après l'analyse des performances énergétiques du séchoir, nous nous intéressons aux moyens de les améliorer ainsi que la qualité des fruits séchés du séchoir ATESTA classique.

### 4.1. Mesures d'optimisation des pertes thermiques du séchoir ATESTA classique

Optimiser les pertes thermiques c'est trouver les moyens permettant de les limiter ou les récupérer et les valoriser. Dans le cas du séchage, les pertes thermiques par la cheminée sont inévitables et elles sont également les plus importantes. Nous développons les moyens de valoriser ses pertes en particulier celles par la cheminée et celles liées à la maintenance du système.

#### 4.1.1. Les pertes thermiques par la cheminée

Les pertes thermiques par la cheminée du séchoir sont les plus importantes de toutes les autres pertes. Elles représentent 92% des pertes totales du séchoir et 61.8% de l'énergie totale consommée par le séchoir. Soit deux fois la valeur de l'énergie utile pour le système. Pour l'optimisation de ses pertes, deux moyens sont possibles :

- La recirculation de l'air dans le séchoir
- L'utilisation d'un échangeur thermique air-air avec construction d'un réseau d'air extérieur au séchoir.

#### 4.1.2. La recirculation de l'air dans le séchoir

Cette technique présente plusieurs avantages sur le fonctionnement et l'efficacité du système de séchage.

➤ L'amélioration de la qualité des produits séchés. La recirculation de l'air dans le séchoir permet de maintenir à une valeur désirée et d'avoir un contrôle sur l'humidité relative de l'air dans le séchoir. Ceci évite le phénomène de croûtage à la surface des produits à sécher.

➤ L'amélioration de la consommation énergétique du séchoir par la diminution de pertes thermiques par la cheminée. Avec la recirculation, l'air dans la cheminée est moins chaud et plus chargé en vapeur d'eau. Cependant, cette méthode ne permet pas une récupération maximale des pertes par la cheminée. L'état final de l'air dans la cheminée restera assez éloigné de l'état ambiant. Le principe de la recirculation d'air est le suivant :

Dans le casque du séchoir après les produits, l'air de séchage n'est pas renvoyé à 100% dans la cheminée. Un taux de recirculation d'air est fixé en fonction du degré d'humidité. L'air recyclé est redirigé à l'entrée de la chambre de combustion où il complète la quantité d'air ambiant admise. Le mélange est chauffé jusqu'à la température requise. Le chauffage de ce mélange d'air recyclé et l'air ambiant admis prendra moins d'énergie par rapport à un courant d'air ambiant simple donc la teneur en vapeur d'eau sera plus élevée.

Les calculs faits ont montré les difficultés suivantes pour la mise en œuvre de cette mesure dans le cas du séchoir ATESTA.

- Le contrôle du taux de recirculation de l'air dans la cheminée.
- La surconsommation d'énergie si l'air recyclé est plus chargé en vapeur d'eau que l'air atmosphérique.
- La difficulté liée au contrôle de l'humidité relative de l'air dans la cheminée du séchoir
- La maîtrise des durées exactes de chaque phase du séchage.
- Les limites de valorisations des pertes thermiques du séchoir

#### **4.1.3. L'usage d'un échangeur Air –Air**

L'usage d'un échangeur de chaleur est la technique adoptée dans le cadre de ce travail. Cette technique permet une meilleure valorisation des pertes thermiques par la cheminée. L'usage d'un échangeur de meilleure efficacité peut permettre une récupération de la chaleur jusqu'à l'état de condensation de l'air vicié avant son rejet du système. Cet usage nécessite la construction d'un circuit d'air fermé sur l'échangeur dans lequel il aura deux rôles essentiels. Le renouvellement d'air du circuit et la récupération de chaleur de l'air « vicié » renouvelé. Pour cette technique de valorisation, le contrôle de l'humidité de l'air est capital. Ceci permet

de déterminer la nécessité et le taux de renouvellement dans le système (séchoir). La mise en œuvre de cette mesure d'optimisation a nécessité la réalisation d'un certain nombre d'actions :

- Le dimensionnement de l'échangeur
- Le choix des gaines et le dimensionnement du circuit d'air
- Une modification partielle du séchoir ATESTA classique
- L'acquisition d'un certain nombre d'instrumentations pour la régulation et le suivi du séchage
- L'acquisition d'un générateur d'air chaud équipé d'un ventilateur, d'un brûleur

Compte tenu du délai des travaux, nous avons acquis un échangeur préfabriqué de type Recair RS160 ceci en fonction des résultats de l'étude des performances du séchoir faites précédemment. C'est un échangeur à plaques à flux croisés très compact avec les plaques fabriquées en polystyrène d'une grande efficacité thermique (jusqu'à 90% en fonction du débit de fluide) selon les caractéristiques fournies par le constructeur (**échangeur Recair annexe II**). Une description complète de cet échangeur fera l'Objet du prochain chapitre de ce mémoire. Pour des raisons de transferts de technologies, la valorisation de l'expertise locale et le coût d'acquisition de l'échangeur préfabriqué, parallèlement nous avons dimensionné un échangeur équivalent fabricable localement avec les mêmes performances énergétiques.

## IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 1. Performance énergétique actuelle du séchoir ATESTA classique

Dans cette partie, nous exposons et discutons les résultats de l'étude des performances énergétiques du séchoir fait précédemment.

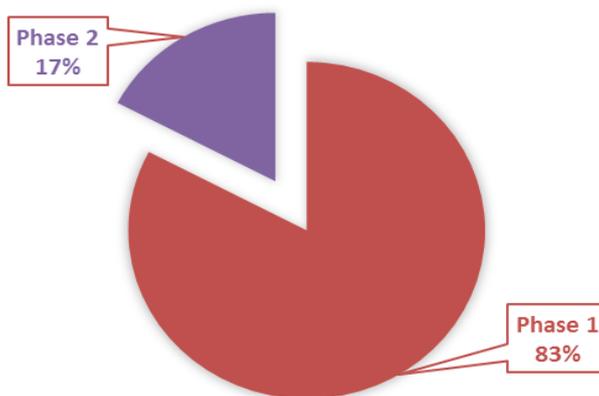
#### 1.1. Le rendement énergétique du séchoir ATESTA « classique »

Pour une capacité de 100kg de pulpes de mangues, les calculs de l'énergie utile par phase, de la consommation énergétique totale pour un cycle et le rendement énergétique du séchoir sont regroupés dans le tableau suivant.

**Tableau 3** Répartition consommation et énergétiques utiles sur un cycle

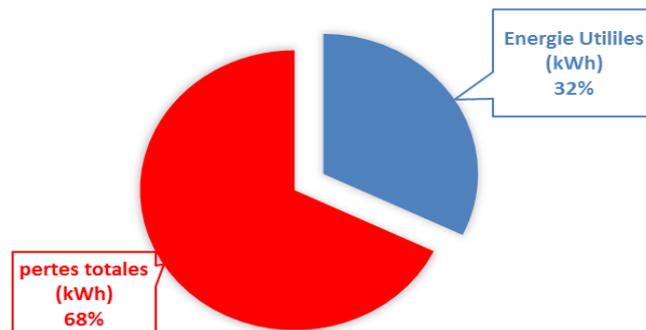
	Energie Utiles (kWh)	Consommation réelle pour un cycle (kWh)	Rendement énergétique
Phase 1	47.60	119.26	32.17%
Phase 2	9.95	59.63	
Energie Totale en (kWh)	57.55	178.89	
perdes totales (kWh)	<b>121.34</b>		

#### Observations :



**Fig. 5** Energie utile par phase

L'énergie utile du système est calculée à partir de la quantité d'eau à extraire pour chaque phase du séchage. 83% de l'énergie utile du séchoir sera consommées pour l'extraction de l'eau libre pendant la première. Cette énergie utile n'étant pas directement liée à la température du séchage, cette énergie restera constante égale à la valeur calculée, quel que soit la montée en température du séchoir.



**Fig. 6** répartition consommation énergétique d'un cycle

La figure (Fig.6) montre les parts d'énergies utiles et les pertes thermiques par rapport à la consommation énergétique totale dans les conditions de fonctionnement réelles du séchoir ATESTA « classique ». Comme on pouvait prévoir, les pertes thermiques sont bien plus importantes que la fraction d'énergie totale réellement utilisée ou absorbée par l'eau extraite des produits séchés. Ainsi, nous pouvons admettre que le rendement énergétique du séchoir est mauvais. Car juste 32% de l'énergie totale produite par la combustion du gaz sont valorisées. Ce résultat interpelle à une réflexion sur les méthodes de valorisation de ses pertes thermiques afin d'améliorer les performances énergétiques du séchoir.

## 1.2. Calculs des pertes thermiques du séchoir

Dans la section précédente, nous avons fait l'inventaire de toutes les pertes thermiques significatives du séchoir et les méthodes permettant leurs quantifications. Ci-dessous nous exposons les résultats de calculs de ces pertes ainsi que les analyses faites au vu de ces résultats.

**Tableau 4** répartitions des pertes énergétiques sur un cycle

	défaut de masse d'eau évaporée ( kWh)	écart de température (kWh)	manutention (kWh)	parois (kWh)
Phase 1	60.871	1.637	5.963	1.91
Phase 2	47.694	0.284	2.981	
Pertes totales (kWh)	108.565	1.921	8.944	
Pertes Totales (%)	89.47%	1.58%	7.37%	1.57%

Les pertes par la cheminée représentent la plus importante de toutes. Elles sont liées à l'état de l'air de séchage qui sort du séchoir. Plus l'air dans la cheminée est humide, moins

ces pertes seront importantes. Le rendement énergétique du séchoir sur la deuxième phase étant de l'ordre de 16%, montre bien l'importance des pertes par rapport à la première phase. Ceci s'explique par la difficulté liée à l'extraction de l'eau liée des produits. Les pertes par les parois du séchoir sont bien en accord avec les hypothèses de calcul. Ces pertes et celles dues aux écarts de températures sont négligeables par rapport à celles par la cheminée. Par contre, les pertes dues à la manutention du séchoir sont les plus importantes après celles de la cheminée. Elles seront complètement évitées si l'on s'affranchit de la permutation des claies.

### 1.3. Récapitulatif et répartition de consommation énergétique par phase

Après l'étude des performances énergétiques du séchoir ATESTA, nous avons la répartition de la consommation énergétique totale suivante sur chaque phase du cycle.

**Tableau 5** répartition par phase de la consommation énergétique sur un cycle

	Phase 1	Phase 2	Cycle
Energie Utile (kWh)	47.603	9.950	57.553
Pertes totales (kWh)	68.471	50.959	119.430
Energie Totale (kWh)	116.07	60.91	178.89
Répartition Energie totale sur un cycle	65.95%	34.05%	100.00%

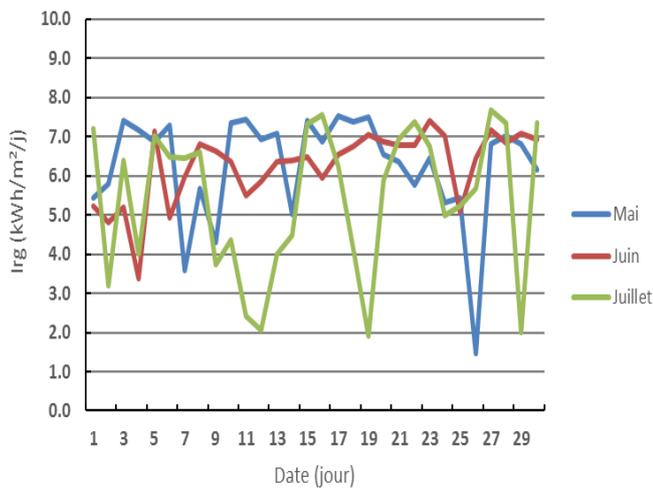
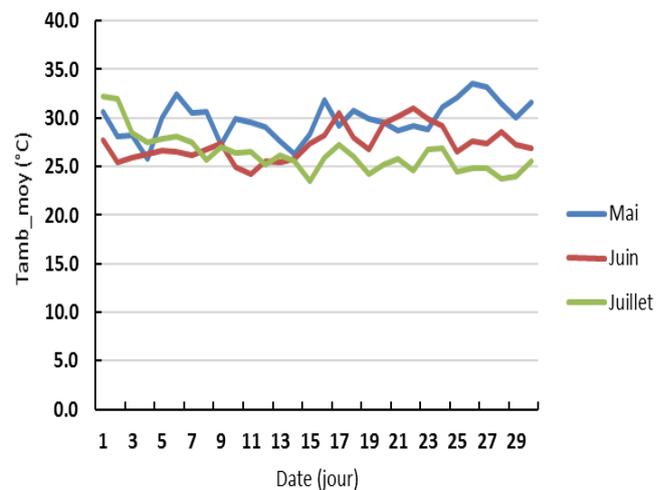
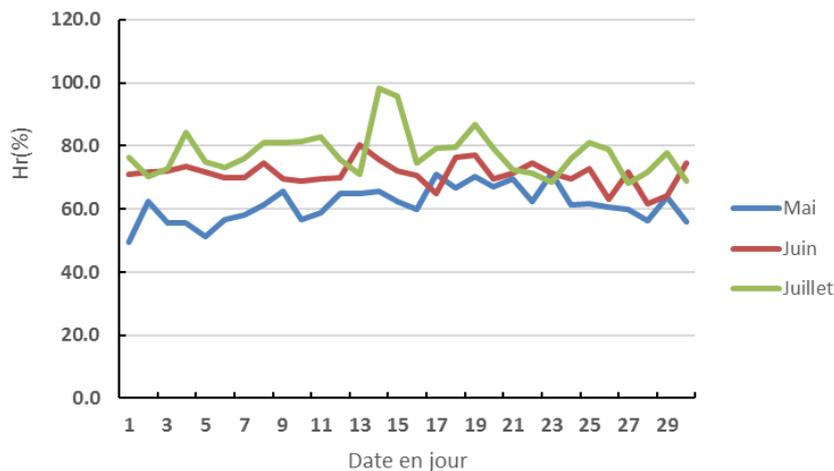
Ses sont biens en accords avec les hypothèses de calculs faites aux chapitre précédent. La consommation énergétique totale sur un cycle est telle que nous avons deux tiers pour la première phase (extraction de l'eau libres) et un tiers pour la deuxième phase (extraction de l'eau liée). Les pertes thermiques sont les causes principales de cette répartition. Bien que l'énergie utile soit assez faible pour la deuxième, les pertes thermiques pendant cette phase rapportée à l'énergie utile sont plus importantes par rapport à la première phase.

## 2. Potentiel solaire valorisable de la zone de production (Bobo Dioulasso)

Dans cette section, nous présentons le potentiel solaire de la région de concentration des vergers de mangues au Burkina Faso : la région de Bobo Dioulasso.

### 2.1. Etude du potentiel solaire de la zone d'étude

L'irradiation solaire dans un lieu est l'énergie solaire totale reçue par une unité de surface horizontale et par unité de temps. L'irradiation globale est composée de l'irradiation diffuse et directe.

**Fig. 7** Irradiation globale journalière (kWh/m<sup>2</sup>/j)**Fig. 8** Température moyenne journalière (°C)**Fig. 9** Humidité relative moyenne journalière

Ces courbes montrent de fortes fluctuations des relevés météo de la région. Le mois de juillet présente les plus grandes fluctuations en particulier l'irradiation solaire. Les relevés de ce mois montrent un mois très nuageux et très humide avec de faibles températures. Le mois de mai qui est du point de vue de la météo, le dernier mois de la saison sèche, est marqué par de forts ensoleillements ainsi que la température et des valeurs plus faibles de l'hygrométrie. Le mois de juin est le mois avec les relevés les plus moyens de la période de récoltes des mangues. Le calcul de l'écart-type de cette série de données pour l'irradiation montre une dispersion moins étendue des données autour de la moyenne. Mais énergétiquement parlant, l'écart moyen qui est de l'ordre de 1.5kWh/m<sup>2</sup>/j est assez considérable. À cet effet, une représentation globale moyenne journalière, ou mensuelle de ses données pour des fins de

calcul et de dimensionnement des systèmes énergétiques ne sera pas appropriée. Du point de vue hygrométrie, la moyenne est proche de la teneur en eau ou l'activité de l'eau des fruits de mangues par conséquent une simple ventilation de l'air ambiante sur les produits ne pourra pas permettre d'avoir les produits secs suivant les exigences du marché.

## 2.2. Profil de charge du système de séchage

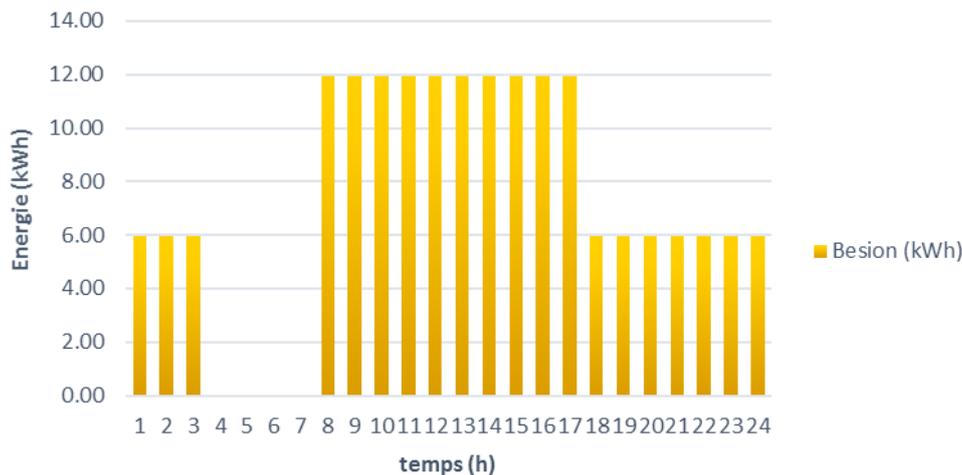
Dans le tableau ci-dessous la répartition des besoins énergétiques et la quantité d'air nécessaire pour le séchage par phase sur un cycle complet.

**Tableau 6** débits massiques et volumiques du gaz et de l'air

	Durée (h)	Besoins énergétiques (kWh)	Gaz Butane		Air atmosphérique		
			Masse de gaz (kg)	Débit massique (kg/h)	Masse d'air (kg)	Débit massique d'air (kg/h)	Débit massique d'air (m <sup>3</sup> /h)
Cycle complet	20	178,89	14,00	-			
Phase 1	10	119,26	9,33	0,93	8101,44	810,14	657,05
Phase 2	10	59,63	4,67	0,47	9532,16	953,22	773,09

**Remarque** : les débits calculés sont des débits totaux des deux brûleurs que comporte le séchoir ATESTA classique (la méthode de calculs sont exposées au chapitre précédent (31))

Le profil de charge obtenu avec ses calculs est le suivant :



**Fig. 10** Profil de charge du séchoir sur un cycle

Nous avons supposé le début du cycle à 8 heure afin qu'une grande partie du cycle se déroule en journée avec la disponibilité de la ressource solaire.

### 2.3. Calcul du profil de production solaire journalière

Ci-dessous un exemple de profil de production solaire de 07 capteurs solaire à air pour la journée du 02/05/2016

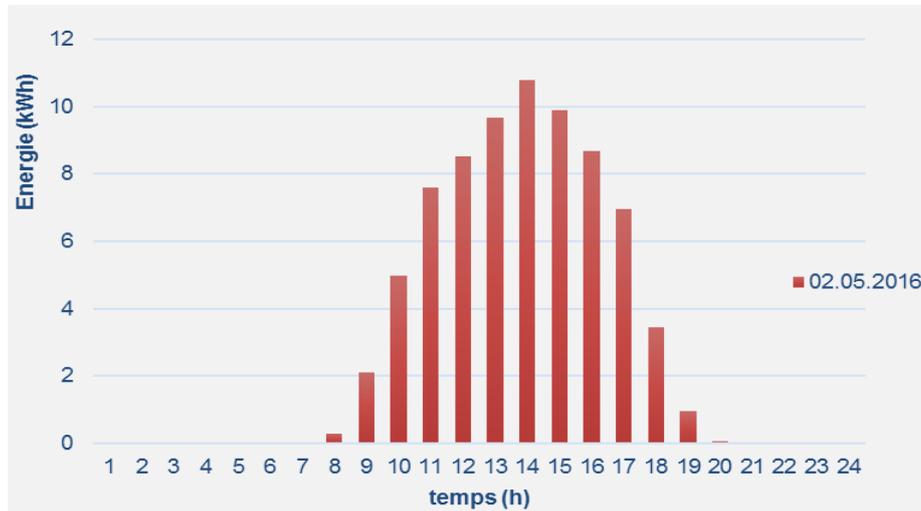


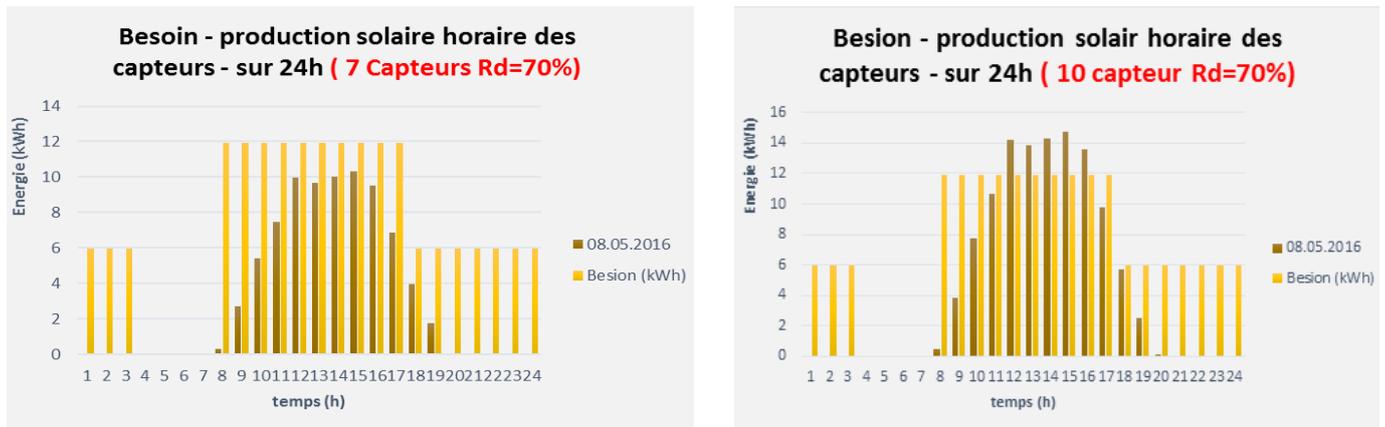
Fig. 11 un Profil de production horaire des capteurs solaires

Sur le graphique, on constate une production solaire significative entre 9 heures du matin et 18 heures soit une durée d'ensoleillement de 10h par jour avec un pic de production à 14 heures. En fonction du nombre de capteurs solaires installés, ce profil présentera les pics et les minimas plus ou moins importants. Tous profils de production sur toute la période de production sont tous à l'image de ce profil avec des pics et les minimas aux mêmes heures de la journée. D'après ce profil, pour une meilleure valorisation de cette production à travers un processus de production, alors on doit faire coïncider le pic de la demande du système avec le pic du profil de production des capteurs solaires.

### 2.4. Calcul énergie solaire valorisée

#### 2.4.1. Potentiel énergie solaire valorisable sur une campagne de séchage

Avec la méthode de calcul exposée dans la section précédente, les résultats des calculs du potentiel énergétique solaire valorisé et le taux de couverture solaire sont présentés dans le **tableau 8 de l'annexe III** du document. Ci-dessous les différents cas de figure que nous avons obtenus en comparant les deux profils énergétiques production capteur – profil de charge du séchoir.



Cas 1

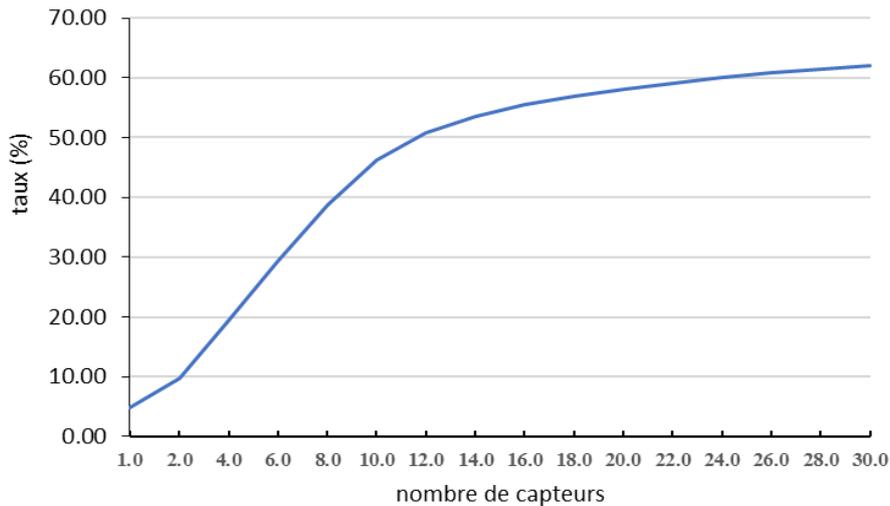
Cas 2

**Fig. 12** calcul énergie solaire valorisée : cas 1) 7 capteurs solaires cas 2) 10 capteurs solaire

Ces deux cas de figure résumant les situations que l'on rencontre avec la comparaison des deux profils énergétiques capteur – séchoir. Le cas 1 montre une valorisation totale de la production des capteurs. Par contre sur le cas 2 une partie de la production solaire n'est pas valorisée. Dans l'intervalle horaire 11 - 15 heure, la production solaire est nettement supérieure au besoin du séchoir. Dans ce cas de figure, un dispositif de régulation est nécessaire pour ne pas dépasser les températures limites admises pour le séchage. Ces courbes nous permettent d'affirmer qu'avec ce séchoir, on ne pourra jamais avoir un taux de couverture solaire de 100%. Ceci à cause de la configuration actuelle du profil de charge du séchoir (durée de cycle très long).

#### 2.4.2. Calcul du taux de couverture solaire

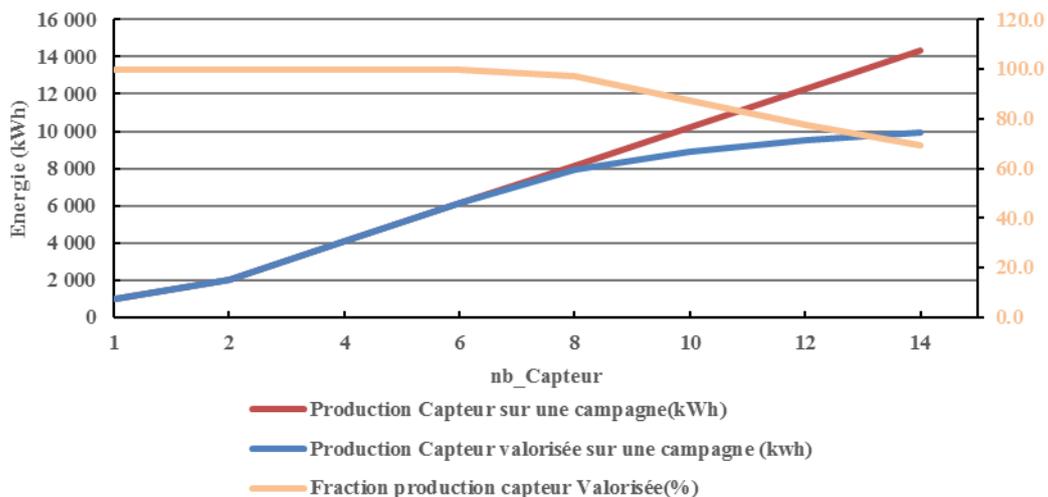
Ci-dessous la courbe traduisant les résultats de calculs du taux de couverture solaire du système en fonction du nombre de capteurs installés.



**Fig. 13** Taux de couverture solaire

Ces résultats montrent la limite du taux de couverture solaire par rapport aux besoins énergétiques du séchoir. Alors le maximum se situe autour de 63%. Cette limite est en accord avec la comparaison des profils de charge et de production solaire du système. Au-delà d'un certain nombre de capteurs, le système deviendra moins rentable sur l'ensemble. Car la capacité du séchoir à absorber l'énergie solaire produite est limitée du fait de la durée d'un cycle de séchage et la capacité de production du séchoir qui est limitée également.

Nous avons également analysé la fraction de production des capteurs valorisée sur une campagne ce qui permet d'estimer le nombre de capteurs à partir desquels les pertes de production solaire deviennent importantes.



**Fig. 14** Energie solaire produite et valorisée

Sur le graph, on a 100% de valorisation de la ressource solaire avec le séchoir pour un nombre de capteurs inférieur à huit capteurs. Au-delà de ce nombre, même si le taux de couverture augmente avec le nombre de capteur, alors la fraction non valorisée de l'énergie solaire produite augmente également. A partir de ce résultat, on constate que l'augmentation du nombre de capteurs pour un meilleur taux de couverture solaire ne serait pas la meilleure chose à faire pour une meilleure valorisation de la ressource solaire.

### 3. Calcul de l'énergie valorisée et l'économie du gaz combustible

La connaissance de l'efficacité permet le calcul du potentiel des pertes thermiques valorisable à travers l'échangeur. La chaleur prise par l'air neuf permettra une diminution de la puissance de chauffe du générateur d'air donc l'économie du gaz butane.

- Les pertes thermiques valorisées sont évaluées par :

$$Q_{pval} = \varepsilon * Q_{pc} \quad (1.36)$$

- Le Gain en gaz de combustion est donné par

$$\Delta m_{gaz} = \frac{Q_{pv}}{Q_T} * m_{gazcycle} \quad (1.37)$$

Les résultats obtenus avec un choix de 0.65 comme efficacité de l'échangeur Recair le détail du prix local du gaz butane voir tableau 11 (39) sont groupés dans le tableau suivant.

**Tableau 7** Potentiel des pertes valorisable à travers l'échangeur de chaleur Recair RS160

pertes totale valorisables (kWh)	efficacité échangeur	Potentiel pertes valorisée (kWh)	économie de gaz correspondant (kg)	économies de gaz sur une campagne (kg)	Gain financière réalisé - sur une campagne(CFA)
110.49	0.65	72.08	6.34	570.71	285 356.99

### 4. Coûts économiques des mesures d'optimisation du séchoir

Dans cette section, nous évaluons le coût de l'investissement des différentes mesures d'optimisation réalisées pour la valorisation des pertes thermiques et la qualité des produits.

#### 4.1. Coût d'optimisation thermique

Ces coûts concernent en particulier des pertes thermiques par la cheminée et celles dues à la permutation des claies au cours du séchage. Pour la première, toutes les mesures d'optimisations ont contribué à construire le réseau externe de l'air du séchage. Les mesures d'optimisations pour le second ont amené à la modification des plans du séchoir pour permettre une circulation homogène de l'air. Le coût économique de ses différentes mesures est constitué du coût du réseau d'air avec tous ses constituants et le coût de fabrication du séchoir optimisé.

#### 4.2. Coût du réseau de d'air et ses accessoires

Le réseau d'air extérieur est constitué des gaines flexibles de 300mm de diamètre d'un échangeur de chaleur, d'un générateur d'air chaud comprenant un brûleur à gaz, un échangeur de chaleur et un ventilateur.

##### ➤ Coût de l'échangeur de chaleur de chaleur

Dans le cadre du projet pour les raisons de délai, nous avons acquis un échangeur de chaleur préfabriqué. C'est justement ce coût d'acquisition et celui de la fabrication de son caisson que nous exposons ici.

Tableau 8 Coût échangeur de chaleur

	Désignation	Quantités	prix unitaire /m <sup>2</sup> (CFA)	Prix Total (CFA)
<b>Echangeur</b>	Echangeur Type Recair RS160 (32m <sup>2</sup> )	1	175 000.00	175 000.00
<b>construction caisson échangeur</b>	contre-plaqué 20mm	3	20 000.00	60 000.00
	Contre-plaqué 10mm	3	8 000.00	24 000.00
	autres	/	40 000.00	40 000.00
	main d'œuvre	/	110 000.00	110 000.00
	<b>Totaux 1</b>			<b>409 000.00</b>

##### ➤ Les gaines pour le circuit d'air externe

Pour les raisons de pertes de charge avec le débit d'air souhaité, nous avons opté pour les gaines de diamètre de 315mm. Le choix des gaines flexibles est dû à la configuration du réseau et pour une meilleure maniabilité.

**Tableau 9** Coût conduites d'air externe

Désignation	Quantité	Prix Unitaire (CFA)	Prix Total (CFA)
Gaines 300 mm	20	13 500.00	270 000.00
Manchette > 315mm	9	11 250.00	101 250.00
Serflex (60 -325)mm	8	1 000.00	8 000.00
<b>TOTAUX 2</b>			<b>379 250.00</b>

#### ➤ Le générateur d'air chaud et ses constituants

Le coût du générateur d'air est celui acquis bien avant par le CEAS Suisse et Burkina dans le cadre d'un projet similaire. Nous avons changé le brûleur à gaz qui initialement était au gaz naturel en gaz butane. Le coût d'investissement considéré est celui de l'ensemble du générateur acquis par le CEAS Suisse. La puissance thermique de ce générateur peut alimenter plusieurs séchoirs simultanément en air chaud.

#### 4.3. Coût d'optimisation de la qualité des produits

Le coût de l'optimisation de la qualité des produits se résume au coût de fabrication du séchoir optimisé. Le coût du séchoir est celui détaillé par le devis du menuisier dont le détail se trouve à l'**annexe II (Facture pro forma)**. Ce coût est résumé dans le tableau suivant.

**Tableau 10** Coût d'acquisition du séchoir optimisé

Désignation	Quantité	Prix Unitaire (CFA)	Prix Total (CFA)
Total Matériel et transport	/	/	1 445 000.00
Main d'œuvre	1	1	130 000.00
<b>TOTAUX 3</b>			<b>1 575 000.00</b>

#### 4.4. Résumé coût des mesures d'optimisation du séchoir ATESTA « classique »

Après analyse des coûts de chaque mesures d'optimisation réalisés pour le séchoir ATESTA « classique », dans le tableau ci-dessous le résumé des coûts de chaque mesure d'optimisation ainsi que le coût total.

**Tableau 11** Coût Total mesures d'optimisation du séchoir ATESTA "classique"

Désignation	Quantité	Prix Unitaire (CFA)	Prix Total (CFA)
échangeur de chaleur	1	734 000.00	734 000.00
Circuit d'air extérieur	1	379 250.00	379 250.00
Générateur d'air chaud + Bruleur	1	3 970 000.00	3 970 000.00
Le Séchoir Optimisé	1	1 575 000.00	1 575 000.00
<b>TOTAUX</b>			<b>6 333 250.00</b>

L'analyse des coûts montre la dominance des coûts du générateur d'air chaud et la fabrication du séchoir optimisé. Nous pensons qu'à la fin du projet, en fonction des résultats des tests obtenus, ce coût peut être optimisé afin de les réduire suivant les conditions socio-économiques du Burkina. Il s'agit en particulier des coûts de fabrication du séchoir et l'échangeur de chaleur. On peut également prévoir une baisse de coût d'acquisition du générateur d'air chaud si les experts du CEAS Burkina peuvent concevoir un modèle local équivalent avec une puissance thermique variable afin de l'adapter à un ou plusieurs séchoirs simultanément.

## 5. Etude des possibilités de l'investissement solaire

Les calculs du potentiel et du taux de couverture solaire valorisable ont été faits dans la section précédent. Nous étudions les différents schémas d'investissements afin d'évaluer les meilleures possibilités d'investissement sur le solaire thermique.

### 5.1. Hypothèses de calcul

Pour cette étude des possibilités d'investissements, nous avons fait un ensemble d'hypothèses.

- Le coût du capteur solaire est celui évalué par le CEAS Burkina (CEAS Burkina, 2011) évalué à 115000CFA par capteur de 2.54m<sup>2</sup> de surface.
- Le coût de la conduite d'air du capteur - séchoir à 350000CFA (CEAS Burkina, 2011).
- Le Prix du kilogramme de gaz butane. Nous rappelons que le gaz butane est subventionné à hauteur de près de 50% par le gouvernement. Pour le détail du prix, vois le tableau ci-dessous.

➤ Le système solaire installé n'induit pas de personnel supplémentaire. Sur la durée de vie du projet qui est considérée égale à celui du séchoir ATESTA, la perte de valeur du système solaire installé est négligeable.

➤ Le taux d'actualisation (11.1%) utilisé pour les calculs est un taux moyen qui est la somme du taux d'intérêt moyen ( 10%) des banques locales et le taux d'inflation moyen de 1.1% (BCEAO, 2017)

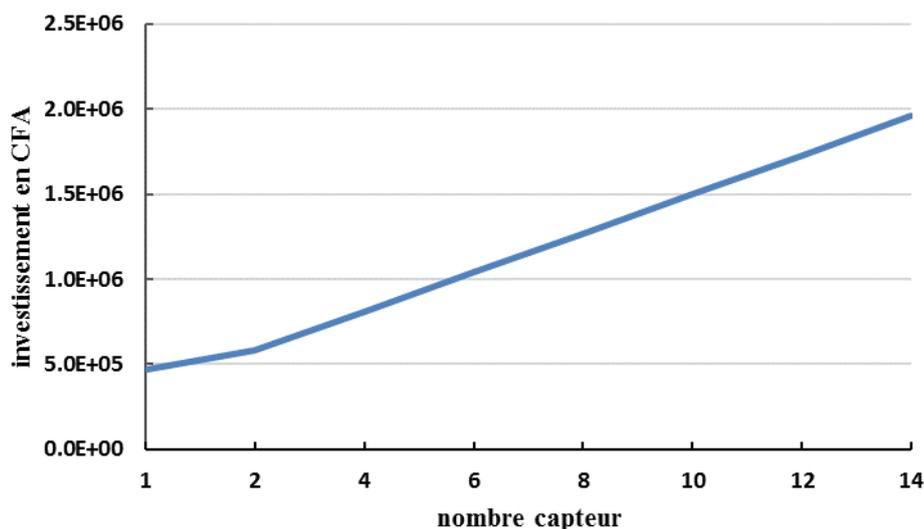
**Tableau 12 : Le Prix et le PCI du Gaz butane**

	PCI (kJ/kg)	Consommation sur un cycle(kg)	Consommation sur une campagne (kg)	Prix du kilogramme(CFA)
Gaz Butane	46000	14	420	420

## 5.2. Calcul de l'investissement

L'investissement est défini par le nombre de capteurs solaires à installer, le coût de la conduite d'air et le souffleur. Pour le cas présent, le coût du souffleur est inclus dans celui du générateur d'air chaud. L'investissement  $C_0$  considéré à l'année zéro du projet est :

$$C_0 = \text{Prix unitaire capteur} \times \text{nombre de capteurs} + \text{prix de la conduite d'air}$$



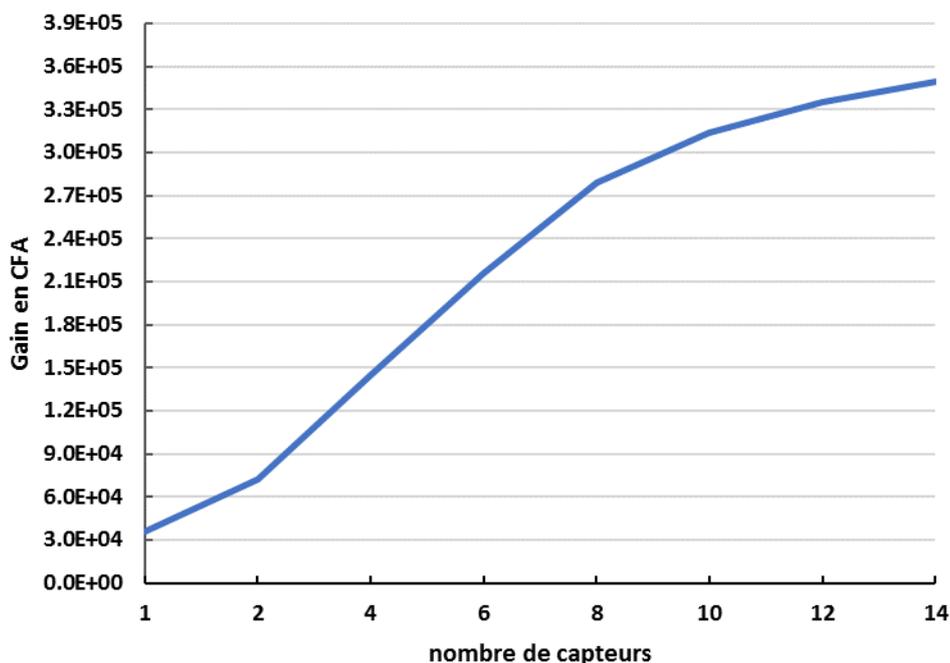
**Fig. 15** Investissement valorisation potentiel solaire

Sur ce graphe l'investissement est une fonction linéaire croissante du nombre de capteur. Elle ne montre aucune limite d'investissement pour le projet.

### 5.3. Calcul des flux nets de la trésorerie

Le flux net de la trésorerie est le bénéfice net que rapporte l'investissement chaque année à l'entreprise. Pour le cas présent, ce bénéfice est égal à l'économie financière réalisée sur la consommation du gaz combustible généré pas le système solaire qui est constant chaque année. Cette économie est calculée en fonction du taux de couverture solaire pour chaque schéma d'investissement.

$$\text{FNT} = \text{Taux de couverture solaire} \times \text{consommation gaz} \times \text{Nombre de cycle par campagne} \times \text{Prix du kg de gaz}$$



**Fig. 16** Economie du Gaz généré sur une campagne - système solaire

Ce résultat est à l'image du taux de couverture solaire. Contrairement à l'investissement, il est croissant et tend vers une valeur limite. Ceci justifie le fait qu'avec ce système, nous ne pourrions jamais avoir un taux de couverture de 100% du besoin énergétique. Cette courbe est divisée en trois parties marquées pas des taux d'accroissement différents. Pour un investissement d'un ou deux capteurs, le gain est moins croissant alors qu'au-delà de deux capteurs, nous avons une croissance rapide du gain qui retombe à près huit capteurs et tend vers sa valeur limite. Ce comportement du gain entre deux et huit capteurs s'explique au regard de la **figure 14**. On constate effectivement qu'entre deux et huit capteurs, le système

absorbe toute l'énergie solaire convertie par les capteurs et au-delà de huit capteurs, nous avons également les pertes d'énergie solaire issue des capteurs.

#### 5.4. Calcul du temps de retour sur l'investissement pour chaque schéma d'investissement

C'est le temps (TRI) nécessaire pour équilibrer l'investissement initial par les économies dues par cet investissement. Il est défini par la relation suivante en fonction du taux d'actualisation «  $a$  » et l'investissement initial  $C_0$

$$C_0 = \sum_k^{TRI} \frac{F_k}{(1+a)^k} \quad (1.38)$$

Il permet une étude rapide de l'acceptabilité d'un projet sans précision sur sa rentabilité. Nous l'avons calculé pour chaque schéma d'investissement du projet.

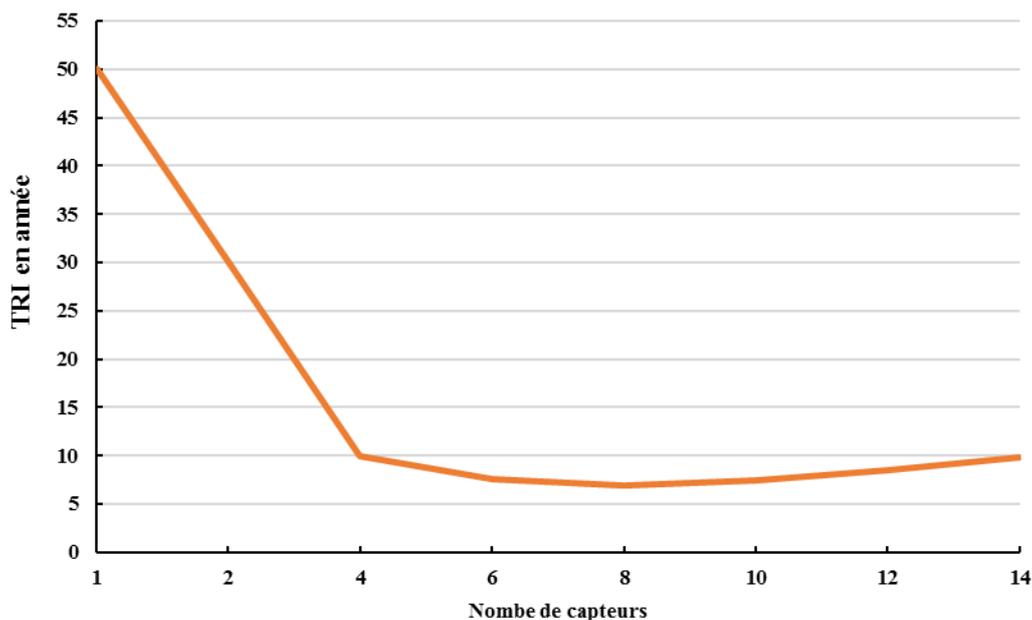


Fig. 17 Temps de retour sur Investissement solaire

Suivant le schéma d'investissement, le temps de retour sur l'investissement actualisé est compris entre six et plus de vingt-quatre ans. Pour les schémas d'investissements d'un à quatre capteurs, le TRI est très grand ce qui s'explique par le coût d'investissement élevé qui est en partie dû au coût de la conduite d'air et le taux de couverture solaire très faible. Le TRI décroît jusqu'à sa valeur minimale de sept ans. Cette valeur correspond à un investissement de huit capteurs solaires. Après cette valeur, la croissance du TRI est faible. Cela est dû à la

diminution de la rentabilité de l'investissement pour des schémas d'investissement de plus de huit capteurs solaires. A la suite de ses analyses, nous dirons que le schéma d'investissement le plus approprié pour notre projet est le système solaire comportant huit capteurs qui donne le TRI le plus faible. Mais il est à noter que ce TRI pour un projet industriel reste mauvais par rapport à la durée du projet qui est de dix ans.

### 5.5. Calcul de la valeur actualisée nette de chaque schéma d'investissement

La valeur actualisée nette (VAN) est la somme de toutes les différences de chaque valeur actualisée des dépenses et les bénéfices dus par l'investissement sur toute sa durée de vie. Pour un projet, elle exprime la valeur réelle de l'enrichissement de son promoteur sur toute sa durée de vie. Elle est calculée en fonction de l'investissement initial  $C_0$ , les flux nets de la trésorerie  $F_k$  sur chaque année et le taux d'actualisation «  $a$  ».

$$VAN = -C_0 + \sum_k^N \frac{F_k}{(1+a)^k} \quad (1.39)$$

La VAN est le critère essentiel pour la prise de décision d'investissement et/ou du choix d'investissement en cas de comparaison de plusieurs projets ou possibilités d'investissement. Pour ce projet, nous avons calculé la VAN pour chaque schéma d'investissement.

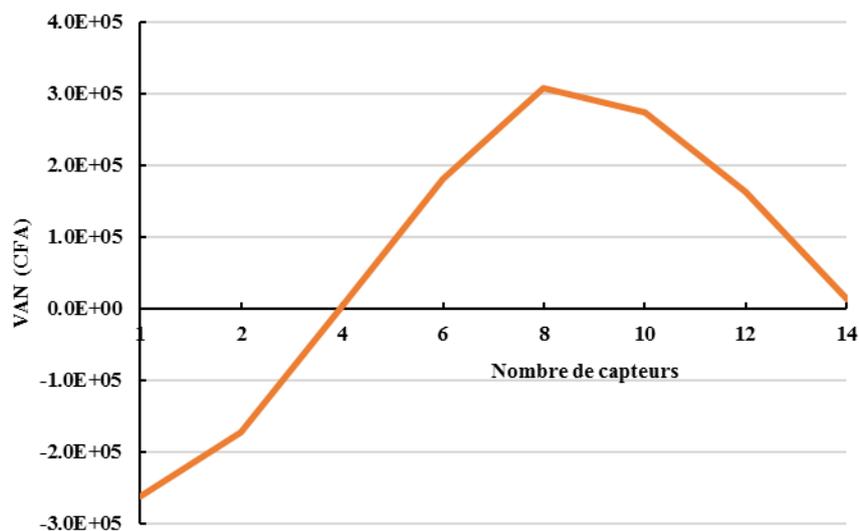


Fig. 18 Valeur Actuelle nette (VAN) pour chaque investissement

D'après les résultats du calcul de la VAN, un investissement comportant moins de quatre capteurs est à exclure, car pas de rentabilité possible sur toute la durée du projet. D'après la courbe, tout investissement constitué de quatre à quatorze capteurs serait rentable sur la durée

du projet. Le pic de cette rentabilité est l'investissement constitué de huit capteurs. Ce schéma d'investissement de huit capteurs est le meilleur avec la rentabilité la plus importante caractérisée par la VAN. Son TRI de six ans reste mauvais industriellement.

En résumé, nous considérons qu'investir sur le solaire thermique ne sera pas rentable dans le domaine du séchage des mangues au Burkina Faso. A l'état actuel du séchoir ATESTA « classique » et son process de production, les résultats d'analyses économiques faits ne permettent pas de réelles motivations au sens industriel d'investir sur le solaire thermique. Cependant, le TRI et la rentabilité de cet investissement peuvent rapidement devenir très favorables si certains ajustements du système de séchage venaient à être faits. Nous pensons à la durée d'un cycle de séchage, l'optimisation énergétique du séchoir et la taille de l'installation solaire pour l'alimentation simultanée de plus d'un séchoir en air chaud. Egaleme nt l'utilisation prolongé du séchoir sur plus de trois mois voire toute l'année et/ou l'installation d'un autres systèmes d'utilisation de la chaleur.

## V. CONSTRUCTION D'UN SÉCHOIR ATESTA OPTIMISÉ

Après l'étude des performances énergétiques et les différentes options d'amélioration de la qualité des produits du séchoir ATESTA classique, nous proposons un nouveau séchoir ATESTA optimisé avec de meilleures performances énergétiques et qualités de produits. Ce séchoir est conçu et fabriqué suivant un cahier de charges établi selon les objectifs du projet. La réduction du coût de production et l'amélioration de la qualité des produits.

### 1. Cahiers de charge de la construction du séchoir ATESTA optimisé

Le séchoir ATESTA dans sa version classique paradoxalement se présente comme un frein au développement de la filière mangues séchées du Burkina Faso. Le marché européen est le premier importateur de mangues séchées du Burkina Faso qui sont produites à 90% par le séchoir ATESTA (S Carboni, 2016). Les exigences de qualités de ce marché vont grandissantes et mettent à mal l'émergence de la filière. Conçues depuis les années 95 (Guissou, 1996), l'augmentation du prix de gaz et la performance énergétique du séchoir sont aujourd'hui responsables de l'augmentation des coûts de production. Par rapport à toutes ces contraintes, nous avons élaboré un cahier des charges pour la conception et la fabrication d'un nouveau séchoir ATESTA optimisé.

#### 1.1. Enoncé du besoin pour le séchoir optimisé

Les besoins de fabrication d'un nouveau séchoir ne sont pas pléthoriques. Ce séchoir doit permettre le développement et la compétitivité de la « filière mangues séchées » du Burkina Faso. Pour ces raisons, les besoins principaux identifiés sont :

- Une production de qualité. La qualité au sens de la réglementation et l'évolution des normes du marché international.
- Le meilleur coût de production possible contrairement au séchoir ATESTA classique

#### 1.2. Analyse fonctionnelle du séchoir ATESTA optimisé

Pour satisfaire ces besoins, le séchoir optimisé doit remplir un certain nombre de fonction :

- **Une production biologique**

Ce séchoir doit rester dans la continuité de production de mangues biologiques qui est déjà garantie par le séchoir ATESTA classique. Ceci suppose un système de séchage efficace sans prétraitement des produits frais.

➤ **Production de mangues séchées softs**

Le séchoir doit garantir la production des manges séchées non croûtées et douces avec une teneur en eau suffisante comprise entre 15% et 18% au maximum. La réhydratation des produits séchés devrait être possible sans ambiguïté et sans destruction des éléments nutritionnels ainsi que le goût.

➤ **Meilleures qualités organoleptiques des produits**

Le produit doit garder impérativement sa nature d'origine (naturel). Il s'agit de la couleur, du goût, une meilleure texture, de l'odeur.

➤ **Une production homogène**

Le séchoir optimisé doit garantir une production à 100% premier choix. Le produit doit être homogène c'est-à-dire une même teneur en eau pour toutes les tranches de pulpes séchées. Ceci permettra un meilleur stockage sur le long terme.

➤ **Une production homogène**

Le séchoir optimisé doit garantir un meilleur rendement énergétique d'un facteur deux par rapport l'ATESTA classique soit 60% au moins c'est-à-dire une consommation de 0.35 kilogramme de gaz en moyenne par kilogramme de produits séchés.

➤ **Le temps de séchage ou durée d'un cycle complet**

La durée d'un cycle est un facteur capital pour la rentabilité de l'activité du séchage. Plus elle est courte, alors le volume de production sur une campagne est grand. Actuellement de 20h en moyenne, le séchoir optimisé doit permettre une diminution d'un facteur deux de cette durée (cycle de 10-12heures).

➤ **Une circulation homogène de l'air dans le séchoir**

Pour garantir 100% de production de premier choix, le séchoir optimisé doit en avance garantir une circulation et une distribution homogènes de l'air en tout point des cellules de séchage.

➤ **Convection forcée de l'air dans le séchoir**

Contrairement au séchoir classique, la structure du séchoir ATESTA optimisé doit garantir une circulation forcée à haut débit d'air.

## 2. Caractéristiques du générateur d'air chaud

Le générateur d'air chaud est un appareil qui permet de chauffer de l'air ambiant en utilisant l'énergie thermique produite par la combustion du gaz. Celui utilisé dans ces travaux, chauffe l'air est indirectement à travers un échangeur thermique entre les produits de combustion et le flux d'air généré par le ventilateur centrifuge qui compose le générateur. Les gaz de combustion après plusieurs passages dans l'échangeur sont évacués à travers une cheminée dans l'atmosphère. Ce Générateur est un ensemble compact composé de plusieurs composantes.

- Un ventilateur centrifuge
- Un échangeur de chaleur
- Un brûleur à gaz
- Un boîtier électrique

### 2.1. Ventilateur centrifuge

Ce ventilateur est à double face est actionné par un moteur électrique à vitesse non variable et produit un débit volumique de  $2000\text{m}^3/\text{h}$  d'air. La régulation de ce ventilateur est assurée par deux thermostats. Un pour la mise en route du moteur quand la consigne de température de surface de l'échangeur est atteinte. Le deuxième assure la sécurité du ventilateur vis-à-vis de la chaleur produite par la combustion. Il arrête tout système dans le cas de surchauffe du moteur de ventilateur. Les caractéristiques du moteur et l'image du ventilateur annexe II.

### 2.2. L'échangeur de chaleur

C'est un échangeur tubulaire à deux passages très, dense construit en acier inoxydable. Il est formé de deux parties. La base qui est constituée des tubes dans lesquels circulent les gaz de combustion. Une partie cylindrique qui constitue la chambre de combustion. La chambre de combustion exposée également au courant d'air brassé par le ventilateur du générateur augmente considérablement la surface d'échange. Le constructeur estime l'efficacité thermique de cet échangeur à 90%. Dans une vision de réduction des coûts de production et

l'acquisition, le CEAS BF ont réalisé une copie conforme au de cet échangeur (**Fig.32 – avant**)

### 2.3. Le brûleur

C'est l'élément le plus important et le plus complexe du générateur (**Fig. 9 annexe II**). Il fonctionne au gaz GPL (Gaz pétrole liquéfié) de modèle LG90 40 à 85 kWth de puissance thermique. Il est constitué d'un module de régulation du débit et de pression de gaz. Au démarrage, l'appel de gaz est élevé ainsi que la pression légèrement élevée par rapport au Régime nominal. La partie brûleur (mélangeur) proprement dite, est constitué d'une admission d'air à débit variable contrôlé par un ventilateur de faible puissance de l'ordre de 0.1kW et d'un module de commande de marque siemens. Elle est également constituée d'un tube cylindrique constitué des électrodes pour l'ignition du mélange et une sonde de température. Pour un débit de gaz fixé, pendant le fonctionnement, la bonne flamme s'obtient avec le réglage manuel du débit d'air. Les caractéristiques de ce brûleur sont en **annexe II tableau 1**.

### 2.4. La régulation électrique

Elle est composée des voyants électriques permettant de suivre le comportement du système en état de marche. Elle est également composée des contacts automatiques permettant la mise en marche et à l'arrêt du brûleur.

## 3. Caisson et l'échangeur de chaleur Air - Air

Ce caisson est construit pour contenir l'échangeur de chaleur Recair et le système de by-pass pour le réglage du taux de recirculation de l'air à la sortie du séchoir. Comme le montre **la figure 15 annexe II**, il est formé de quatre ouvertures correspondant à une entrée-sortie pour chacun des flux d'air qui le traverse. A l'intérieur du caisson, nous avons l'échangeur de chaleur Air/Air et le système de rail avec une plaque rectangulaire coulissante servant de by-pass pour le flux d'air chaud provenant du séchoir. L'échangeur de chaleur à plaques de marque Recair de type RS160 est à flux croisés. Les plaques de formes « hexagonales » sont fabriquées avec du polystyrène (**Annexe II – Echangeur Recair**). Elles sont disposées « parallèlement » l'une de l'autre d'une distance d'environ 4mm. Les courbes caractéristiques de l'échangeur obtenues du fournisseur sont en **annexe II – échangeur Recair**. Il donne un bon rendement pour des débits élevés. La surface totale d'échange thermique est de 36m<sup>2</sup>. Le système de by-pass est muni d'une tige métallique graduée permettant de fixer les taux de

recirculations entre 5 et 100 % en fonction de l'ouverture du by-pass. Les plans détaillés du caisson sont en **annexe IV**

#### **4. Conception du séchoir optimisé.**

Suivant les recommandations du cahier des charges, le séchoir construit doit répondre à plusieurs spécificités techniques. Toutefois, nous avons tenu à garder les mêmes dimensions avec le séchoir ATESTA classique pour des raisons de comparaisons, d'usage du support d'une ancienne installation du séchoir ATESTA et des possibles modifications des séchoirs existants. Pour plus de détails, voire l'annexe (**Annexe IV**) pour les plans détaillés du séchoir.

##### **4.1. Le box du séchoir**

Sur ce point, en s'inspirant des travaux des chercheurs du Cirad (Rivier et al., 2009) et la technologie des séchoirs alimentaires commerciaux (ProliTec, 2016) qui reprennent le même principe de fonctionnement, nous avons créé des veines d'alimentation et d'extraction de l'air du séchoir.

##### **4.1.1. Veines d'alimentation et d'extraction d'air du séchoir**

Le séchoir compte trois veines de circulation d'air avec des sections bien équilibrées **figure 16 Annexe II**. Une veine centrale de section rectangulaire située entre les deux cellules de séchage. L'air est injecté dans le séchoir par cette veine à forte pression avec un débit ( $2000\text{m}^3/\text{h}$ ). Les deux veines d'extractions d'air sont situées sur les parois latérales opposées à la veine centrale. La veine centrale à une section égale à la somme totale des deux autres avec la même profondeur.

##### **4.1.2. Les Orifices de distribution d'air dans les cellules de séchage**

Sur les faces des veines d'air précédentes, nous avons une répartition homogène des trous de même diamètre sur l'horizontale et la verticale. La section de la veine centrale étant suffisante pour une pression homogène dans la veine, ces orifices de faibles sections permettent l'alimentation équilibrée en air des cellules de séchage. Nous avons les mêmes configurations des trous sur les faces intérieures des plenums d'extraction d'air. Cette configuration, offre un système symétrique sur chaque claie le soufflage d'air en amont et l'aspiration en aval. Pour plus détaillés, voire les plans du box du séchoir en **annexe V**

#### 4.2. Le casque

Par rapport au séchoir ATESTA classique, le casque est complètement modifié. L'admission et l'extraction de l'air du séchoir se font par le casque. Les deux plenums d'extractions d'air des cellules de séchage débouchent directement dans le casque. L'extraction finale se fait à travers une ouverture circulaire sur une paroi latérale (**Fig 15- a annexe II**). L'air chaud et sec arrive dans le plenum d'injection à travers un caisson de forme parallélépipédique interne au casque. Afin de permettre une meilleure circulation de l'air dans le casque, cette dernière est reliée à la paroi supérieure du casque par une conduite cylindrique en bois qui donne directement sur le conduit d'air chaud pulsé par le générateur (**Fig 15- b annexe II**).

### 5. Les pertes de charges aérauliques et image du système

#### ➤ Les pertes de charges aérauliques du système

Le séchoir ATESTA classique est à convection naturelle avec un débit d'environ 250m<sup>3</sup>/h dans chaque cellule de séchage. Nous avons fixé la vitesse d'air dans chaque cellule de séchage à 0.25m/s ce qui donne avec la section, un débit d'air de 873m<sup>3</sup>/h soit un débit total de 1746m<sup>3</sup>/h pour le ventilateur du générateur d'air du système complet. Dans le séchoir, nous avons deux types de pertes de charge linéaires et singulières. Les pertes de charge singulières sont essentiellement dues à l'élargissement, le rétrécissement des « conduites » d'air et l'obturation du courant d'air. Nous avons utilisé les formules suivantes pour l'évaluation de ses pertes de charge sur tout le système.

#### ➤ Les pertes de charge linéaires

$$\Delta P_l = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.40)$$

« L » la longueur de la conduite,  $D_H$  le diamètre hydraulique et V la vitesse de l'air dans la conduite  $\lambda$  est le coefficient de frottement de Darcy calculé par la formule de Swamee-Jain en fonction de la rugosité de la conduite :

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon / D_H}{3.7} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (1.41)$$

#### ➤ Les pertes de charges singulières

$$\Delta P_s = k \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.42)$$

K est le coefficient de pertes de charge singulière qui dépend de la singularité.

Les résultats de ses calculs sont regroupés dans le tableau ci-dessous. Pour plus de détails voir **tableau 7 annexe III**

**Tableau 13** Résultats calcul pertes de charge aéraulique du système

Eléments	Caisson	Echangeur	Séchoir	Gaine	Générateur d'air chaud	Totales pertes de charges (Pa)
Pertes de charges (Pa)	198.24	174.20	63.01	41.27	0	476.73

➤ **Image du système de séchage**



**Fig. 19** Vue d'ensemble du système de séchage construit

## VI. RESULTATS EXPERIMENTAUX ANALYSES ET RECOMMANDATIONS

Après la conception et la fabrication du séchoir, nous avons installé le système et procédé aux tests pour la validation du concept ainsi que des hypothèses de calculs. Dans ce chapitre, nous allons présenter et analyser les résultats des différentes mesures relevées pendant les tests avant de proposer des mesures d'amélioration du système.

### 1. Présentation des instruments de mesure et protocole de test

#### 1.1. Présentations des instruments de mesure

Les instruments utilisés sont essentiellement ceux permettant les mesures ponctuelles et le suivi de la température, l'humidité relative de l'air et la vitesse de circulation de l'air.

##### ➤ Pour les mesures ponctuelles, les instruments utilisés

- Le thermoanémomètre à hélice portable (HD300) (**figure 20 annexe II**) il permet la mesure de la température ambiante et la vitesse d'air pour des conduites ouvertes. On mesure la vitesse de circulation de l'air pour une conduite en obstruant l'ouverture de la conduite avec la vanne portable qui est munie d'un ventilateur. L'instrument affiche simultanément la vitesse et la température ambiante.

- L'anémomètre à sonde permettant la mesure de température et de vitesse d'air en fonctionnement réel dans les conduites à travers un orifice pratiqué en surface des conduites. Il affiche également la température et la vitesse de l'air simultanément.

##### ➤ Instruments de suivi de vitesse, de températures et de l'humidité relative de l'air les :

- Les thermopuces et les hygropuces Waranet (**Fig. 21 Annexe II**). Ils permettent l'enregistrement de la température ou le couple Température et l'humidité relative. Ils sont munis d'une mémoire, d'une batterie de lithium. Ils sont facilement manipulables et transportables. Les plages de mesures sont fonction de la variété de la puce.

- Thermocouple de haute température (**Fig. 22 Annexe II**). Chacun est mini de deux sondes de température rigide de type k de plage de mesure comprise entre  $-99.9^{\circ}\text{C}$  à  $1372^{\circ}\text{C}$  avec une précision de  $0.1^{\circ}\text{C}$ . ils sont dotés d'une mémoire interne pour le stockage des relevés pendant la campagne de mesure. Ses sondes rigides permettent de suivre la température à l'intérieur des tranches de mangues lors du séchage.

- ThermoData pour les mesures de température et d'hygrométrie (**Fig. 23 Annexe II**). Ils sont dotés d'une mémoire permettant de stocker les enregistrements pendant

la campagne de mesure. Ils ne sont pas équipés de sondes ils donnent des mesures de la température et de l'humidité de l'air ambiant.

### **1.2. Protocole de réalisation des tests**

Les tests effectués se sont déroulés en trois phases :

#### **➤ Le test à vide sans démarrage du brûleur**

Pour cette phase, le générateur d'air et le ventilateur sont en marches avec le brûleur à l'arrêt. Nous procédons à la mesure des vitesses de circulation d'air à différents niveaux du système à l'aide des capteurs munis de sondes, à travers les gaines d'air et des ouvertures accessibles du réseau. Ceci dans l'optique de vérification de la vitesse, le débit d'air et la circulation homogène dans les cellules de séchage.

#### **➤ Le test à vide avec démarrage du brûleur**

Pour ce test, le générateur d'air et son ventilateur sont en marches également le brûleur. Les objectifs sont multiples. Le contrôle de la montée en température dans le système. L'homogénéité de la température dans les cellules de séchage, au-dessus des claies. Enfin la vérification du bon fonctionnement du système tel que les régulateurs du brûleur et le ventilateur du générateur. Pour cette phase, les thermopuces et thermoData sont fixés à différents points du réseau pour le suivi de cette montée en température du système.

#### **➤ Le test avec des serviettes mouillées**

Pour ce dernier test, le système est dans son état de fonctionnement normal. Les linges mouillés sont disposés efficacement sur les claies de la cellule droite du séchoir numéroté à partie du bas vers le haut de 1 à 12. Les Thermopuces, les thermocouples et thermoData sont disposés à différents points des deux cellules de séchage également à l'entrée et à la sortie du séchoir pour le suivi des paramètres humidité et température du système.

## **2. Résultats et analyses des différents tests**

### **2.1. Mesures de vitesse**

A l'aide de la sonde de mesure de l'anémomètre, manuellement nous captions la mesure maximale de la vitesse dans la conduite à travers l'orifice pratiqué sur sa surface. Pour des ouvertures libres, nous avons utilisé l'anémomètre à hélice. Dans le tableau ci-dessous, les résultats de mesure de vitesse à différents points du réseau lors du test à vide du système.

**Tableau 14** Mesures de vitesse à différents points du système

Point de mesure	Vitesse air max (m/s)	Diamètre (cm)	Débit volumique (m <sup>3</sup> /h)	Débit massique (kg/h)
Sortie Générateur	8.2	20	927.40	1143.48
Entrée casque séchoir	6	20	678.58	836.69
sortie Séchoir	6.8	20	769.06	948.25
Entrée Air frais (Echangeur)	1.4	16	101.34	124.95
Sortie système (Echangeur)	1.8	16	130.29	160.65
Entré Générateur	3.2	20	361.91	446.24
Sortie trou injection cellule gauche claire no7, trou no7	2	1.4	1.11	1.37
Sortie trou injection cellule droite claire no7, trou no7	2	1.4	1.11	1.37

L'observation de ses mesures montre une grande disparité. Les différences de vitesses dans les gaines de mêmes diamètres caractérisent les fuites d'air à travers le réseau de gaines et les pertes de charge du réseau. Ces défauts du réseau se justifient davantage avec le débit d'air de recirculation à l'entrée du générateur. Il est pratiquement la moitié du débit à la sortie du séchoir. Même observation pour la vitesse d'air. Les mesures de vitesse à la sortie du système (Caisson échangeur) et l'entrée d'air frais sur l'échangeur avec le clapet du caisson complètement ouvert (recirculation 100% d'air) caractérisent le bon fonctionnement de l'échangeur. Les caractéristiques du ventilateur du générateur d'air indiquent un débit d'air maximal de 2000 m<sup>3</sup>/h la mesure de 927.4 m<sup>3</sup>/h à la sortie de celui-ci montre l'impact des pertes de charge du réseau sur ses performances. En prévision de ses pertes de charge du système, nous avons acquis un deuxième ventilateur de débit maximal 4000 m<sup>3</sup>/h munis d'un variateur de vitesse (**Tableau 1 figure 7 annexe II**) pour les prochains tests plus approfondir du système. Les mesures de vitesse à la sortie et à l'entrée des trous d'injection et d'extraction montrent une circulation faible de l'air dans les cellules de séchage.

## 2.2. Résultats et analyses des tests de montée en température système et de linges mouillés

Le test pour la vérification de la montée en température du système et celui des linges mouillés ont été réalisés en continu. Après installation des capteurs de suivi de températures, nous avons démarré le système avec les claies vides dans la cellule de gauche et pas de claies dans la cellule de droite. Après une heure de fonctionnement, les linges et les capteurs

efficacement disposés sur les claies sont introduits dans la cellule droite du séchoir ceci sans l'arrêt du brûleur et sans ouverture de la cellule gauche. Les paramètres de test sont les suivants :

- Heure de début de test 19 : 06
- Heure introduction linge mouillés cellule droite 19 : 36
- Heure de fin (arrêt bruleur et ouverture portières) 20 : 41
- Taux de recirculation 100%
- Consigne thermostat ventilo (ventilo en fonctionnement contant) 0°C
- Consigne thermostat bruleur 80°C

### 2.2.1. Analyse mesures : point de mesures entrée – sortie séchoir

#### ➤ Entrée séchoir :

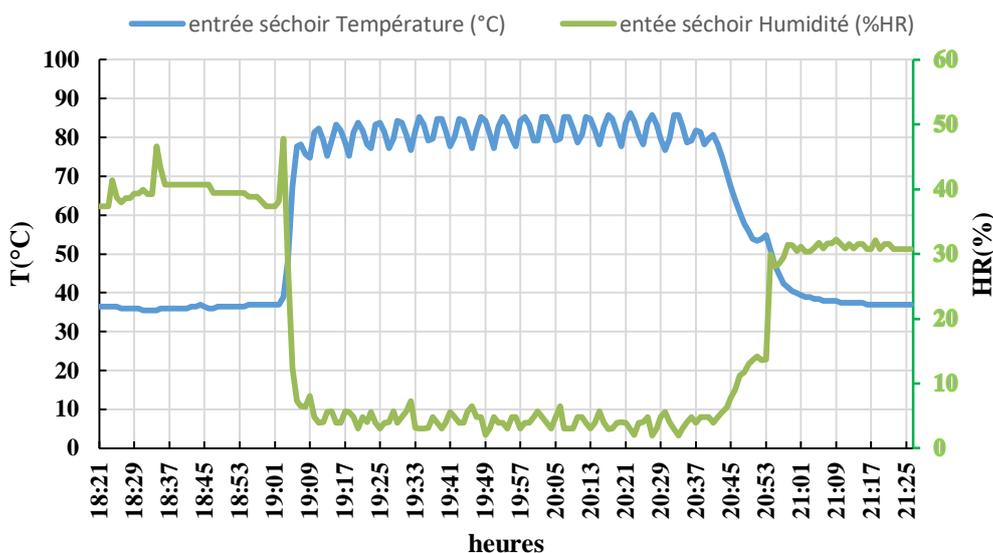
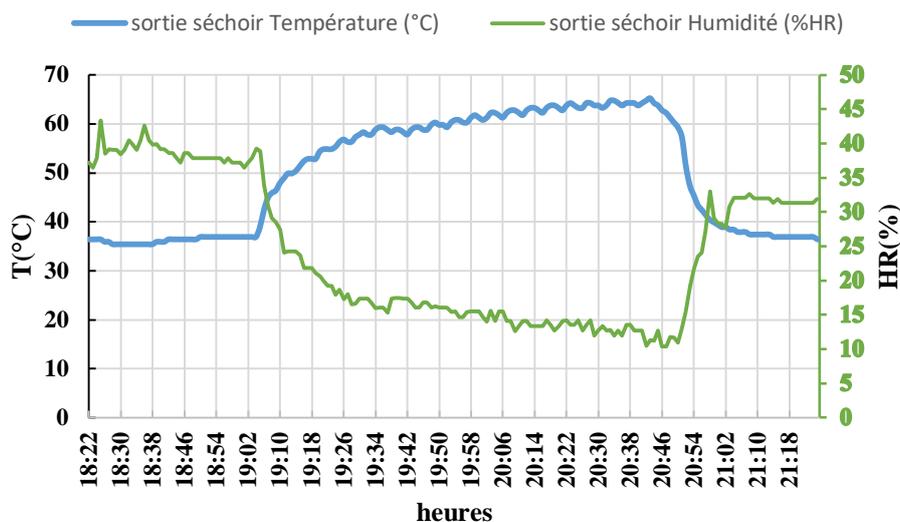
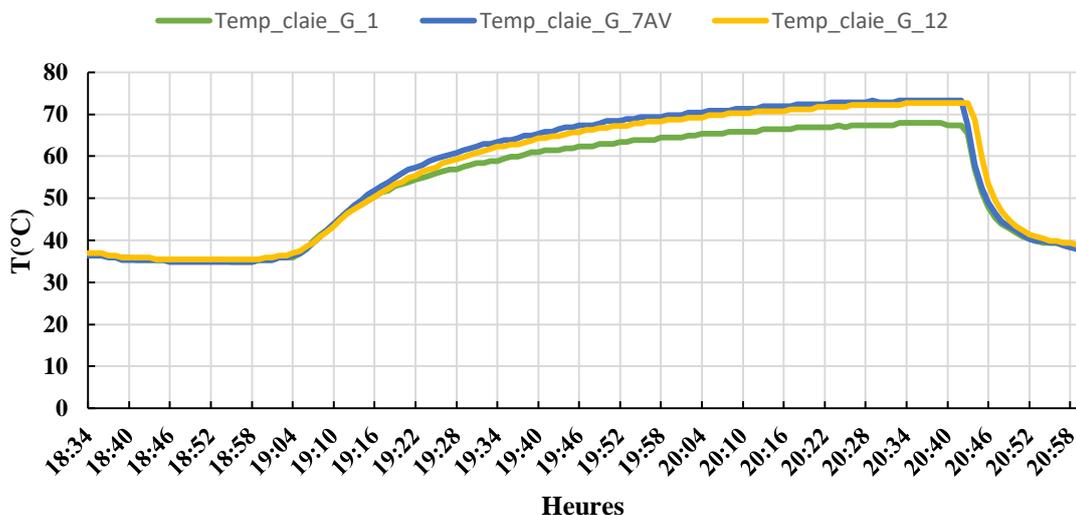


Fig. 20 Profil température et humidité relative entrée séchoir

Les profils de température et d'hygrométrie à l'entrée du séchoir sont à l'image de la régulation du brûleur avec de faibles fluctuations. Ces grandeurs sont presque constantes sur toute la durée du test après avoir atteint leurs valeurs maximales pour la température et minimales pour l'hygrométrie. L'humidité de l'air atteint le niveau le plus bas. La courbe montre une montée instantanée de la température en début de l'expérience. Elle atteint des valeurs maximales de l'ordre 86°C. la décroissance de la température en fin de l'expérience correspond à l'arrêt du brûleur et l'ouverture des portières.

➤ **Sortie séchoir****Fig. 21** Profil température et humidité relative sortie séchoir

A la sortie du séchoir, les courbes montrent des relevés de température et d'humidité très différents de l'entrée du séchoir. Nous avons une montée de la température respectivement une décroissance de l'humidité relative progressive et variée sur toute la durée de l'expérience. On observe une légère décroissance pour la température et la croissance pour l'hygrométrie à partir de 19h34 ce qui correspond à l'introduction des linges mouillés dans la cellule de droite du séchoir. Ces courbes montrent bien qu'en fin d'expérience, le maximum de la température au niveau de la sortie du séchoir n'est pas encore atteint.

**2.2.2. Analyse mesures : cellule gauche séchoir**➤ **Mesure sur claie à différents niveaux****Fig. 22** Profil de température cellule gauche claie 1,7 avant, 12

Les capteurs pour cette mission ont été préparés bien avant le début de l'expérience. Ces courbes ont toutes les mêmes comportements. Une croissance rapide au début de l'expérience et une croissance moins rapide en milieu d'expérience jusqu'à la fin. La température au-dessus de chaque claie tend vers une valeur limite en fin de l'expérience. Le profil de la température au-dessus de la claie 7 montre une croissance légèrement au-dessus des deux autres. Sa valeur en fin de l'expérience est la plus importante de toutes avec celle de la claie 1 qui est la plus faible. L'observation de ses profils montre moins d'influence de la régulation du brûleur sur la température en chacun de ses points de mesures ce qui justifie une bonne étanchéité et l'isolation thermique du séchoir. Les températures au-dessus des claies 1 et 12 ont les mêmes allures et la différence des valeurs en fin de l'expérience est moins importante par rapport à la claie 7. On constate également que l'ouverture de la cellule droite du séchoir pour l'introduction des linges mouillés n'a pas perturbé le fonctionnement de la cellule de gauche. Ce qui permet d'affirmer le niveau d'étanchéité et l'indépendance des deux cellules de séchage. Le ralentissement de croissance de la température est justifié ; il coïncide avec le début de tests de serviettes mouillées avec le recyclage de l'air chaud et humide dans le séchoir.

➤ **Cellule gauche séchoir test à vide (Brûleur en marche) comparaison profil de température**

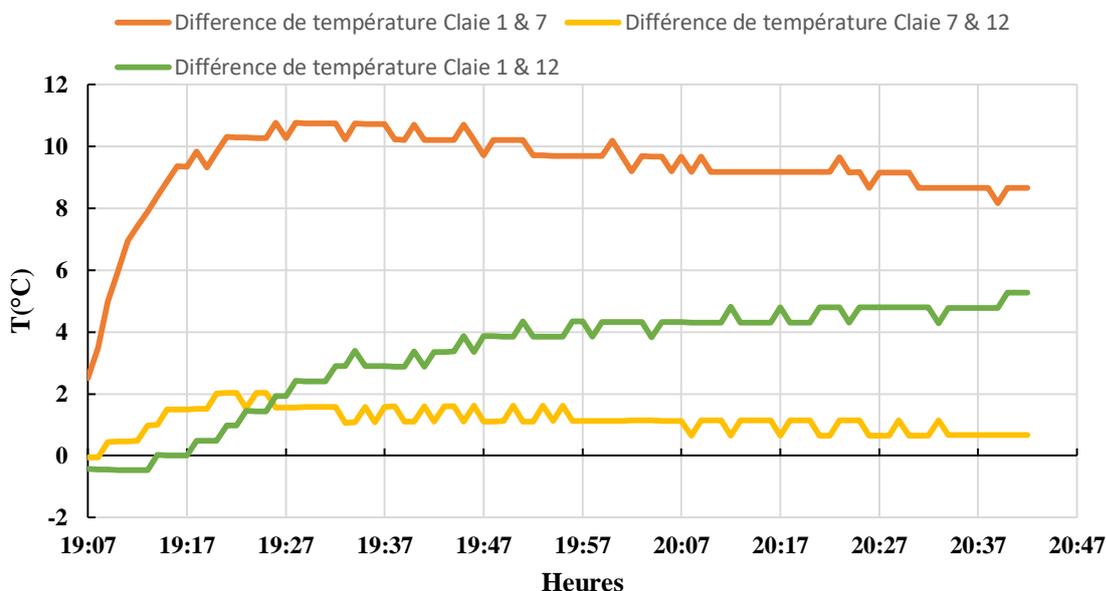


Fig. 23 Cellule gauche séchoir : Comparaison Température claie 1,7AV,12

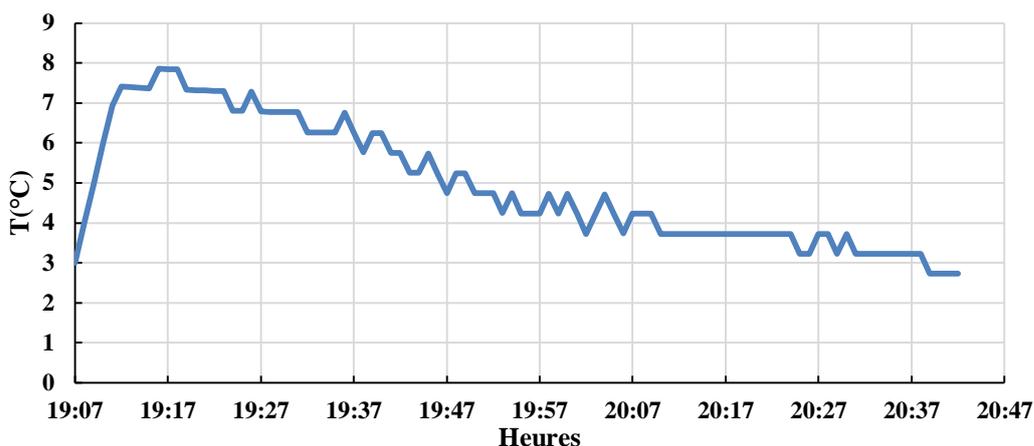


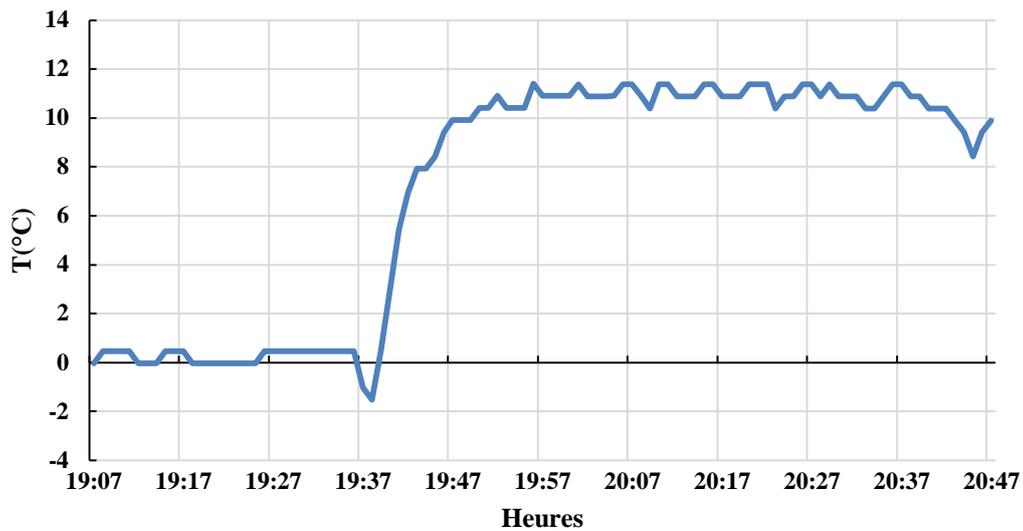
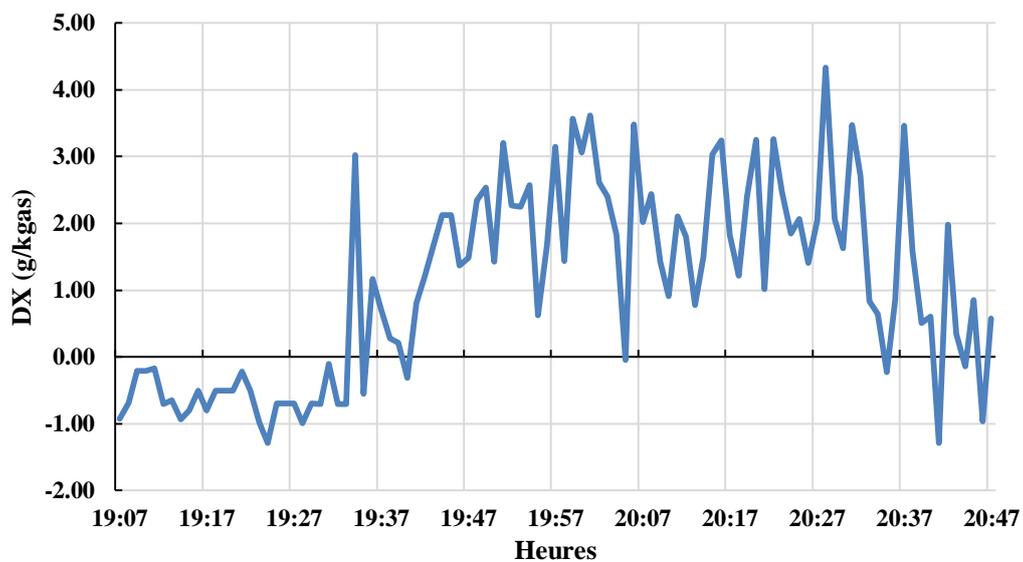
Fig. 24 Cellule gauche séchoir : Comparaison Température claie 7 Arrière & avant

L'observation de ces profils de comparaison de température sur la verticale et le plan horizontal dans la cellule de gauche montre qu'en tout début de l'expérience, la différence de température est importante de l'ordre 10°C entre le centre de la cellule claie 7 et les claies de niveau inférieur. Cette différence reste assez faible entre les claies des deux extrémités de la cellule de l'ordre de 3°C en moyenne et devient plus importante en fin de l'expérience. La différence de température entre ses différents points de mesures décroît au cours de l'expérience vers des valeurs limites. Entre les extrémités de la cellule claies 1 et 12, cette différence est plutôt croissante et tend également vers une valeur limite (4°C). Sur le plan horizontal (claie 7 avant et arrière), la différence de température est plus faible et tend à s'annuler avec le temps. Au regard de ses profils, l'introduction des linges mouillés dans la cellule de droite n'a eu aucune influence sur l'évolution de la température en chacun des points de mesure. En fin, nous remarquons une variation nette de la température dans la cellule de séchage sur le plan vertical. Ces profils montrent également une stabilité de toutes ses variations sur la durée.

### 2.2.3. Cellule droite séchoir : test linges mouillés

Les figures donnant les détails sur la disposition des capteurs pour l'effectivité de ces tests sont en annexe-test. Pour l'expérience, nous avons disposé les serviettes mouillées sur chaque moitié des douze claies de la cellule de séchage du côté droit du séchoir. Nous avons disposé les thermopuces au-dessus de la claie numéro 7 une du côté par lequel l'air est soufflé et l'autre du côté de l'extraction de l'air. Les claies munies des serviettes mouillées et des capteurs sont introduites dans le séchoir à 19h36 et la fin de l'expérience à 20h41 (GMT+2).

## ➤ Cellule droite du séchoir

**Fig. 25** Test linges mouillés cellule droite claie 7: variation de la température entrée-sortie**Fig. 26** Test linge mouillé cellule droite claie 7: variation humidité absolue entrée-sortie

Le profil de température montre une différence de température entre les deux côtés de la claie 7 de la cellule quasiment constante sur toute l'expérience avec une valeur moyenne de l'ordre de 11°C. La comparaison de ce profil avec celui de l'humidité absolue donne des justifications pour cette faible variation de la température. Avec le profil de l'humidité absolue, on peut également remarquer les faibles variations ce qui traduit directement la faible évaporation d'eau du linge. Ce profil met en relief la difficulté d'extraction de l'eau des linges mouillés installés sur les claies.

## ➤ L'Entrée et la sortie du séchoir

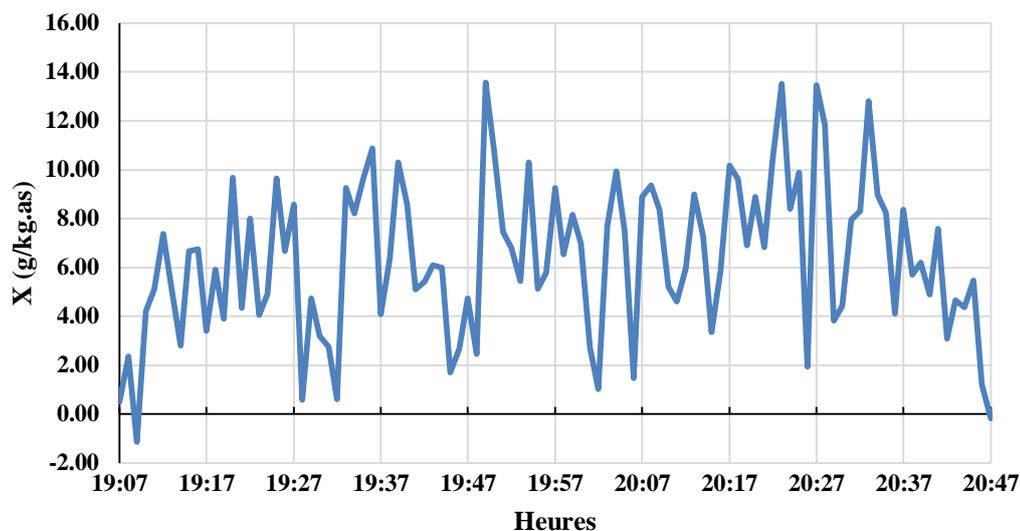


Fig. 27 Test linge mouillé entrée - sortie séchoir: variation humidité absolue

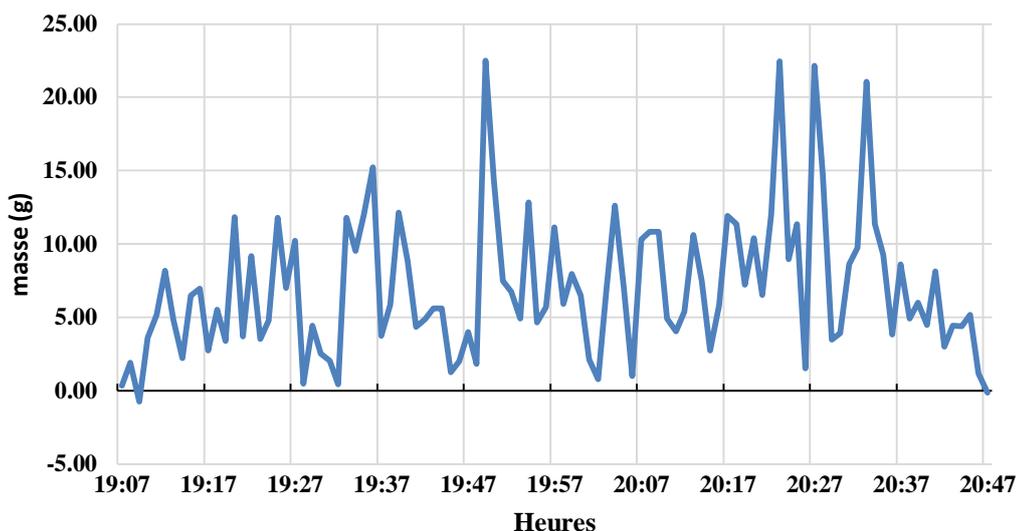


Fig. 28 Test linge mouillé entrée - sortie séchoir: masse d'eau extraite

Le profil de la variation de l'humidité absolue entre l'entrée et la sortie du séchoir montre de « fortes » variations de l'ordre de 13 g/kg.as. Cette variation témoigne l'effectivité de l'évaporation de l'eau des linges mouillés exposés dans la cellule de séchage. La masse d'eau évaporée étant proportionnelle à l'humidité absolue, la courbe donnant la masse d'eau évaporée au cours de l'expérience est bien en accord avec ces variations de l'humidité absolue. En sommant la masse d'eau sur toute la durée de l'expérience, nous avons 707 g d'eau extraits soit une vitesse moyenne d'évaporation de l'ordre de 10g/min.

### 2.3. Conclusion mesures et analyses

Les mesures de vitesse ont mis en évidence l'influence des pertes de charge du système et la qualité des gaines d'air. Ces pertes de charge ont fortement influencé le débit du ventilateur donc la mesure du débit a donné les valeurs très inférieures à celles indiquées par sa fiche technique. D'où la nécessité pour les prochains tests d'un ventilateur en supplément pour garantir le débit d'air calculé nécessaire pour le bon fonctionnement du système. Ce manque de vitesse est à l'origine de la forte variation de la température suivant le plan vertical dans les cellules de séchage. Ces tests ont mis en évidence la montée rapide de la température dans le séchoir après le démarrage du brûleur. En fonction de la consigne du thermostat de régulation du brûleur, la température dans les cellules de séchage atteint les valeurs admissibles pour le séchage et peuvent également dépasser ces valeurs. L'homogénéité de la température dans les cellules avec les conditions du système pour ces tests s'établit après un certain temps de fonctionnement. Ces tests ont également permis de mettre en évidence l'indépendance entre les deux cellules de séchage. L'ouverture de l'une d'elles n'influence nullement le fonctionnement de l'autre. L'expérience avec les linges mouillés a mis en évidence les vitesses d'évaporation assez faibles du séchoir. Celles-ci sont dues à de faibles vitesses de circulation de l'air dans le séchoir (pertes de charges trop importants) et aux pertes de charge occasionnées par la disposition des serviettes (circulation verticale de l'air impossible).

## 3. Recommandations

Nous arrivons pratiquement à la fin de notre travail. L'analyse de toutes les activités et actions menées durant tout le projet nous permet de proposer quelques recommandations pour l'amélioration des prochaines activités du projet et le système de séchage mis sur pied dans le cadre de ce projet. Nous allons organiser ses recommandations par activités et actions menées.

### 3.1. Validation du système en fonctionnement réel

Les premiers tests réalisés sur le système sont concluants, mais insuffisants pour la qualification définitive du système. Pour les prochains tests, nous formulons les recommandations suivantes.

- Utilisation des gaines d'air de diamètre 300 mm et plus si disponible pour moins de pertes de charge.
- Adapté un manchon (connecteur) de plus grand diamètre possible pour la connexion du générateur d'air à l'aspiration et pour la sortie d'air.
- Utilisation d'un ventilateur supplémentaire pour le maintien de la pression et la vitesse de l'air en tout point du système.

- Refaire les différents tests effectués avec une longue durée de collecte de données en particulier le test de linges mouillés.
- Pour la validation finale, effectuer plusieurs tests avec les mangues

### 3.2. Coût du système

Le coût d'acquisition du système dans sa forme actuelle est très élevé. Afin de rendre accessible à moyen terme, certains ajustements sont possibles.

- Le générateur d'air en théorie utilisable pour 4 séchoirs et l'échangeur de chaleur avec des technologies importées représentent plus de 75% du coût total du système. Les ingénieurs du CEAS Burkina partenaire technique du projet pourront concevoir et fabriquer des versions locales de chacun de ses éléments afin de le rendre disponible et à moindres coûts.

- Le brûleur à gaz peut être remplacé par un brûleur à combustible solide d'efficacité et rendement équivalents. Ceci permettra de s'affranchir des problèmes liés à la disponibilité, le coût, environnementaux liés aux Gaz butane. L'utilisation des combustibles solides permettra également de valoriser des déchets organiques des industries locales en particulier agro-transformations et la baisse substantielle du coût de combustibles.

- La configuration actuelle du système est défavorable pour son efficacité. Une configuration compacte du système serait mieux. Ceci permettra un gain en perte de charge et un meilleur système de circulation de l'air dans le séchoir. Pour cette configuration compacte, on doit réadapter la semelle afin qu'elle serve de l'antichambre de chauffage d'air de séchage. Pour cela, on doit la construire avec une technologie différente intégrant les matériaux réfractaires pour de grandes températures.

### 3.3. Le design du séchoir optimisé

Le design du séchoir tel qu'il est fait actuellement peut encore être amélioré pour les versions futures.

- Le système d'injection et d'extraction d'air dans le séchoir. Pour la version compacte, l'injection pas le bas serait le mieux adapté et favoriserait l'utilisation de la semelle comme antichambre de chauffage de l'air. L'extraction à plusieurs niveaux à partir de la paroi latérale arrière. Ceci conduit à adapter une double paroi sur cette face afin d'y installer les extracteurs à plusieurs niveaux. Ces nouveaux systèmes d'injection et d'extraction auront un double avantage : - une meilleure circulation de l'air dans le séchoir. – il doublera voire plus la capacité du séchoir. Le casque disparaîtra et les dimensions du box du séchoir augmenteront.

L'extraction d'air peut se faire également sur le toit du séchoir pour la version compacte avec utilisation d'un seul ventilateur de bonnes puissances et on aura le même double avantage.

### **3.4. Valorisation du potentiel solaire**

Les calculs effectués pour les différentes possibilités d'intégrer le chauffage solaire dans le système de séchage nous permettent de recommander des grandes installations solaires ceci pour des sècheries de grandes capacités de transformation. Et l'utilisation d'un système de stockage thermique afin d'améliorer l'efficacité thermique pour la valorisation solaire. Ceci garantir la rentabilité de l'investissement sur le solaire et la diminution des coûts de production du kilogramme de mangues séchées.

## VII. CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, donc l'objectif principal était l'optimisation du séchoir ATESTA du point de vue de la qualité produit avec priorité la mangue et la diminution des coûts de production de ce séchoir notamment par la valorisation du potentiel solaire de la région et l'amélioration des performances énergétiques du séchoir, nous estimons avoir accompli le travail au regard du cahier des charges qui nous a été assigné. L'étude des performances énergétiques du séchoir ATESTA « classique » a permis la quantification des pertes thermiques valorisables et l'inventaire des insuffisances de ce séchoir. Ces résultats ont ensuite permis de définir un cahier des charges pour la conception et la construction du séchoir optimisé ainsi que tous les éléments qui constituent le système de séchage mis sur pied en fin de ce projet. La construction et la mise en œuvre du système complet (**Fig. 19 Annexe II**) sur le site de production ont été une réussite. Les tests « non complets » en fonctionnement réel du système ont produit de bons résultats répondant au cahier de charge de ce travail. Avec ses tests, nous avons eu une distribution homogène de la température et de faibles vitesses de circulation d'air dans les cellules de séchage. Ces faibles vitesses sont naturellement dues aux pertes de charge importantes du système qui ont impacté considérablement les performances du ventilateur du générateur d'air du système. Le test avec le linge mouillé d'une très courte durée a mis en évidence de faibles vitesses d'évaporation du système en dépit de fortes températures d'air mesurées au-dessus de ces linges. Cette situation est naturelle aux vues des faibles vitesses d'air mesurées dans les cellules de séchage pendant ses tests. Nous avons également eu l'occasion d'apprécier le bon fonctionnement de l'échangeur de chaleur et le système de by-pass de son caisson pour le réglage du taux de recirculation d'air dans le système. A l'aide des remarques faites pour ces premiers tests, les prochains tests se feront avec plus de temps d'observations et avec des corrections mineures sur le réseau d'air afin que ses résultats puissent servir à la validation complète de ce nouveau de concept de séchoir ATESTA. Le calcul solaire a montré des possibilités de valorisation du potentiel solaire du lieu de séchage. Nous retiendrons pour une meilleure rentabilité du système de valorisation solaire, on doit privilégier les installations solaires de grandes tailles pour des sécheries de grandes capacités de transformation. Le système actuellement installé est complètement à titre de test ce qui justifie le coût « total » très élevé (**6 658 250.00 CFA**). Notons qu'après la validation complète du concept, une étude sera menée afin de rendre le système plus compact ce qui aboutira à une diminution considérable du coût d'acquisition pour les entrepreneurs locaux.

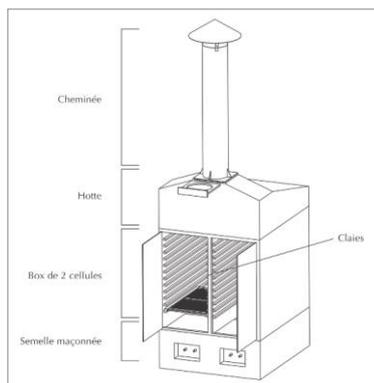
## BIBLIOGRAPHIE

- Arnoldus, M., van der Pol, F., & Ravry, C. (2011). Affaire juteuse ou déception amère: quel est l'avenir des produits dérivés de la mangue au Burkina Faso et au Mali ?, 1–144.
- ATB, A. (n.d.). LesFruitsDeLaSolidarité. Retrieved 24 March 2017, from [http://www.lesfruitsdelasolidarite.com/label/CF-GIE\\_Bobo\\_Dioulasso.php](http://www.lesfruitsdelasolidarite.com/label/CF-GIE_Bobo_Dioulasso.php)
- BCEAO. (2017). Taux d'inflation BCEAO. Retrieved 1 March 2017, from <http://www.bceao.int/Taux-d-interet-et-d-inflation-2431.html>
- Carboni, S. (2016). Carboni, S. Innovations technologiques et petites entreprises d'agro-transformation au Burkina Faso. (2016).
- Carboni, S. (2016). *Les cahiers du ceas*. (CEAS Centre Ecologique Albert Schweitzer, Ed.) (Janvier 20). Neuchâtel: CEAS. Retrieved from <http://www.ceas.ch/publications>
- CEAS Burkina. (2011). *RAPPORT DE RECHERCHE « Soutien à la filière mangue séchée du Burkina Faso »*. Burkina Faso.
- CEAS Suisse. (2011). *Projet soutien à la filière mangue séchées du Burkina Faso* (Vol. 0). Burkina Faso.
- Coulibaly, Y., Danemark, D., & Bernard, B. (2005). *Guide de l'â€™ entreprise de séchage de mangue au Burkina Faso*.
- Eduon, M., Kuitche, A., Marouzé, C., Giroux, F., & Kapseu, C. (2011). Pratique du séchage artisanal de fruit et légume dans le sud du cameroun. *Fruits*, 25–36.
- Guissou, P. and B. S. (1996). *Séchoir à gaz ATESTA*. (CEAS/ATESTA, Ed.) (CEAS Burki). Burkina Faso: CEAS Suisse.
- Jacque, S. (2017). Thermodynamique. Retrieved 25 March 2017, from [http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/uc\\_PresentationCalculateur.html](http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/uc_PresentationCalculateur.html)
- Jannot, Y. (2011). *THERMIQUE SOLAIRE*.
- Konseibo, C. D., & Soulama, S. Y. (2015a). *Projet amélioration des outils et des technique de production de mangues séchées au Burkina Faso*.
- Konseibo, C. D., & Soulama, S. Y. (2015b). *Rapport des travaux de recherche d'amélioration du séchoir à Gaz ATESTA*. Burkina Faso.
- Meteonorm. (2017). Meteonorm. Retrieved from [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com)
- Michel, R., Coulibaly, Y., Mathieu, B., & Jean, M. M. (2005). Amélioration des outils et techniques de production de la mangue séchée au Burkina Faso. Burkina Faso.
- ProliTec. (2016). Séchoirs alimentaires Commerciaux. Retrieved from <http://www.fumoir.net/deshydrateur-alimentaire/105-deshydrateur-alimentaire-st6-100.html>
- Rivier, M., Méot, J., Ferré, T., & Briard, M. (2009). *Le séchage des mangues*. éditions QUAÉ. Retrieved from [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=WffIRbU87rMC&oi=fnd&pg=PA9&dq=modélisation+du+séchage+de+fruits&ots=l\\_HTxWvJPT&sig=yon6OabCe4YkfziMeci1vkbY2\\_g](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=WffIRbU87rMC&oi=fnd&pg=PA9&dq=modélisation+du+séchage+de+fruits&ots=l_HTxWvJPT&sig=yon6OabCe4YkfziMeci1vkbY2_g)

## ANNEXE I.



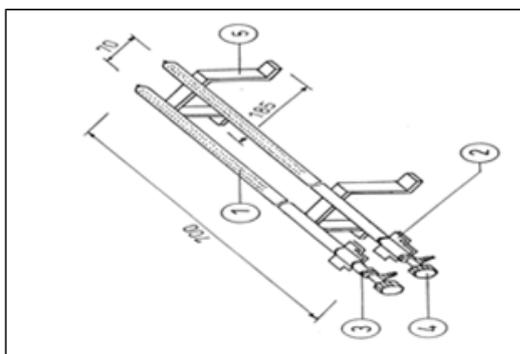
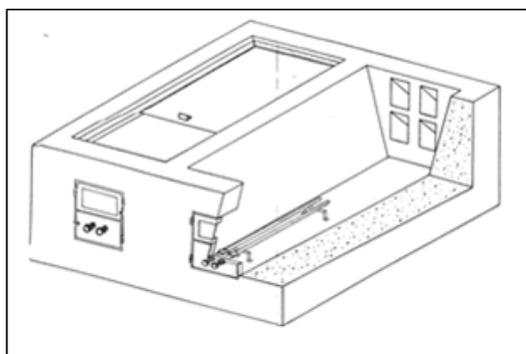
**Fig. 1** Séchoir Solaire Direct de type tunnel (Simone Carboni, 2016)



b) Sur le site de production

b) Plan en 3D

**Fig. 2** Séchoir ATESTA (Simone Carboni, 2016)



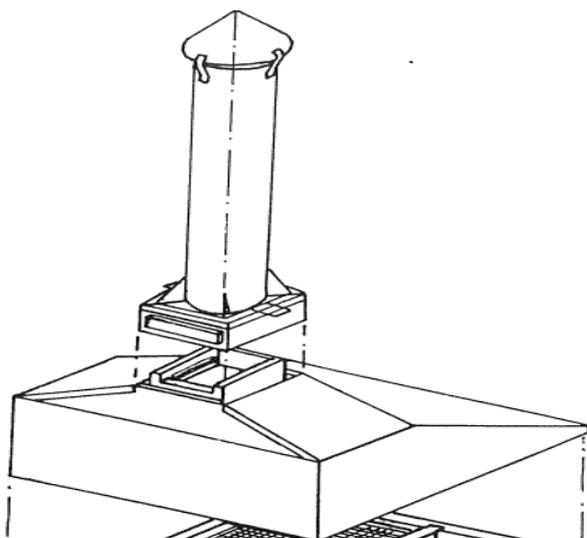
a)

b)

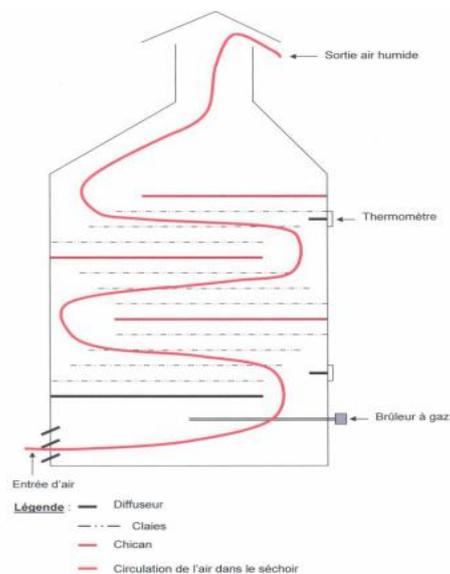
**Fig. 3** a) semelle vu 3D b) Brûleur à gaz de type rampe



**Fig. 4.** Image d'une claie en bois et grillage en inox (source : CEAS Burkina)



**Fig. 5** Assemblage casque et cheminée du séchoir ATESTA (Guissou, 1996)



**Fig. 6** Schéma de circulation d'air dans le séchoir ATESTA classique

## Annexe II

### ➤ Ventilateur générateur d'air chaud

**tableau 1** Caractéristique ventilateur générateur d'air

Type	Référence	tension alimentation (volt)	courant (A)	puissance électrique (kW)	débit (m3/h)	Variateur de vitesse
Centrifuge	720381370	220 - 230	6.06	0.75	2000	non



**Fig. 7** Ventilateur du générateur d'air

- Echangeur chaleur du générateur



**Fig. 8** Echangeur de chaleur du générateur : copie CEA BF et version originale

- Bruleur à gaz LG90



**Fig. 9** Brûleur à gaz LG90

**tableau 2** Caractéristiques technique brûleur à Gaz

Fuel	Débit gaz(m3/h)	Pression alimentation (mbar)	Puissance thermique(kWth)	Puissance électrique(kW)	tension alimentation (V)	poids(kg)
LPG	1.5 - 3.3	2 à 20	40 -85	0.4	230 V 1N	14

➤ Plaque électrique du générateur



**Fig. 10** Plaque électrique du générateur d'air chaud

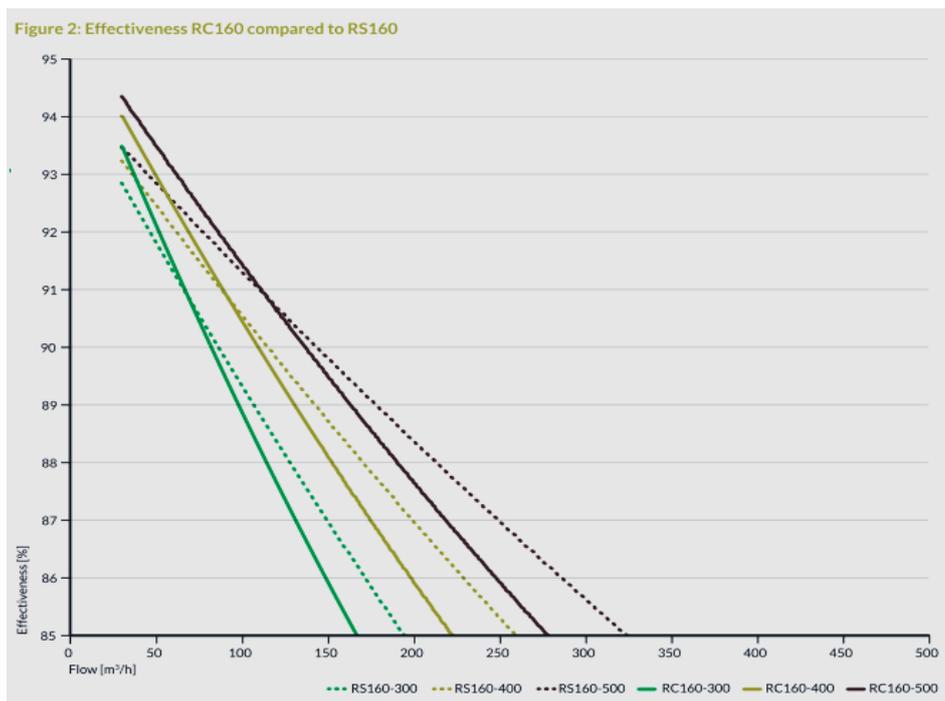
➤ Echangeur Recair



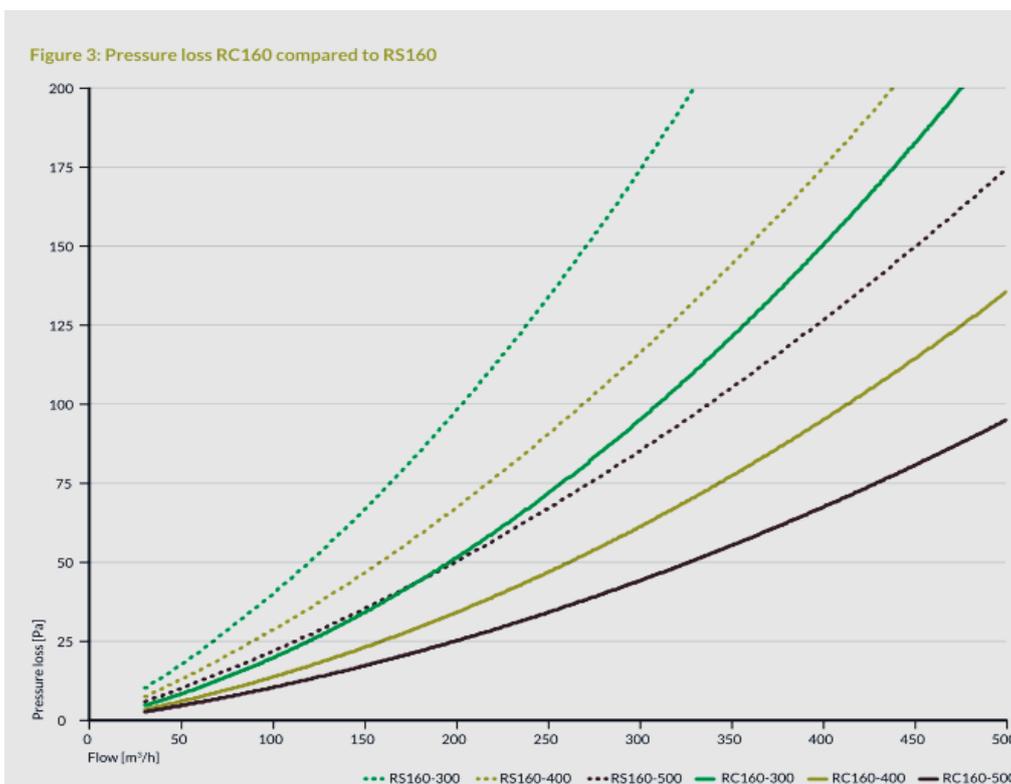
**Fig. 11** Echangeur Air - Air Recair 1



**Fig. 12** Echangeur Air - Air Recair 2



**Fig. 13** Echangeur Recair : caractéristiques efficacité en fonction du débit d'air vicié



**Fig. 14** Echangeur Recair pertes de charge

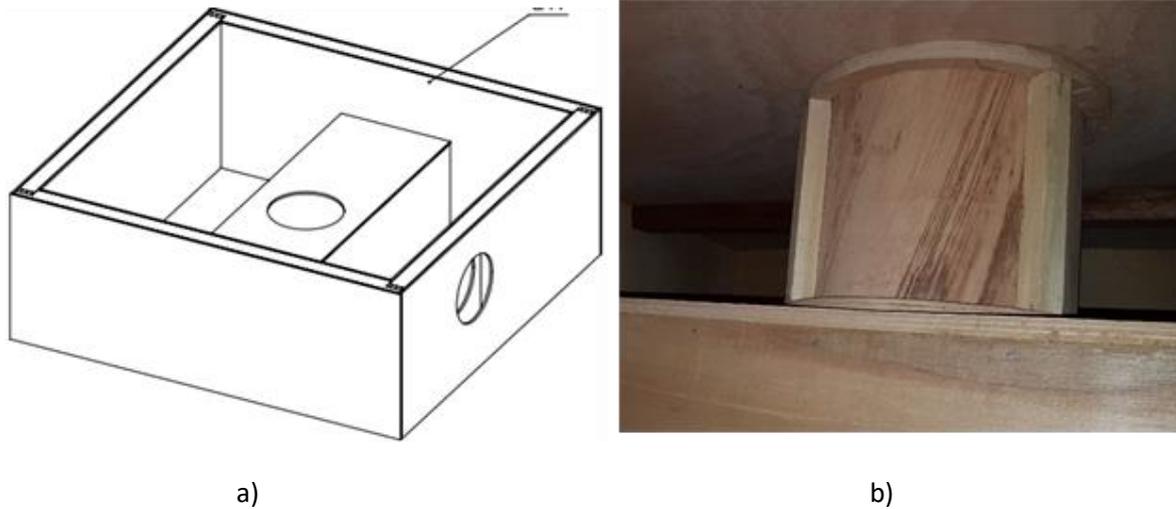


Fig. 15 Casque séchoir a) Vue 3D intérieure- b) liaison caisson interne et paroi externe

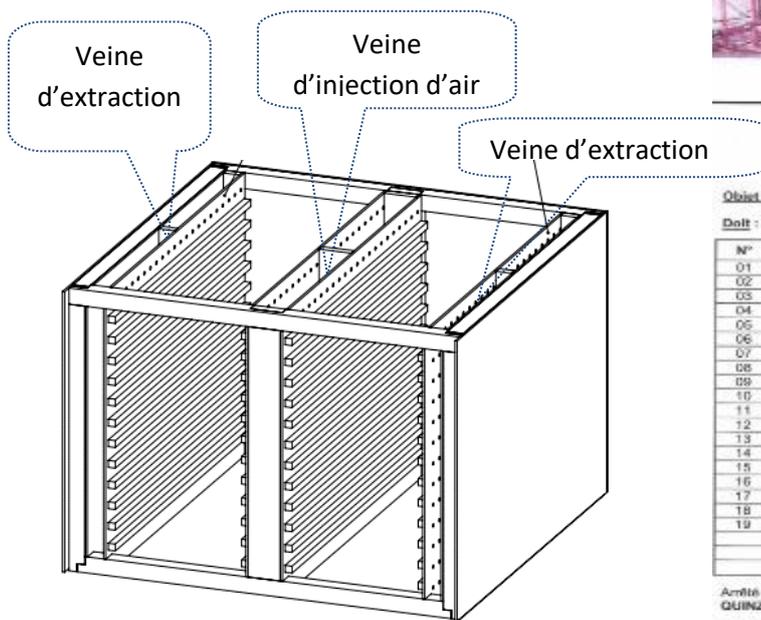


Fig. 16 Vue 3D du box du séchoir optimisé

Ouagadougou, le 01/03/2017

**FACTURE PROFORMA**

Objet : Séchoir à gaz amélioré  
Dait : CEAS COBF

N°	Désignation	Quantité	Prix unitaire	Prix total
01	Chevron rouge 8/8	09	15.000	135.000
02	Basting rouge	06	15.000	90.000
03	Contreplaqué de 10mm	19	9.000	171.000
04	Préparation à la machine	-	-	50.000
05	Claires (155 x 72)	22	8.000	176.000
06	Colle sauder	06	3.500	21.000
07	Pointes	05	1.000	5.000
08	Vis	02	3.000	6.000
09	Colle scellie	03	7.000	21.000
10	Eponge de 4	01	9.000	9.000
11	Moquette	01m²	13.000	13.000
12	Tige fileté de portier	01	6.000	6.000
13	Portier	01	85.000	85.000
14	Thermomètre	04	19.000	76.000
15	Fils	-	-	75.000
16	Porte métallique	-	-	189.000
17	Charge d'exportation	-	-	159.500
18	Risque et bénéfices	-	-	113.200
19	Transport	-	-	30.000
Total matériel				1.445.000
Main d'œuvre				130.000
<b>TOTAL GENERAL</b>				<b>1.575.000</b>

Amélié la facture proforma à la somme de : UN MILLION CINQ CENT SOIXANTE QUINZE MILLE (1.575.000) FRANCS CFA.

Le Responsable

Fig. 17 Facture pro-forma construction séchoir



**A.M.M.T**

Atelier de Menuiserie et Meuble Technique  
Spécialité Séchoir à gaz, Couveuse, Eleveuse, Ruche  
Kenya, Métier à tisser grand format  
Email kpatigma@yahoo.fr  
Tel : 70 39 05 58 / 78 22 16 45

Ouagadougou, le 09/03/2017

**FACTURE PROFORMA**

**Objet :** BOX ECHANGEUR

**Doit :** CEAS COBF

N°	Désignation	Quantité	Prix unitaire	Prix total
01	Contreplaqué de 20mm	03	20.000	60.000
02	Planche	03	8.000	24.000
03	Pointe	05	1.000	5.000
04	Colle sader	04	3.500	14.000
05	Préparation	-	15.000	15.000
06	Mastique	02	6.000	12.000
07	Peinture faume	05	2.000	10.000
08	Peinture à huile	04 boîtes	9.000	36.000
09	Essence	10 litres	600	6.000
10	Tige métallique	-	30.000	30.000
11	Transport	-	25.000	25.000
12	Charge d'exploitation	-	-	37.200
13	Risque et bénéfice	-	-	24.800
<b>Total matériel</b>				<b>299.000</b>
<b>Main d'œuvre</b>				<b>100.000</b>
<b>TOTAL GÉNÉRAL</b>				<b>399.000</b>

Arrêté la facture proforma à la somme de : TROIS CENT QUATRE VINGT DIX  
NEUF MILLE (399.000) FRANCS CFA./

Le Responsable  
ATELIER DE MENUISERIE  
MEUBLE TECHNIQUE  
70 39 05 58 / 78 22 16 45  
KABRE Patigma

**Fig. 18** Facture pro-forma construction caisson échangeur



**Fig. 19** Caisson de l'échangeur de chaleur Recair



**Fig. 20** Vues d'ensemble du système de séchage

➤ Instruments de mesures



Fig. 21 Thermo-anémomètre à hélice HD300



Fig. 23 Thermocouple Haute température

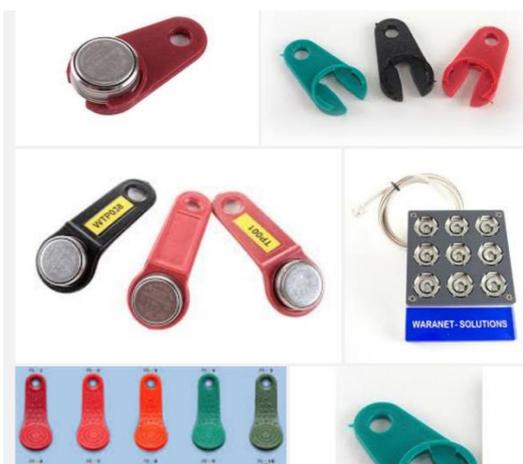


Fig. 22 ThermoPuce et lecteur de puces



Fig. 24 ThermoData mesure température et hygrométrie

## Annexe III.

**Tableau. 1** Comparaison et composition des principales variétés de mangues (Rivier et al , 2009)

Variétés	Masse moyenne d'un fruit (kg)	Fraction en masse de la peau	Fraction en masse du noyau	Fraction en masse de la pulpe
Amélie	0.400	8.1	5.1	86.8
Brooks	0.550	14.2	5.6	80.2
Kent	0.775	13.4	6.2	80.4

**Tableau. 2** Composition de la pulpe de mangue fraîche (Amélie)

Variété	mase de pulpes fraîches(kg)	teneur en eau initiale	mase d'eau initiale (kg)	teneur en eau finale produit séché	eau libre à extraire(kg)	eau liée à extraire (kg)	masse totale à extraire (kg)	Masse produit final
Amélie	100	85%	85	15%	68	14.35	82.35	17.65

**Tableau. 3** Paramètres de l'air ambiant

Air	(kJ/kgas/°C)
Cp air sec	1.0032
Cpv vapeur d'eau	1.9228
Lv chaleur lat d'évaporation à 1 atm	2491.28
temperature ambiante (°C)	27.83
Humidité relative Hra (%)	70.13
Préssion atmosphérique (Pa)	1013000
Masse molaire vapeur eau (kg/mol)	0.018
Masse molaire air sec (kg/mol)	0.029
Masse volumique (kg/m3)	1.233
Constante des gaz Parfaits	8.3144
Pression saturation de la vapeur	37606.4927
Humidité absolue Xa (kg/kgas)	0.01659
Enthalpie Totale (kJ/kg.as)	70.1419424

**Tableau. 4** Paramètres de l'air à la sortie de la chambre de chauffage

Propriétés de l'air chaud et sec	première Phase	Seconde Phase
Température sèche (°C)	80	50
Cp air sec (kJ/kgas/°C)	1.0032	1.0032
Cpv vap d'eau (kJ/kgas/°C)	1.9228	1.9228
Lv à 1 atm (kJ/kgas/°C)	2491.28	2491.28
Humidité relative Hrs (%)	5.5070126	21.158533
Humidité absolue Xa (kg/kgas)	0.01659	0.01659
Température humide (°C)	34.74	28.87
Pression saturation de la vapeur (Pa) à Ts	478910.53	124647.882
Enthalpie Totale (kJ/kg.as)	124.142911	93.0898321
Pression saturation de la vapeur (Pa) à Th	55836.7299	39965.3857
Humidité absolue Xsat (kg/kgas) à Th	0.03620833	0.02549354
vitesse de séchage (Kg vap/h)	6.8	1.475

**Tableau. 5** Paramètres de l'air dans la cheminée : Fonctionnement réelle du séchoir.

Propriétés de l'air dans la cheminée	première Phase	Seconde Phase
Température sèche (°C)	58.48	46.07
Cp air sec (kJ/kgas/°C)	1.0032	1.0032
Cpv vap d'eau (kJ/kgas/°C)	1.9228	1.9228
Lv à 1 atm (kJ/kgas/°C)	2491.28	2491.28
Humidité relative Hrs (%)	21.01	28.18
Humidité absolue Xa (kg/kgas)	0.0251	0.0182
Pression saturation de la vapeur (Pa) à T2	187711.979	102233.595
Enthalpie Totale (kJ/kg.as)	124.143	93.090

**Tableau. 6** Paramètres de l'air dans la cheminée : Fonctionnement théorique du séchoir.

Propriétés de l'air état de saturation	première Phase	Seconde Phase
Température sèche (°C)	34.74	28.87
Cp air sec (kJ/kgas/°C)	1.0032	1.0032
Cpv vap d'eau (kJ/kgas/°C)	1.9228	1.9228
Lv à 1 atm (kJ/kgas/°C)	2491.28	2491.28
Humidité relative Hrs (%)	100	100
Humidité absolue Xa (kg/kgas)	0.03621	0.02549
Pression saturation de la vapeur (Pa) à Ts	55836.7299	39965.38569
Enthalpie Totale (kJ/kg.as)	124.142911	93.0898321
<b>vitesse de séchage théorique (Kg vap/h)</b>	<b>15.596108</b>	<b>8.327206137</b>

**Tableau. 7** détaille calculs de pertes de charges séchoir

Point	Correspond à	Vitesse fluide [m/s]	Pression dynamique [Pa]	Type de PdC	Reynolds	Coefficient	Perte de charge [Pa]
0-1	Sortie tuyau / Entrée caisson	6.86063908	21.43964189	Elargissement brusque		1	21.43964189
1	Caisson	0.693578375	0.219118713	Régulière			0
1-2	Sortie caisson / Entrée veine de soufflage E		0.219118713	rétrécissement brusque		0.6	0.131471228
2	Veine de soufflage E	2.334183673	2.481752313	Régulière	23686.35948	1.649170719	4.092833247
2-3	Sortie veine de soufflage E / Entrée trous E		2.481752313	Entrée canalisation brusque		0.5	1.240876157
3	Trous	5.507506041		Régulière			0
3-4	Sortie trous E / Entrée antichambre séchage		13.81650968	Elargissement brusque		1	13.81650968
4	Antichambre de séchage	0.25	0.02846875	obstacle présence claie + mangué		1.5	0.042703125
4-5	Sortie antichambre séchage / Entrée trous S		0.02846875	Entrée canalisation brusque		0.5	0.014234375
5	Trous	5.507506041		Régulière			0
5-6	Sortie trous / Entrée veine aspiration S		13.81650968	Elargissement brusque		1	13.81650968
6	Veine d'aspiration S	2.334183673	2.481752313	Régulière	12376.65631	2.270642938	5.635173364
6-7	Sortie veine d'aspiration S / Entrée Casque		2.481752313	Entrée canalisation brusque		0.5	1.240876157
7-8	Casque	0.229529534	0.023997474	Régulière	8683.216208	2.693707807	0.096963275
8-9	Sortie casque /entrée Tuyau	6.86063908	21.43964189	rétrécissement brusque		0.5	10.71982095
<b>Somme</b>							<b>61.4708289</b>

**Tableau. 8** Résultat calcul taux de couverture solaire

Besoin en énergie sur une campagne (kWh)	Production Capteur sur une campagne(kWh)	Production Capteur valorisée sur une campagne (kwh)	Fraction production capteur Valorisée(%)	Rendement capteur(%)	Nombre de capteurs solaire à Air	Surface totale de captation(m <sup>2</sup> )	taux de couverture solaire (%)	Consommation du gaz sur une campagne (kg)	Economie du gaz Sur une campagne(kg)
16457.778	1022.038	1022.038	100.000	70	1	2.54	6.21	1288	79.99
16457.778	2044.075	2044.075	100.000	70	2	5.08	12.42	1288	159.97
16457.778	4088.151	4088.151	100.000	70	4	10.15	24.84	1288	319.94
16457.778	6132.226	6132.226	100.000	70	6	15.23	37.26	1288	479.91
16457.778	8176.301	7931.655	97.008	70	8	20.30	48.19	1288	620.74
16457.778	10220.377	8917.592	87.253	70	10	25.38	54.18	1288	697.90
16457.778	12264.452	9514.828	77.581	70	12	30.45	57.81	1288	744.64
16457.778	14308.528	9918.088	69.316	70	14	35.53	60.26	1288	776.20

## ANNEXE IV. Présentation du cadre d'accueil du stage et de travail

### 3.5. Le Laboratoire LESBAT

Le Laboratoire d'Énergie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT) est le requérant principal du projet. Le LESBAT est l'un des multiples laboratoires de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD). La Heig-VD fait partie des réseaux des Hautes Ecoles Spécialisées de la Suisse occidentale (HES-SO). Créé initialement pour le renforcement de l'enseignement des techniques énergétiques à la Heig-VD, le LESBAT est aujourd'hui une référence nationale dans le domaine de l'efficacité énergétique et la réduction des impacts environnementaux des bâtiments. Ses activités sont aujourd'hui très variées principalement la recherche Appliquée dans le domaine de l'énergie solaire, la formation des futurs ingénieurs, le renforcement des capacités des professionnels dans des domaines de compétences du LESBAT. Le laboratoire est spécialisé dans les domaines suivants :

- L'optimisation énergétique des bâtiments pour la réduction de leur consommation énergétique primaire
- La Promotion des énergies renouvelables en particulier le solaire thermique pour le chauffage et la climatisation.
- La réduction de la charge environnementale de l'énergie et des matériaux de construction des bâtiments.

Dans le domaine de l'enseignement professionnel et le renforcement des capacités, le LESBAT offre ses services pour des activités suivantes :

- La formation des futurs ingénieurs de la HEIG-VD dans des domaines variés tels que les technologies de l'énergie solaire, le bâtiment et le montage, gestion et management de projets
- L'offre de formation continue et le développement des outils d'aide à la conception pour les professionnels

L'équipe du LESBAT est composée d'un chef de Laboratoire, d'assistants scientifiques, de collaborateurs scientifiques, de chefs de projet, des ingénieurs de recherches et du personnels administratif.

### **3.6. Le Laboratoire d'Énergie Solaire et économie d'énergie**

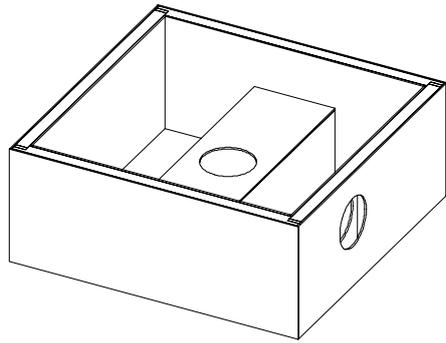
Le Laboratoire d'Énergie Solaire et Economie d'Énergie (LESEE) est l'un des partenaires du projet. Il intervient sur le volet recherche et formation académique du projet. Le LESEE est un laboratoire du département Énergie et industriel de l'institut international de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE). Le 2iE a une renommée internationale reconnue dans le domaine de l'enseignement supérieur et de recherche appliquée spécialisée dans les domaines de l'eau, l'assainissement, l'énergie, le génie civile et les mines, le Management et l'entrepreneuriat. Dans le domaine de la recherche, le 2iE compte cinq laboratoires avec des lignes de recherches variées savoir : l'eau et l'environnement, les matériaux de construction, et l'énergie. Le LESEE est spécialisé dans les domaines de la recherche appliquée en énergie, la formation continue des futurs ingénieurs et de professionnels, l'offre d'expertise dans différents domaines de l'énergie. L'équipe de recherche du LESEE est composée d'un chef de Laboratoire, des chercheurs seniors et juniors, des ingénieurs de recherche et les agents administratif. Les domaines d'expertise sont entre autres l'efficacité énergétique, les systèmes d'énergie renouvelable, le génie industriel et management de l'énergie.

### **3.7. Le Centre Ecologique Albert Schweitzer**

Le Centre Ecologique Albert Schweitzer(CEAS) est une ONG Suisse créé en 1980 dont le siège général est à Neuchâtel – Suisse. Elle œuvre dans le développement durable et la lutte contre la pauvreté en Afrique Subsaharienne et Madagascar. Les quatre domaines dans lesquels elle mène ses actions sont l'artisanat et énergie renouvelables, l'agriculture durable, la transformation agroalimentaire, l'eau et l'assainissement. Sa mission est le développement d'innovations technologiques pour la lutte contre la pauvreté et le transfert de technologie aux paysans, artisanat et les petits entrepreneurs Africain et Madagascar. Pour la mise en œuvre et la conduite de ses projets sur le continent, l'ONG possède des bureaux dans les pays africains sur lesquels leurs activités sont plus concentrés le Burkina Faso, le Sénégal et Madagascar. Le CEAS Burkina est la branche totalement indépendante du CEAS suisse qui s'est

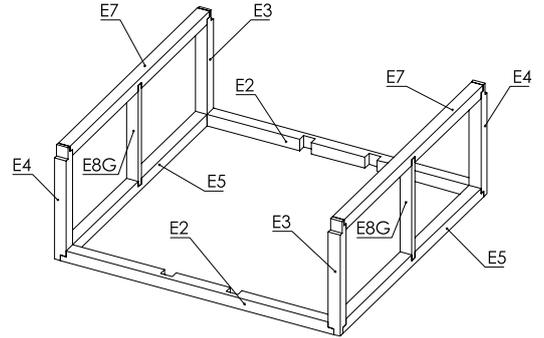
nationalisé et travaille aujourd'hui en étroite collaboration avec le CEAS suisse pour la mise en œuvre des projets sur le territoire Burkinabé.

## **ANNEXE V . Plans détaillés du séchoir et du caisson de l'échangeur**



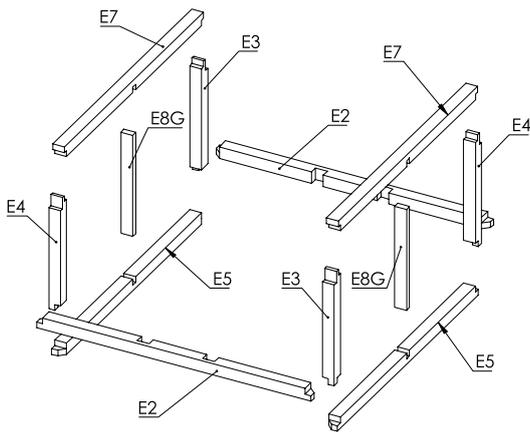
			TOIT SECHOIR	
A4			1	
MNG LESBAT 15.02.2017			TOIT SECHOIR ASSEMBLE	
ECHELLE: 1:20			MASSE:	

4 3 2 1  
4 3 2 1



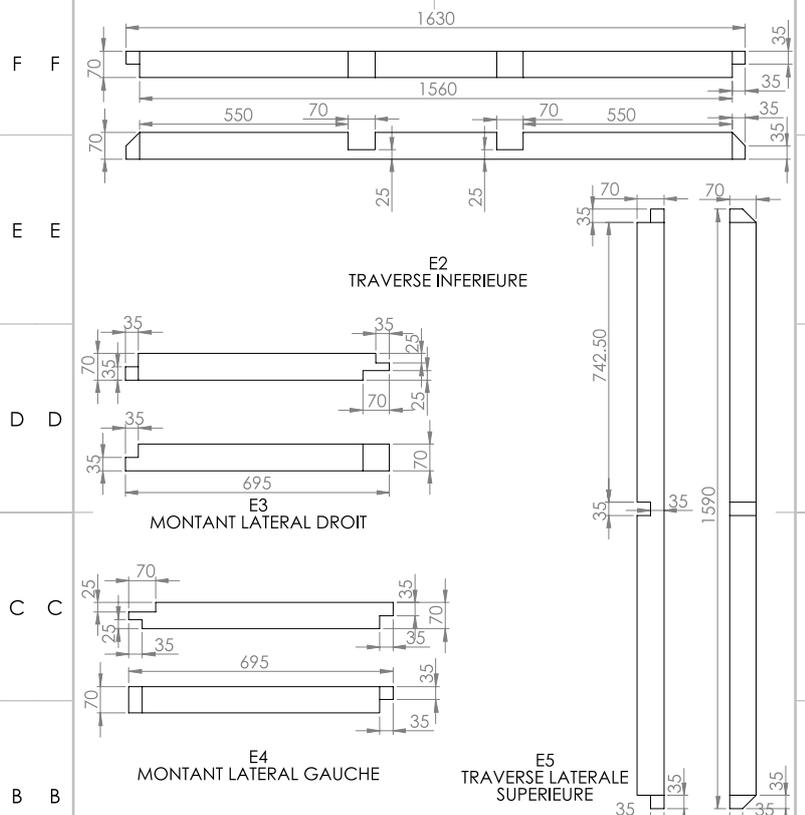
			CADRE TOIT SECHOIR	
A4			2	
MNG LESBAT 15.02.2017			CADRE TOIT SECHOIR ASSEMBLE	
ECHELLE: 1:20			MASSE:	

4 3 2 1  
4 3 2 1



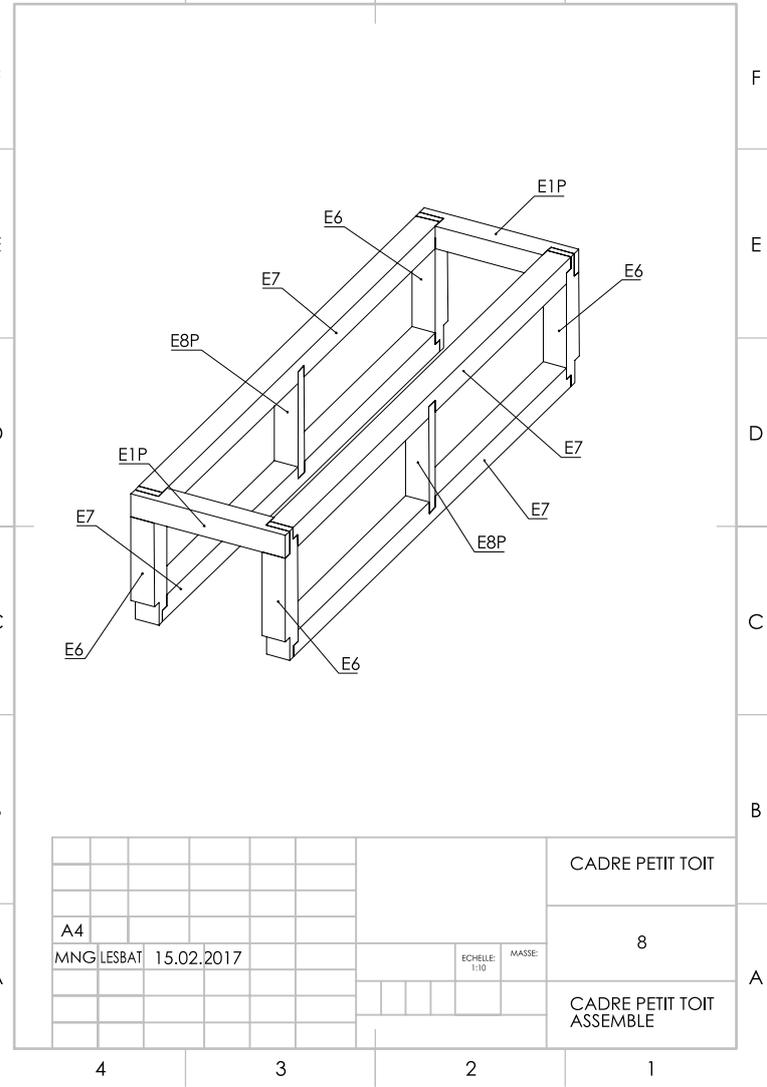
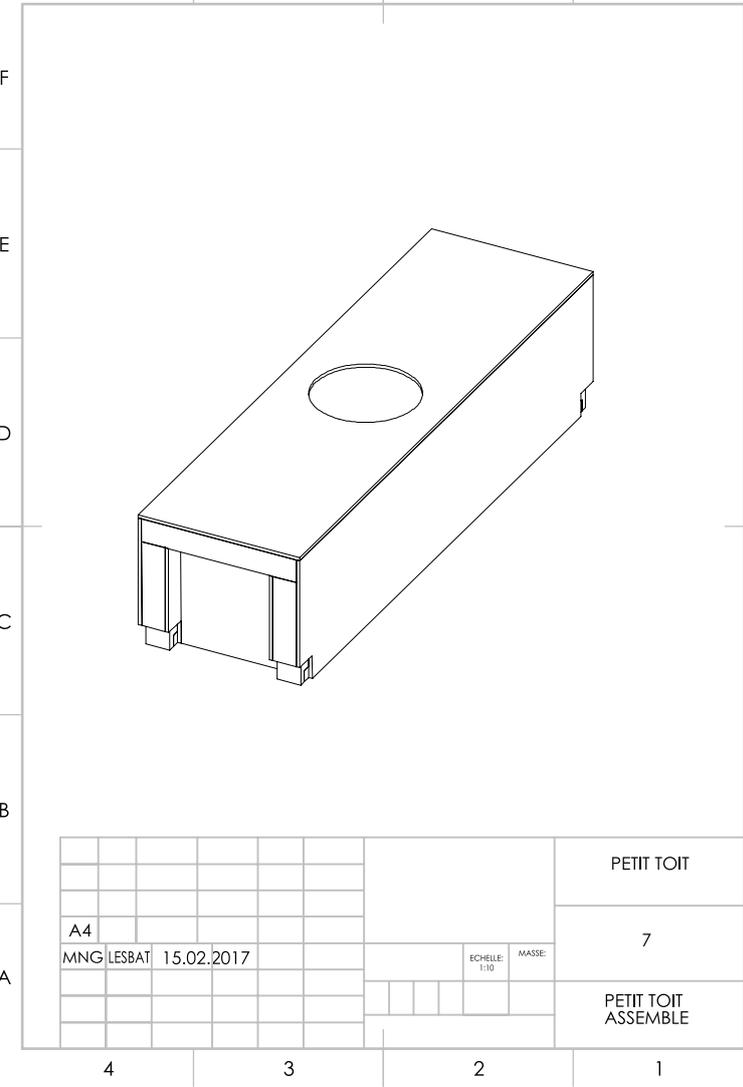
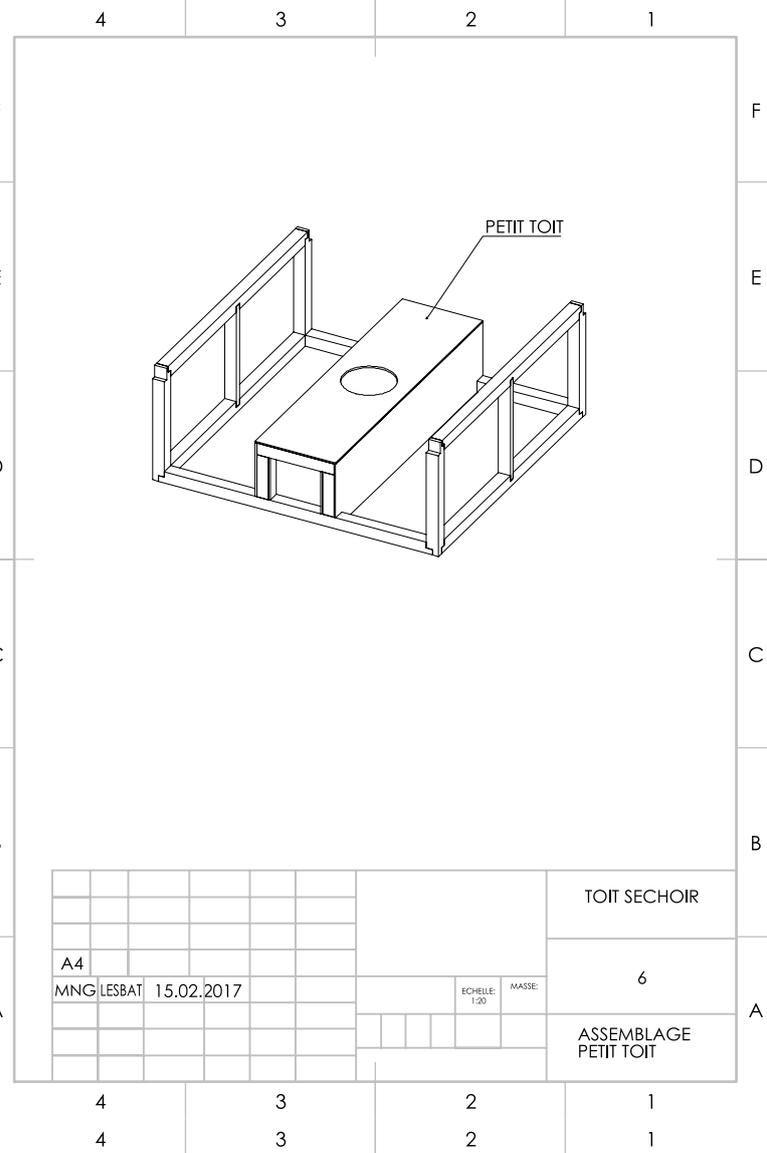
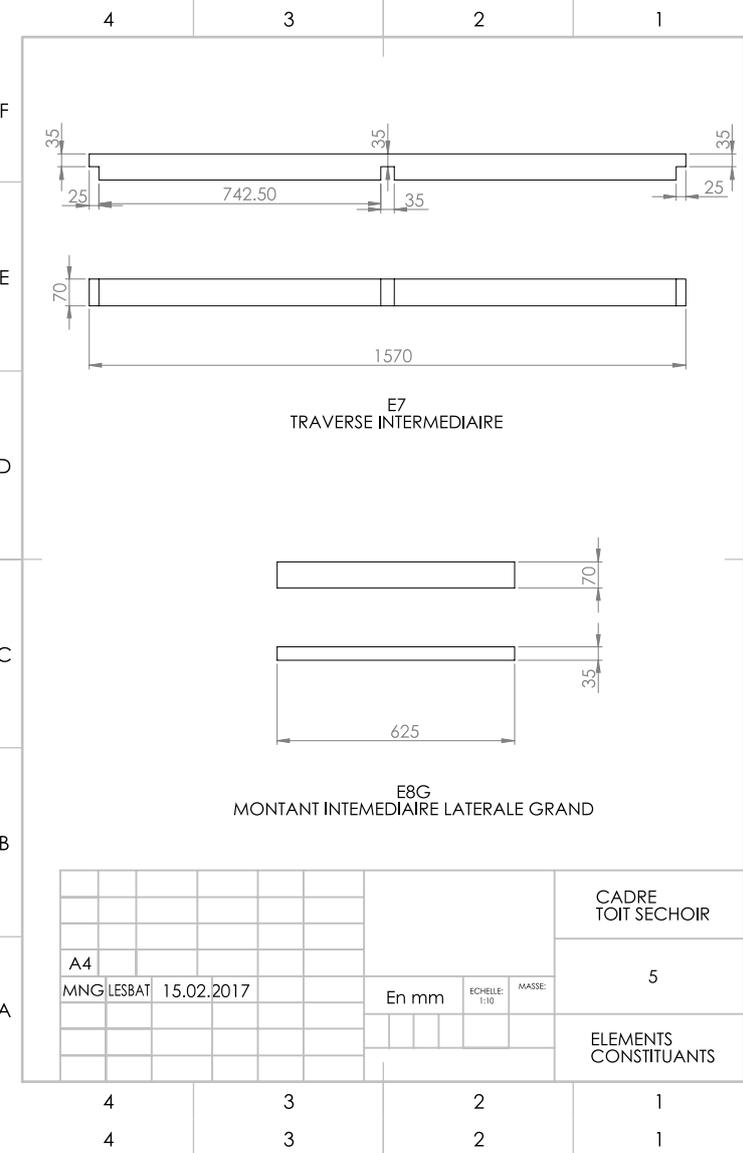
			CADRE TOIT SECHOIR	
A4			3	
MNG LESBAT 15.02.2017			CADRE TOIT SECHOIR VUE ECLATEE	
ECHELLE: 1:20			MASSE:	

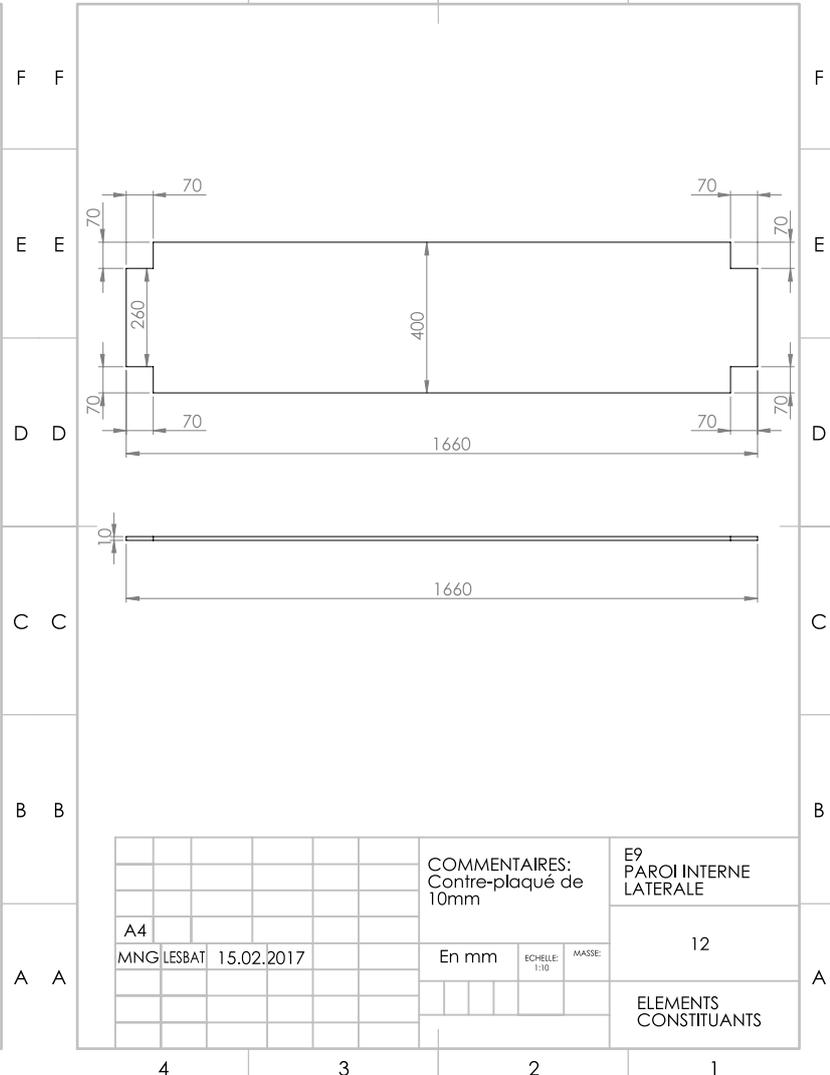
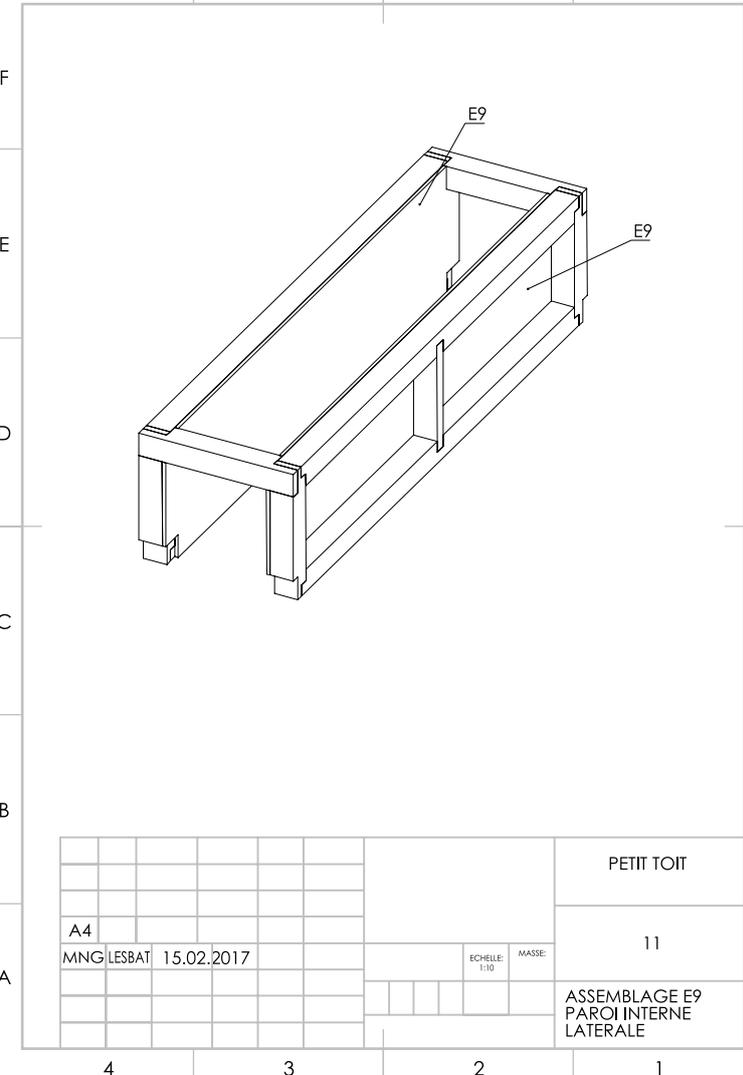
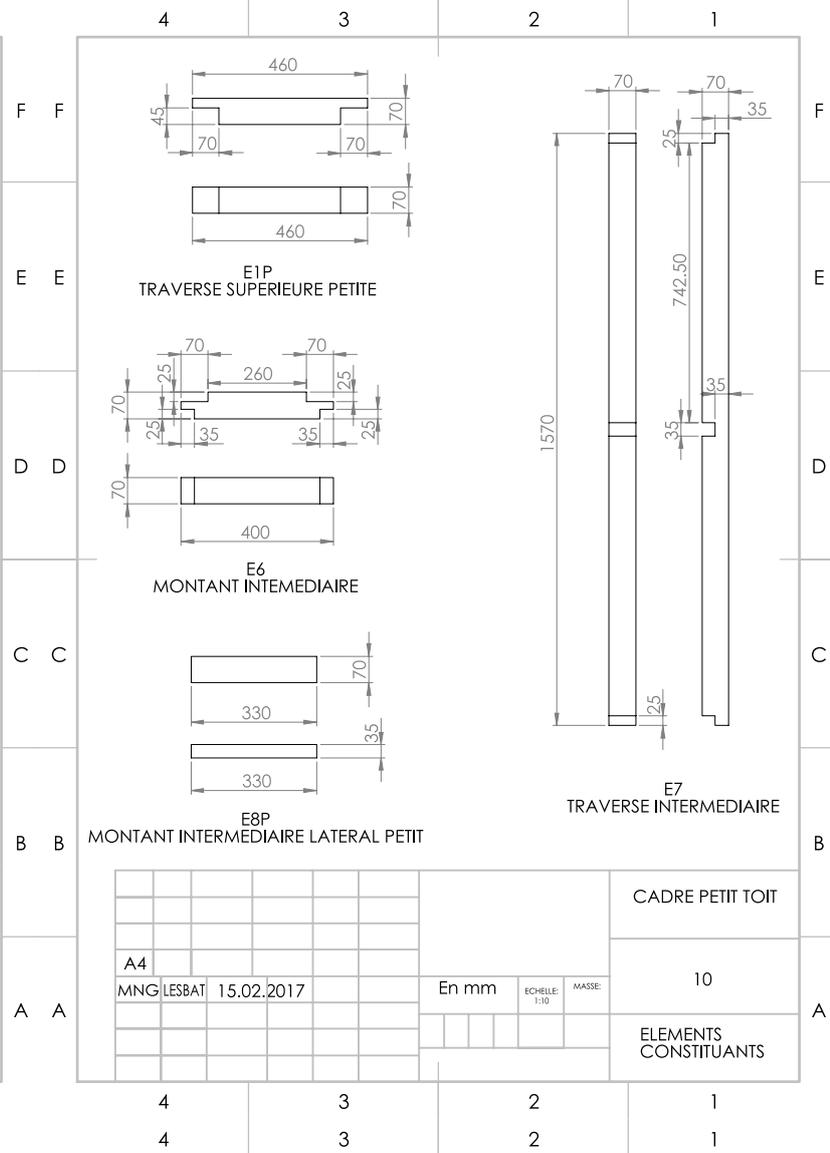
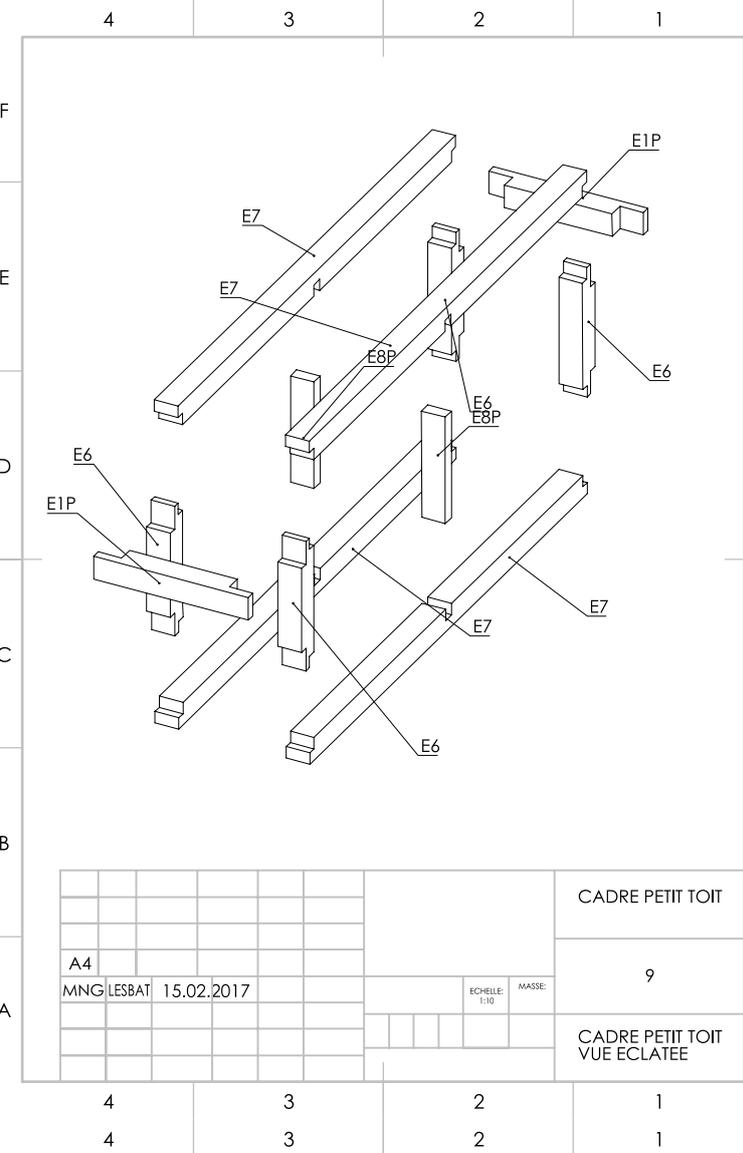
4 3 2 1



			CADRE TOIT SECHOIR	
A4			4	
MNG LESBAT 15.02.2017			ELEMENTS CONSTITUANTS	
En mm			ECHELLE: 1:10	
			MASSE:	

4 3 2 1





4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

E10

E10

			PETIT TOIT
			13
A4			ASSEMBLAGE E10 PAROI INTERNE AV/AR
MNG	LESBAT	15.02.2017	
		ECHELLE: 1:10	MASSE:

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

400

300

10

400

			COMMENTAIRES: Contre-plaqué de 10mm	E10 PAROI INTERNE AV/AR
			En mm	14
A4				
MNG	LESBAT	15.02.2017	ELEMENTS CONSTITUANTS	

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

E11

E11

			PETIT TOIT
			15
A4			ASSEMBLAGE E11 PAROI EXTERNE LATERALE
MNG	LESBAT	15.02.2017	
		ECHELLE: 1:10	MASSE:

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

1660

10

1660

400

70

70

1520

70

70

			COMMENTAIRES: Contre-plaqué de 10mm	E11 PAROI EXTERNE LATERALE
			En mm	16
A4				
MNG	LESBAT	15.02.2017	ELEMENTS CONSTITUANTS	

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

E12

			PETIT TOIT	
A4			17	
MNG	LESBAT	15.02.2017	ECHELLE: 1:10	MASSE:
			ASSEMBLAGE E12 PAROI SUPERIEURE AVEC TROU	

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

10

480

240

1660

830

$\varnothing 300$

1660

			COMMENTAIRES: Contre-plaqué de 10mm		E112 PAROI SUPERIEURE AVEC TROU	
A4			18			
MNG	LESBAT	15.02.2017	En mm	ECHELLE: 1:10	MASSE:	
			ELEMENTS CONSTITUANTS			

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

E1G

E1G

			TOIT SECHOIR	
A4			19	
MNG	LESBAT	15.02.2017	ECHELLE: 1:20	MASSE:
			ASSEMBLAGE E1G TRAVERSE SUPERIEURE GRANDE	

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

45

70

70

1560

70

45

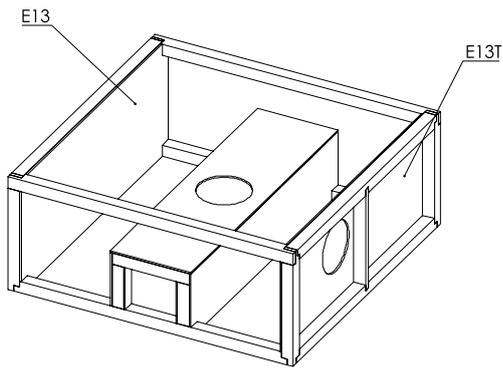
70

1700

			E1G TRAVERSE SUPERIEURE GRANDE		
A4			20		
MNG	LESBAT	15.02.2017	En mm	ECHELLE: 1:10	MASSE:
			ELEMENTS CONSTITUANTS		

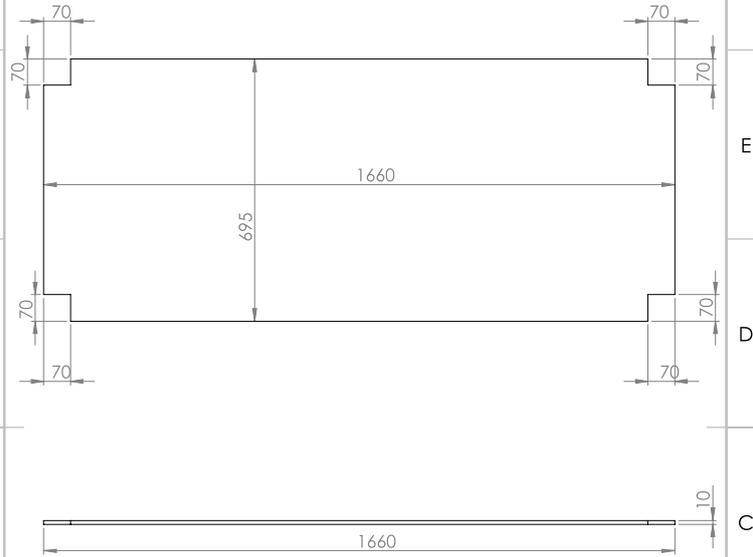
4 3 2 1

4 3 2 1



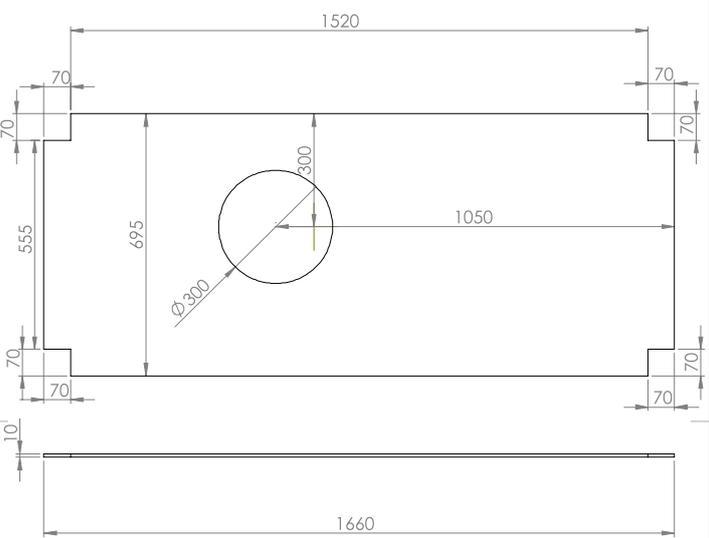
			TOIT SECHOIR	
A4			21	
MNG	LESBAT	15.02.2017	ECHELLE: 1:20	MASSE:
			ASSEMBLAGE E13 PAROI INTERNE LATERALE	

4 3 2 1  
4 3 2 1



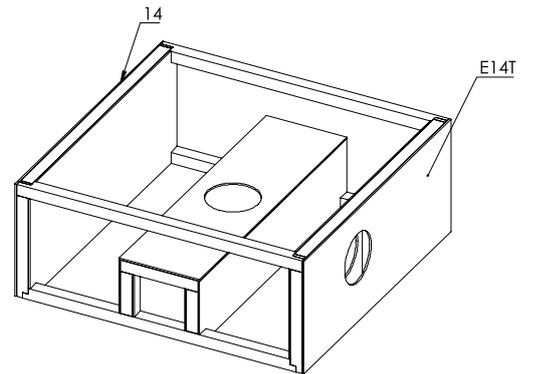
			COMMENTAIRES: Contre-plaqué de 10mm		E13 PAROI INTERNE LATERALE	
A4			22			
MNG	LESBAT	15.02.2017	En mm	ECHELLE: 1:10	MASSE:	
			ELEMENTS CONSTITUANTS			

4 3 2 1  
4 3 2 1



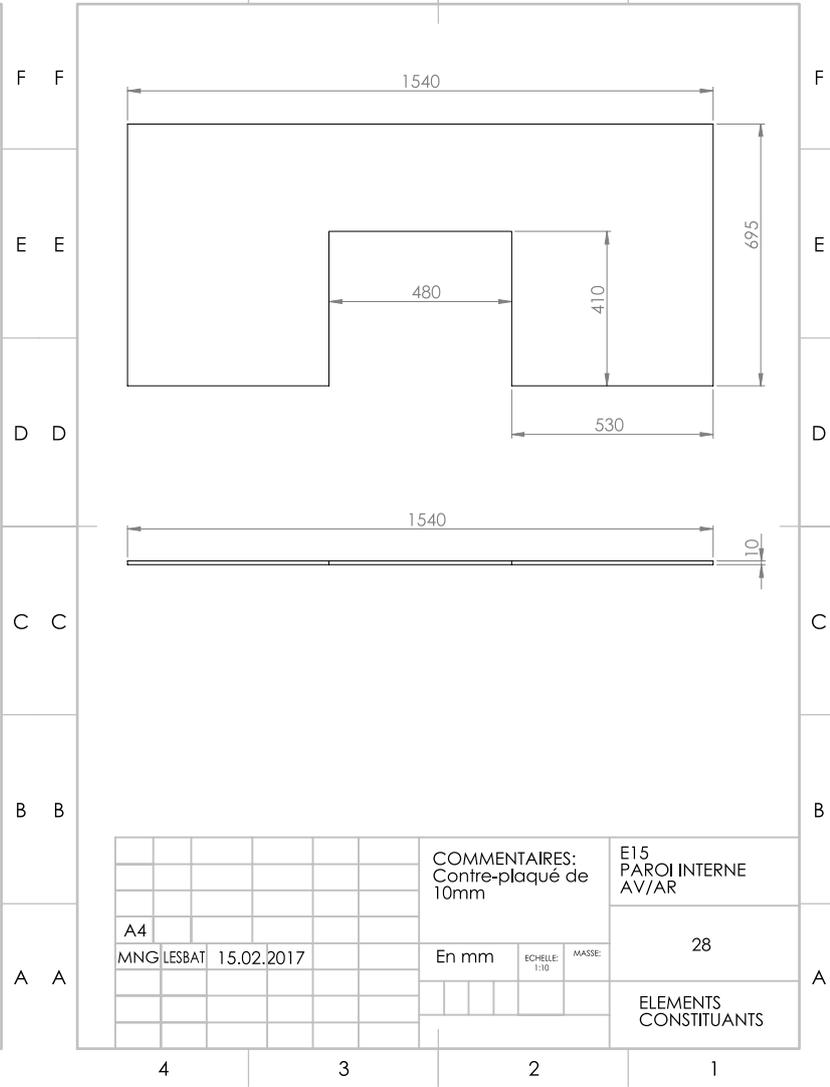
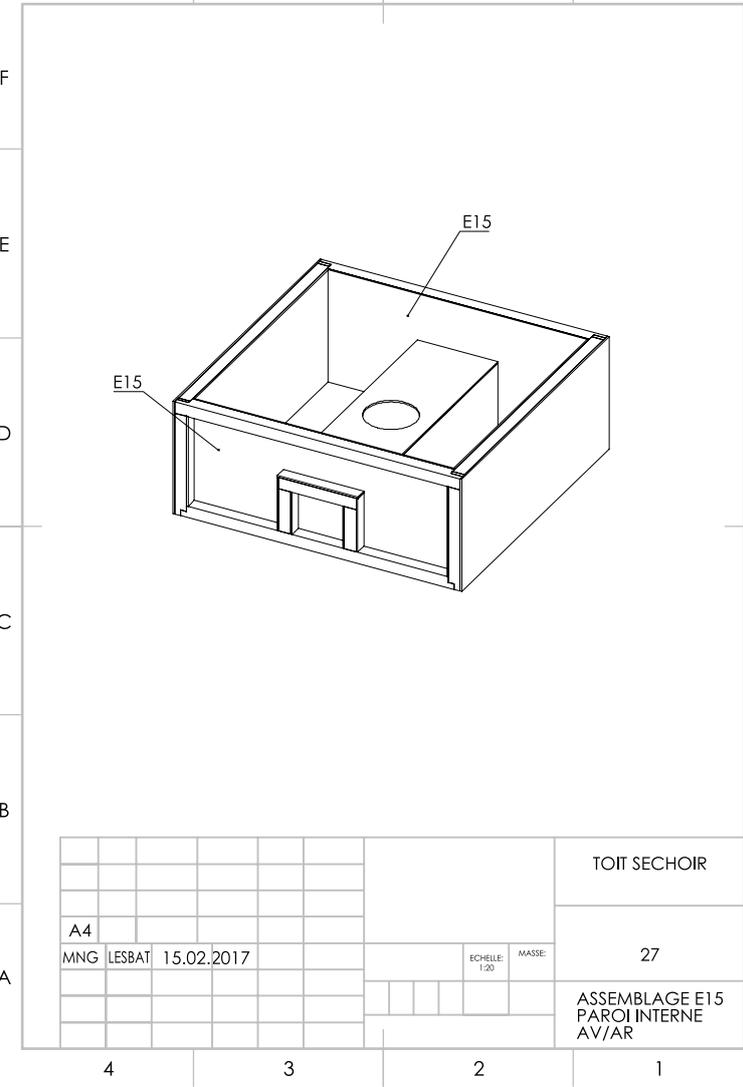
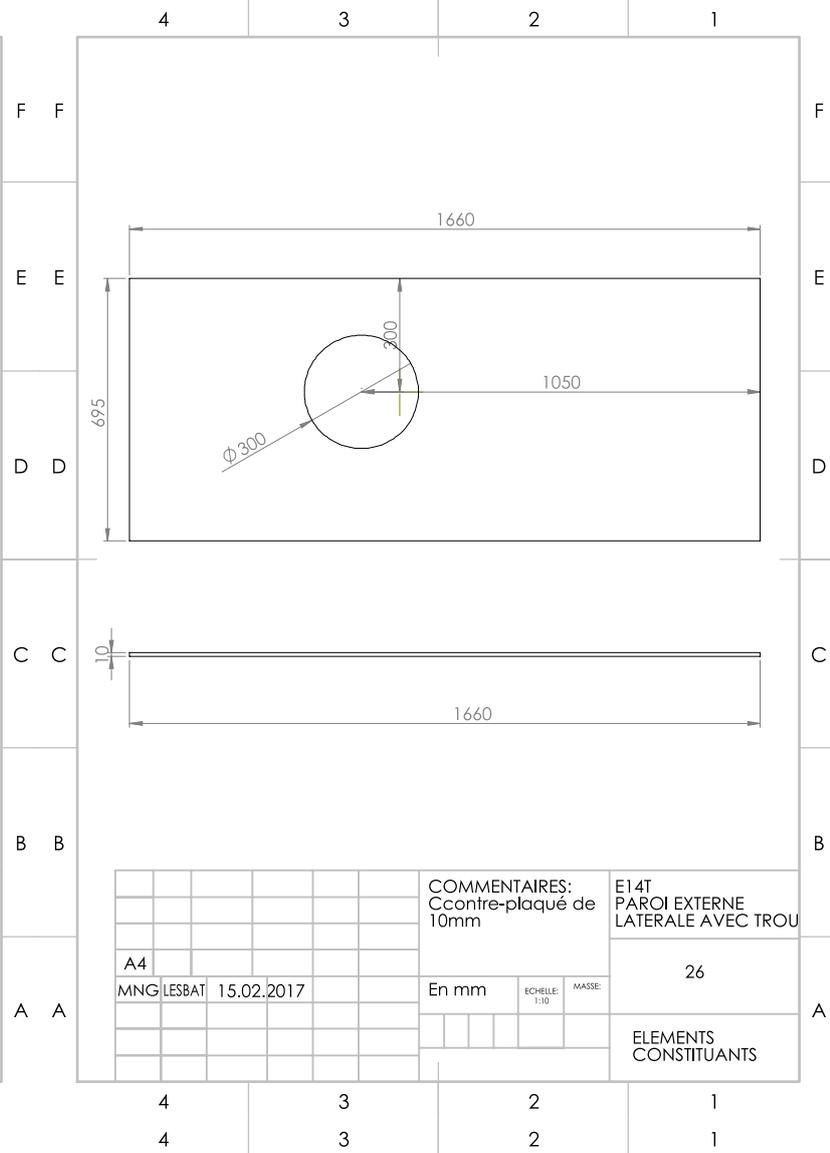
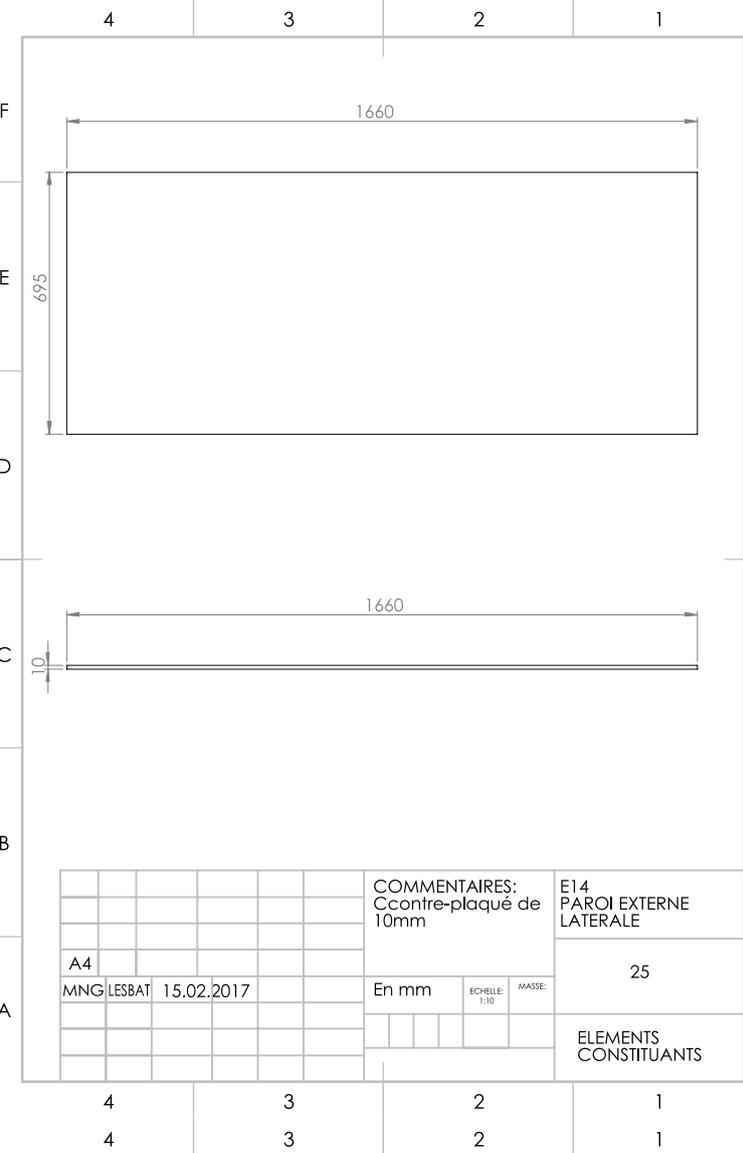
			COMMENTAIRES: Contre-plaqué de 10mm		E13T PAROI INTERNE LATERALE AVEC TROU	
A4			23			
MNG	LESBAT	15.02.2017	En mm	ECHELLE: 1:10	MASSE:	
			ELEMENTS CONSTITUANTS			

4 3 2 1  
4 3 2 1



			TOIT SECHOIR	
A4			24	
MNG	LESBAT	15.02.2017	ECHELLE: 1:20	MASSE:
			ASSEMBLAGE E14 PAROI EXTERNE LATERALE	

4 3 2 1  
4 3 2 1



4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

E16

E16

			TOIT SECHOIR	
A4			29	
MNG	LESBAT	15.02.2017	ECHELLE: 1:20	MASSE:
			ASSEMBLAGE E16 PAROI EXTERNE AV/AR	

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

1720

695

10

1720

			COMMENTAIRES: Contre-plaqué de 10mm		E16 PAROI EXTERNE AV/AR	
A4			30			
MNG	LESBAT	15.02.2017	En mm	ECHELLE: 1:10	MASSE:	
			ELEMENTS CONSTITUANTS			

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

E17

			TOIT SECHOIR	
A4			31	
MNG	LESBAT	15.02.2017	ECHELLE: 1:20	MASSE:
			ASSEMBLAGE E17 PAROI SUPERIEURE AVEC TROU	

4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

1720

1680

10

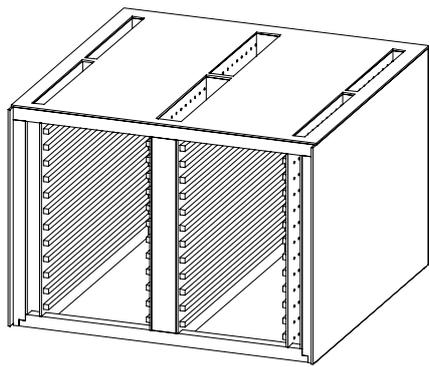
1720

$\Phi 300$

			COMMENTAIRES: Contre-plaqué de 10mm		E17 PAROI SUPERIEURE AVEC TROU	
A4			32			
MNG	LESBAT	15.02.2017	En mm	ECHELLE: 1:10	MASSE:	
			ELEMENTS CONSTITUANTS			

4 3 2 1

4 3 2 1



SECHOIR

1

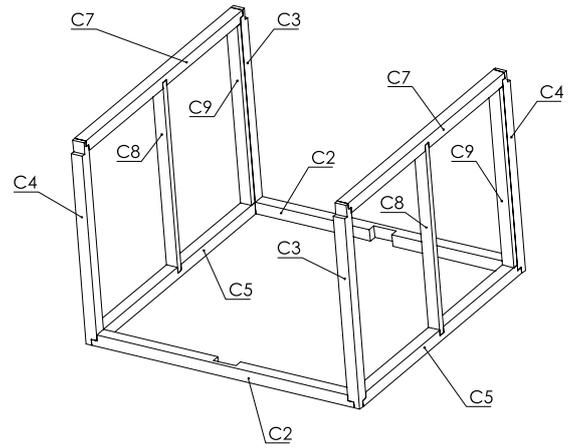
BOX SECHOIR ASSEMBLE

A4  
MNG LESBAT 07.02.2017

ECHELLE: 1:20

MASSE:

4 3 2 1



CADRE SECHOIR

1

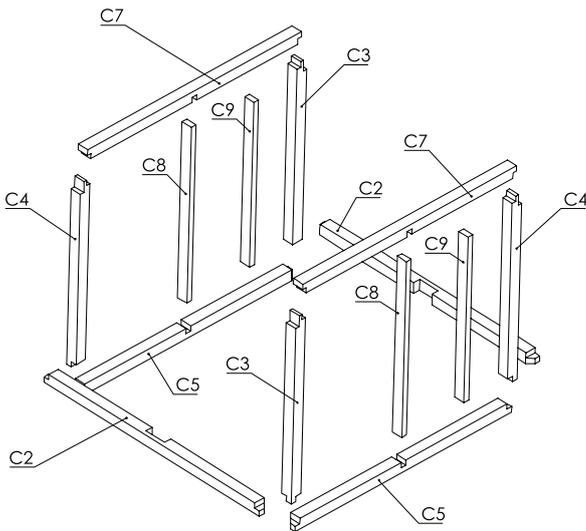
CADRE SECHOIR ASSEMBLE

A4  
MNG LESBAT 07.02.2017

ECHELLE: 1:20

MASSE:

4 3 2 1



CADRE SECHOIR

3

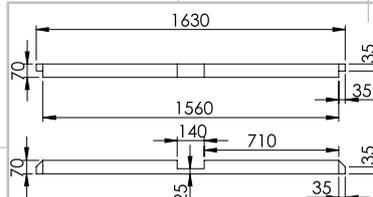
CADRE SECHOIR VUE ECLATEE

A4  
MNG LESBAT 07.02.2017

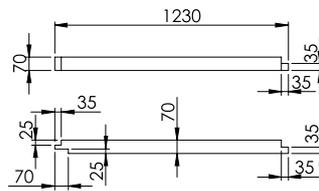
ECHELLE: 1:20

MASSE:

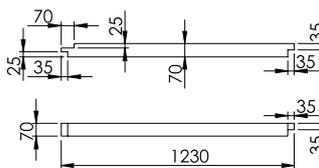
4 3 2 1



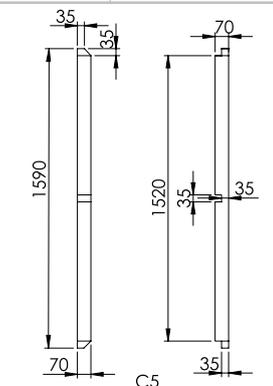
C2 TRAVERSE INFERIEURE (modifié)



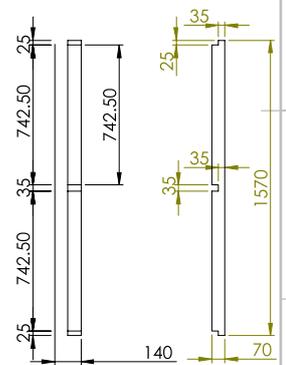
C3 MONTANT LATERAL DROIT



C4 MONTANT LATERAL GAUCHE



C5 TRAVERSE LATERAL SUPERIEUR



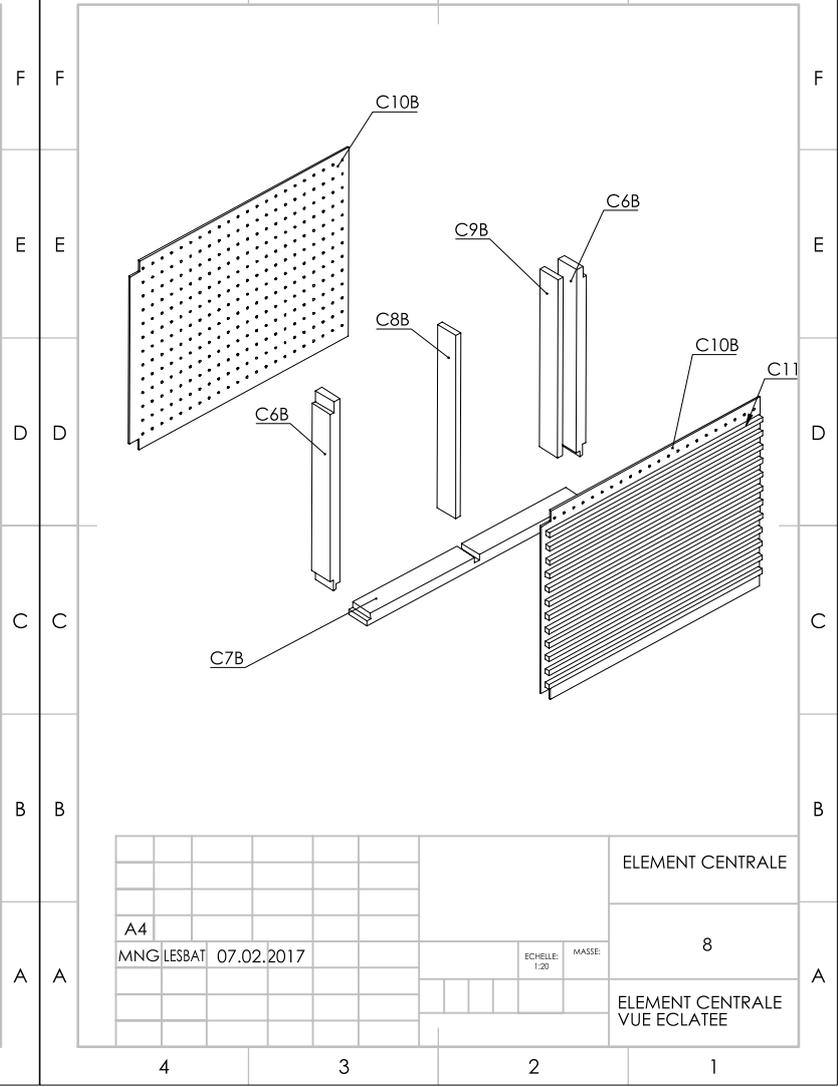
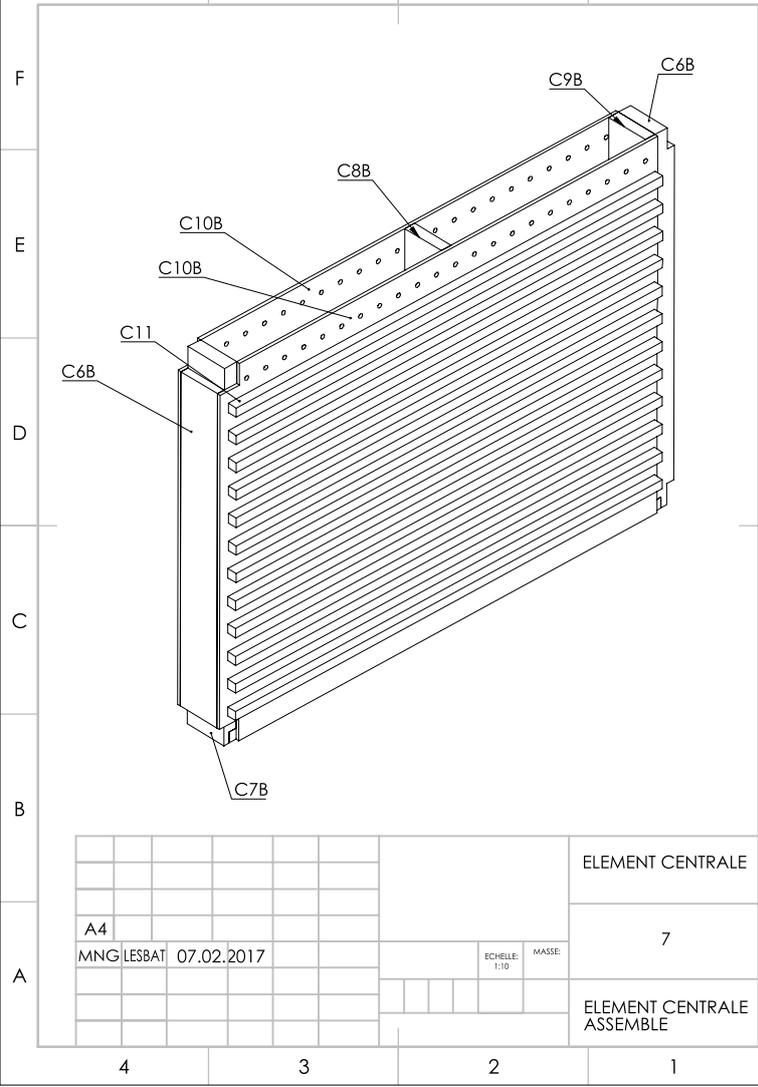
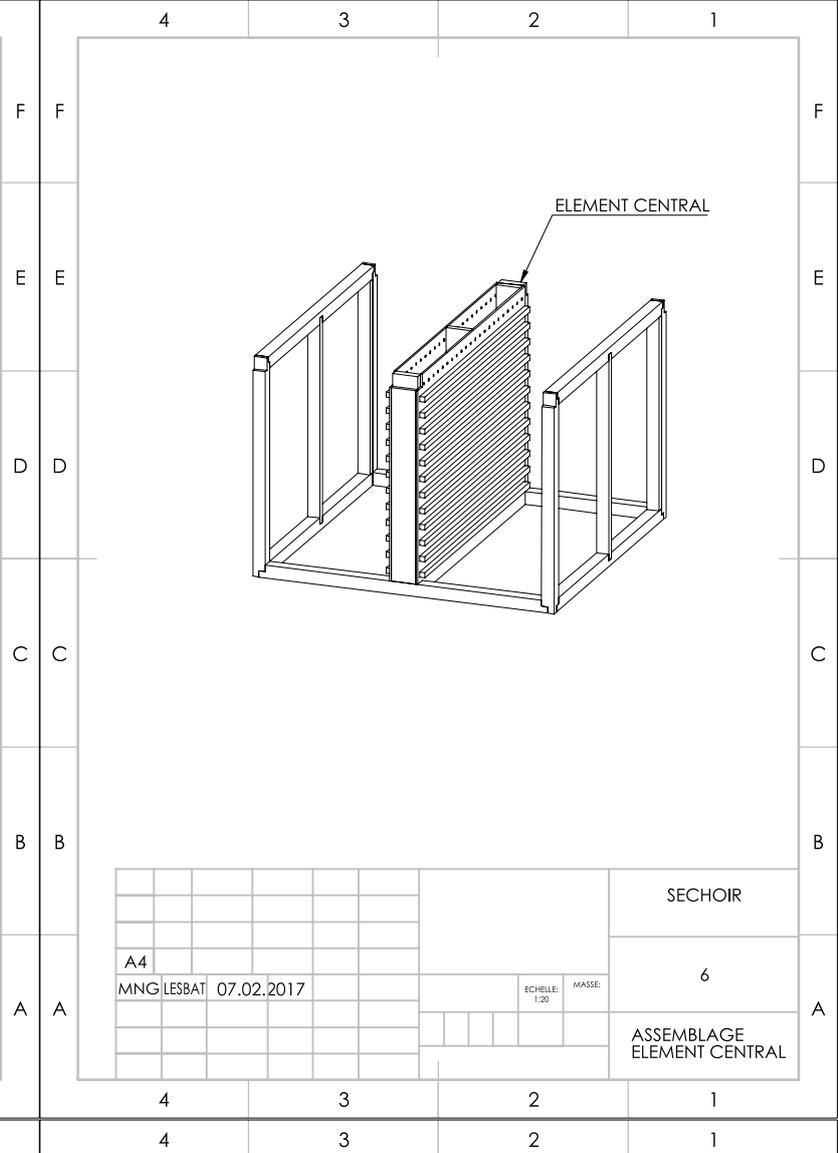
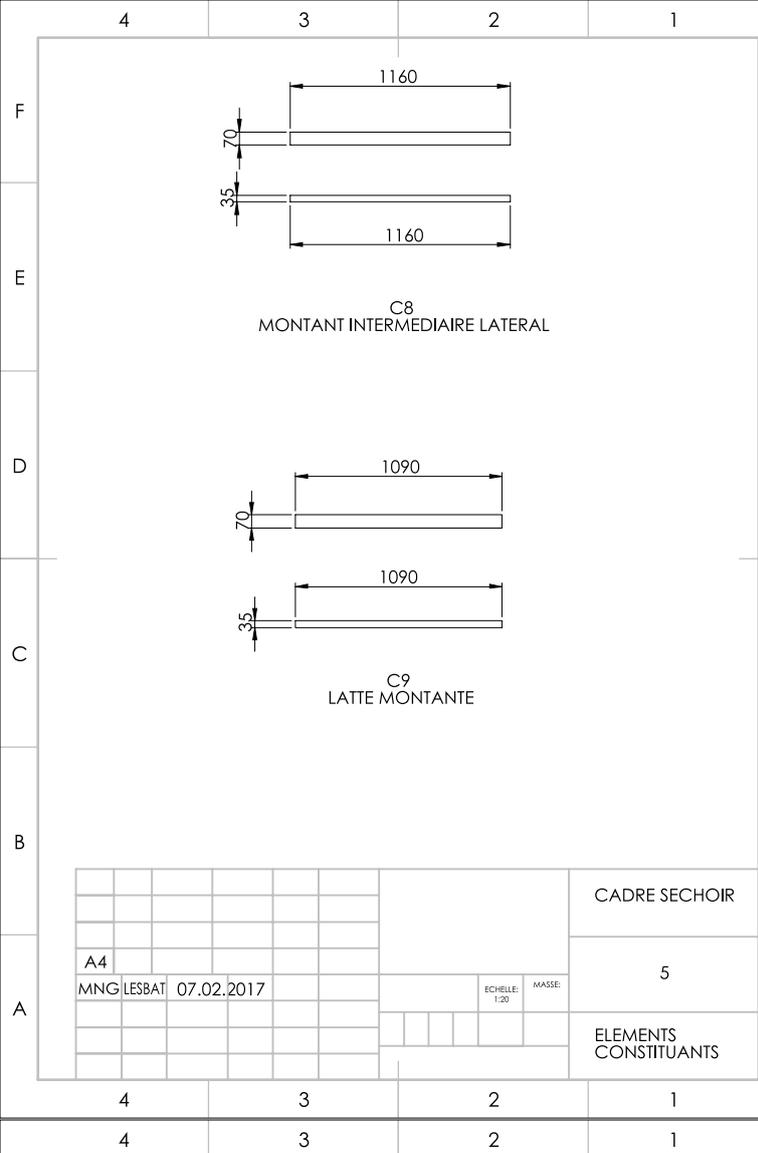
C7 TRAVERSE INTERMEDIAIRE

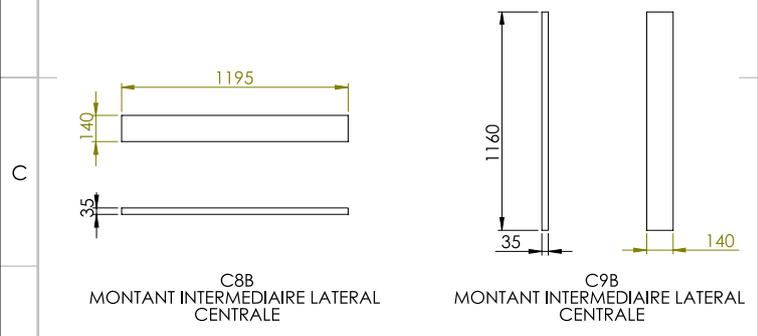
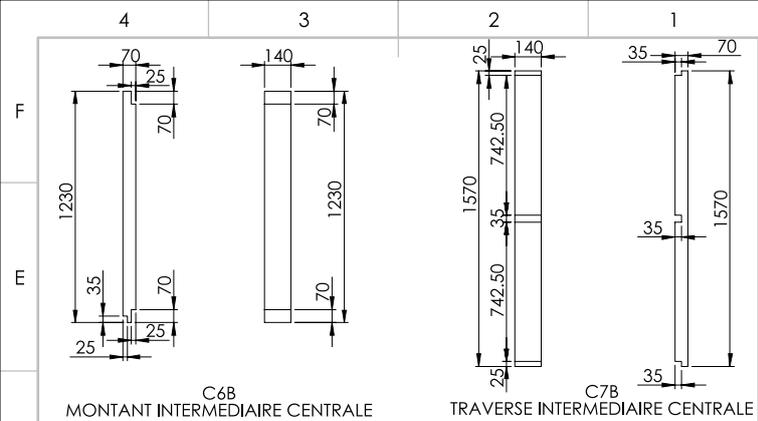
A4  
MNG LESBAT 07.02.2017

ECHELLE: 1:20

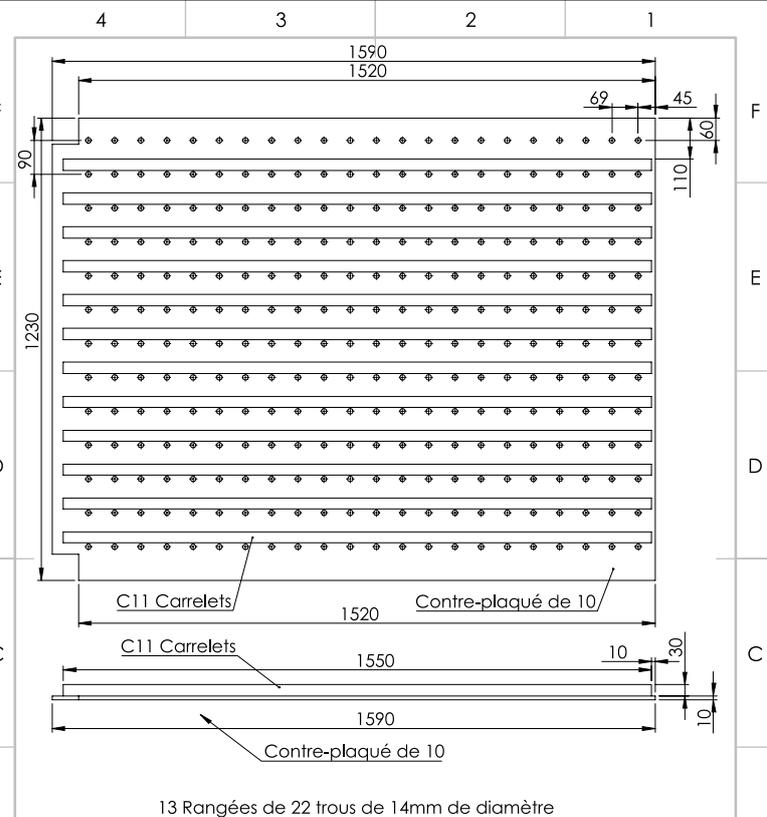
MASSE:

4 3 2 1

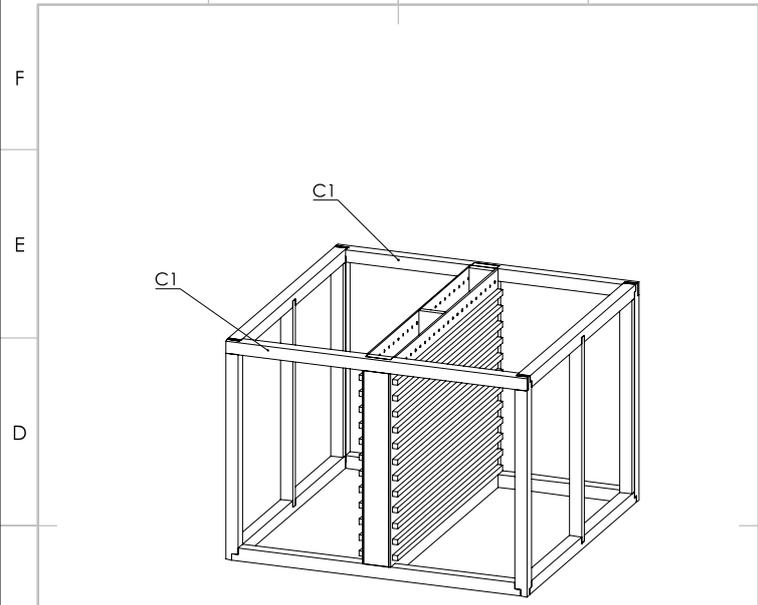




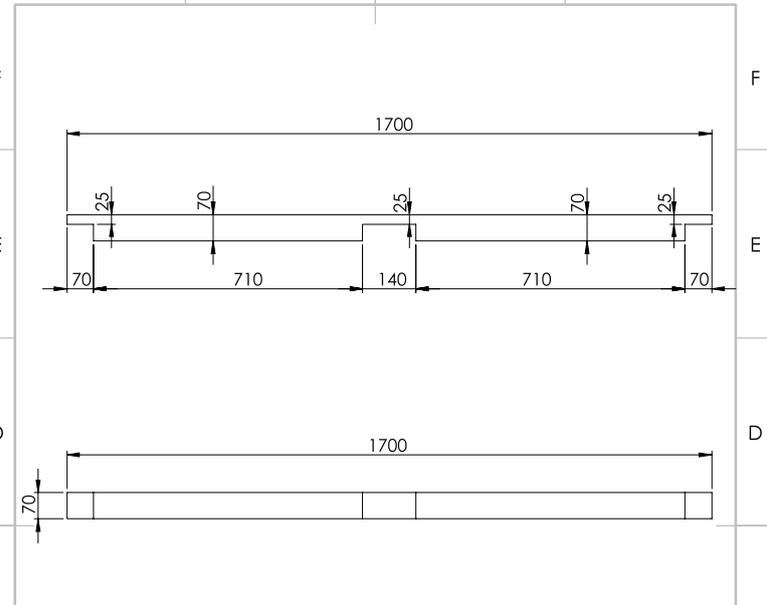
			ELEMENT CENTRALE
			9
			ELEMENTS CONSTITUANTS
A4			
MNG LESBAT 07.02.2017			
En mm			
ECHELLE: 1:20			
MASSE:			



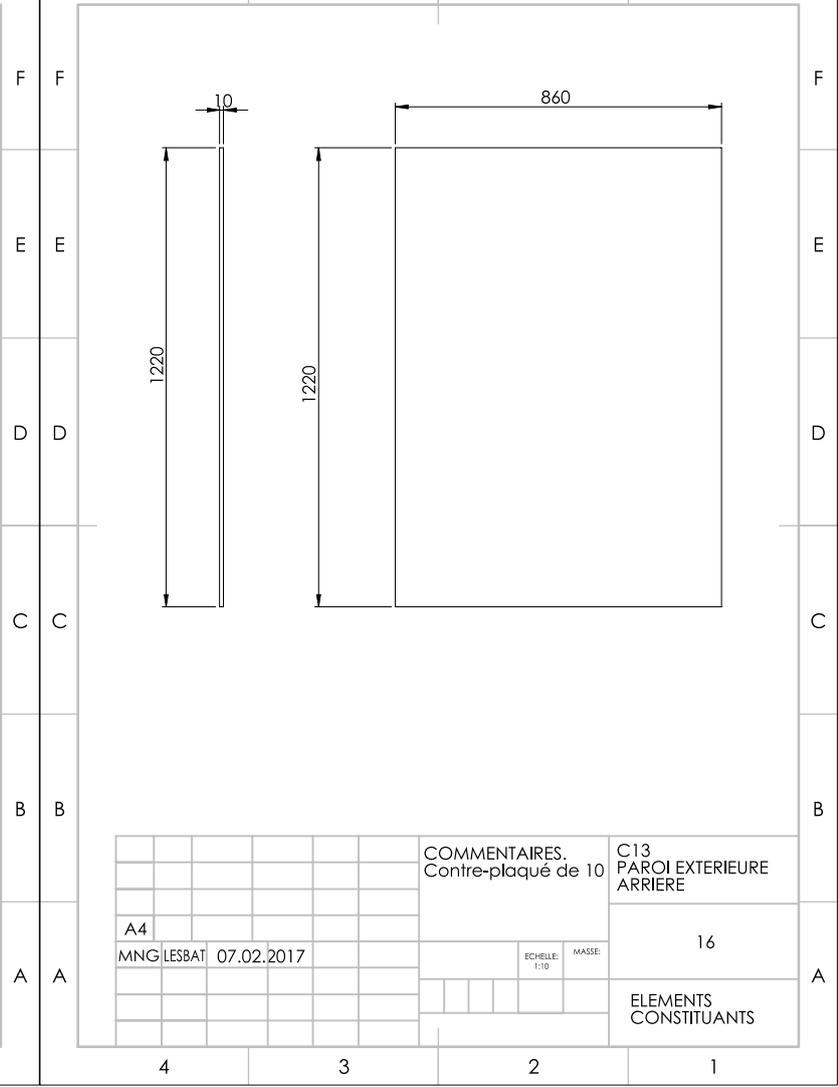
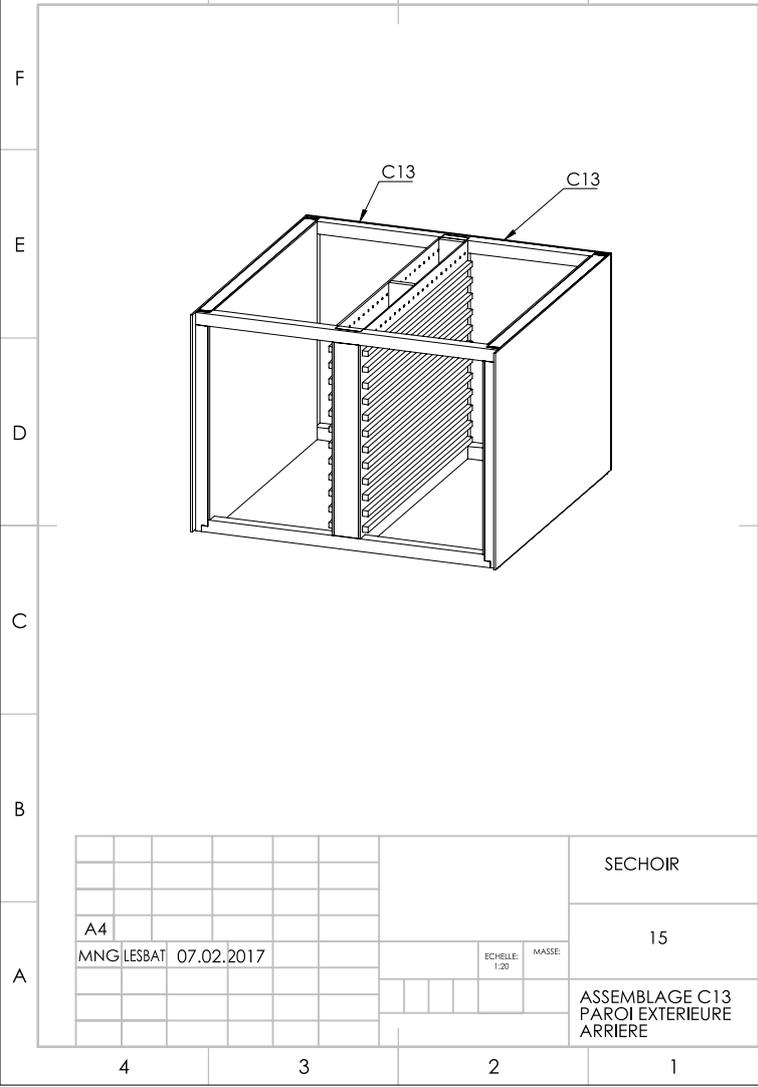
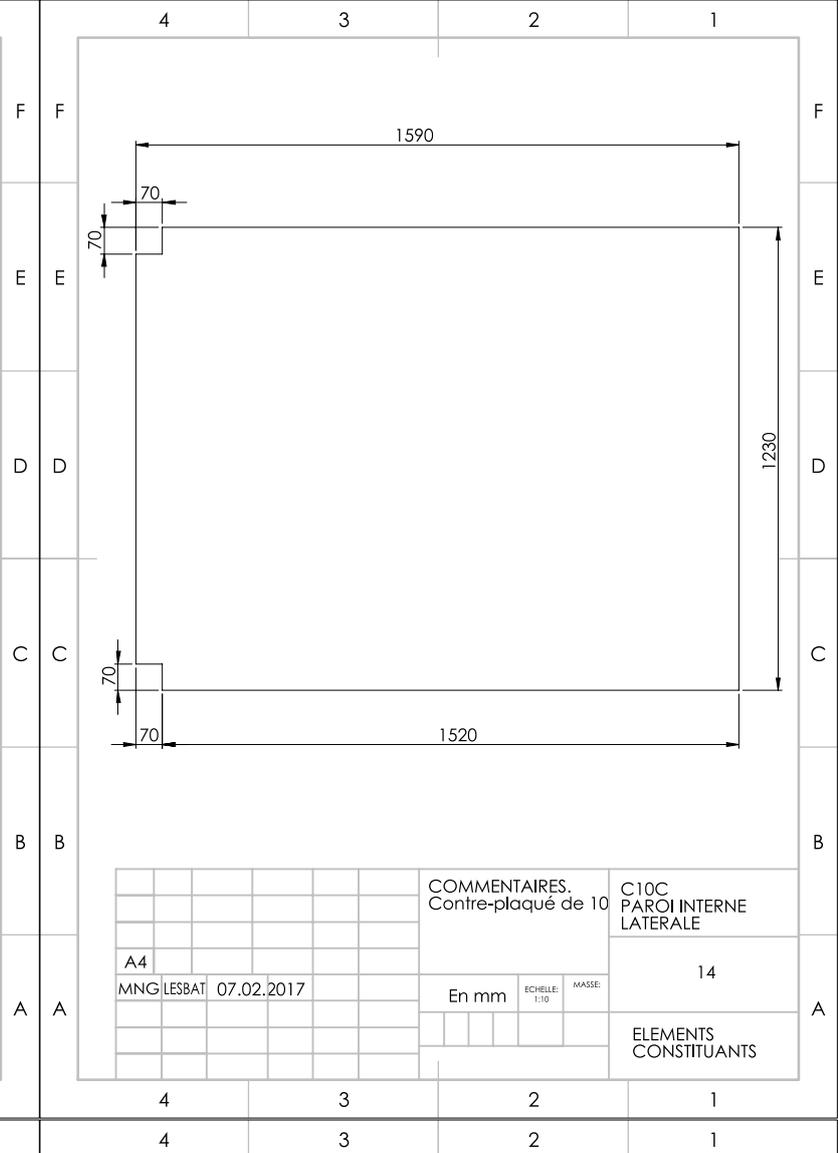
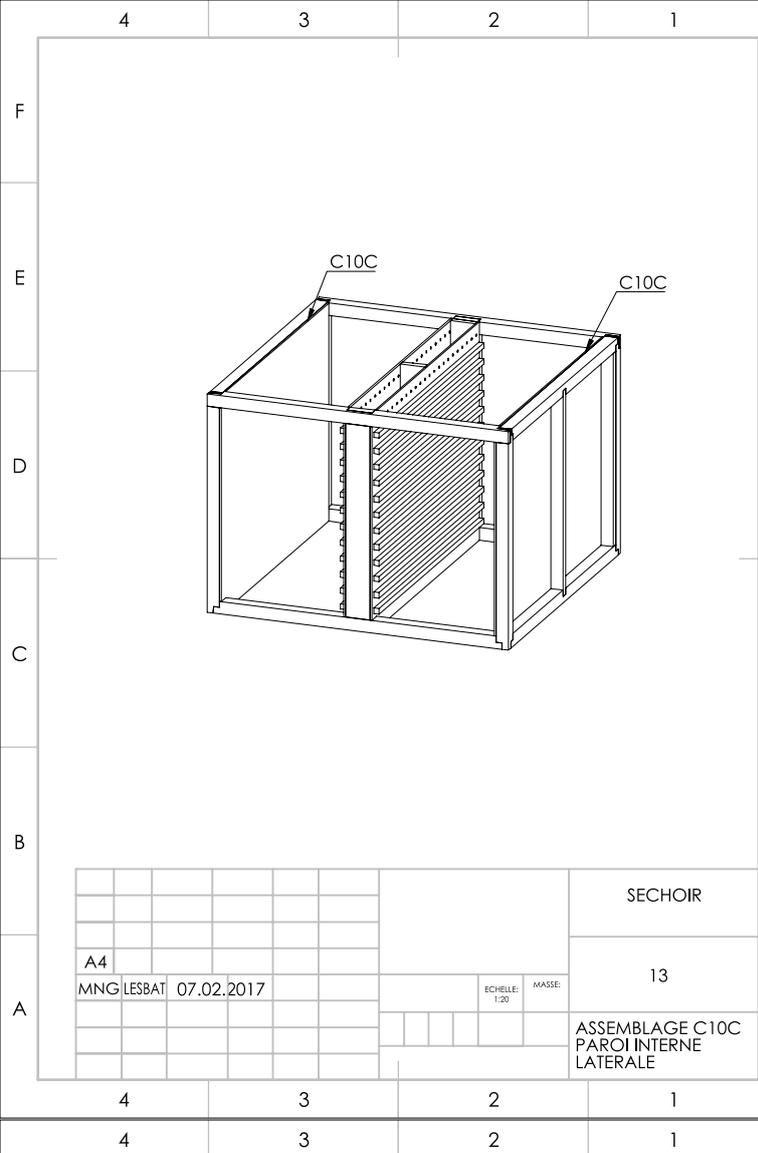
			COMMENTAIRES: Ci-dessus la paroi droite Pour la paroi gauche placer les carrelets sur l'autre face	ELEMENT CENTRALE
				10
				C10B PAROI TROUE AVEC CARRELETS
A4				
MNG LESBAT 07.02.2017				
En mm				
ECHELLE: 1:10				
MASSE:				

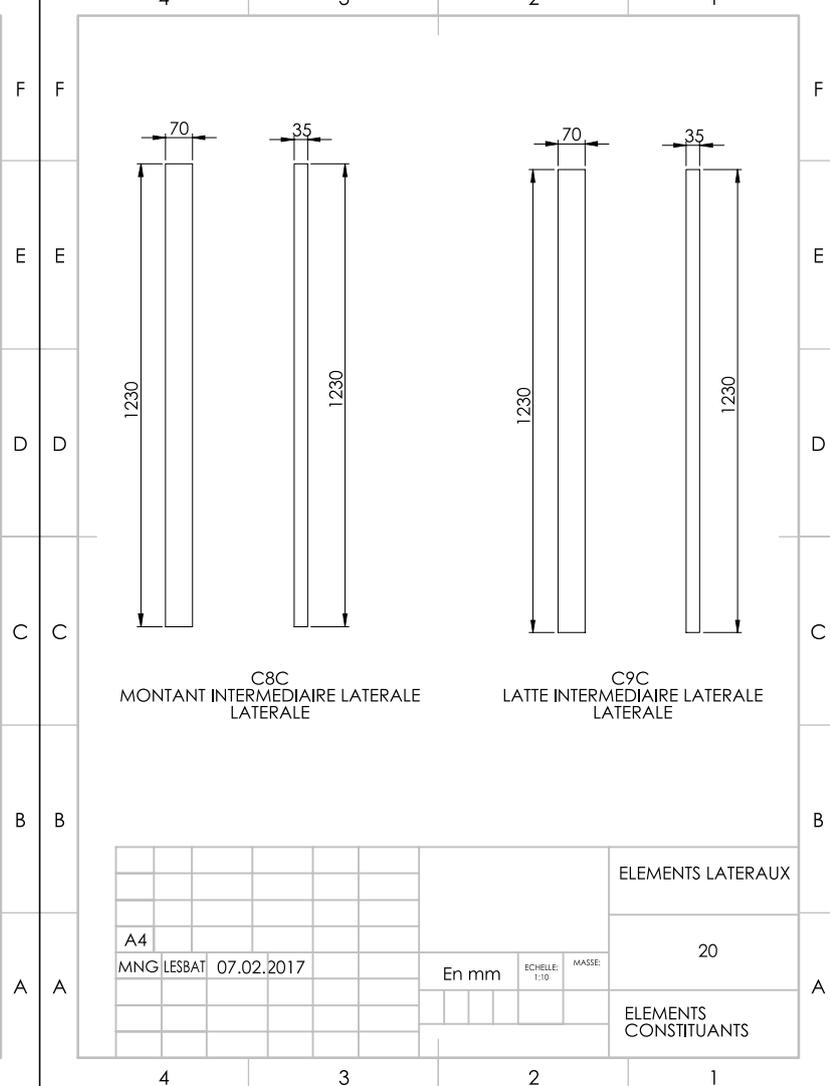
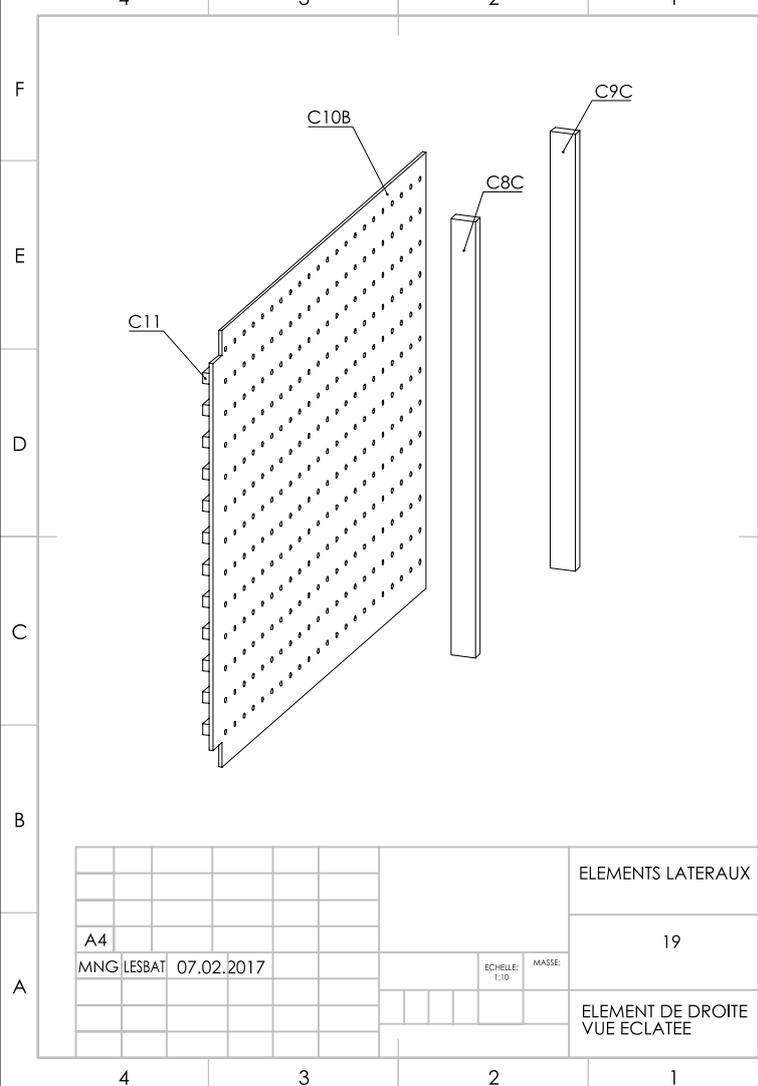
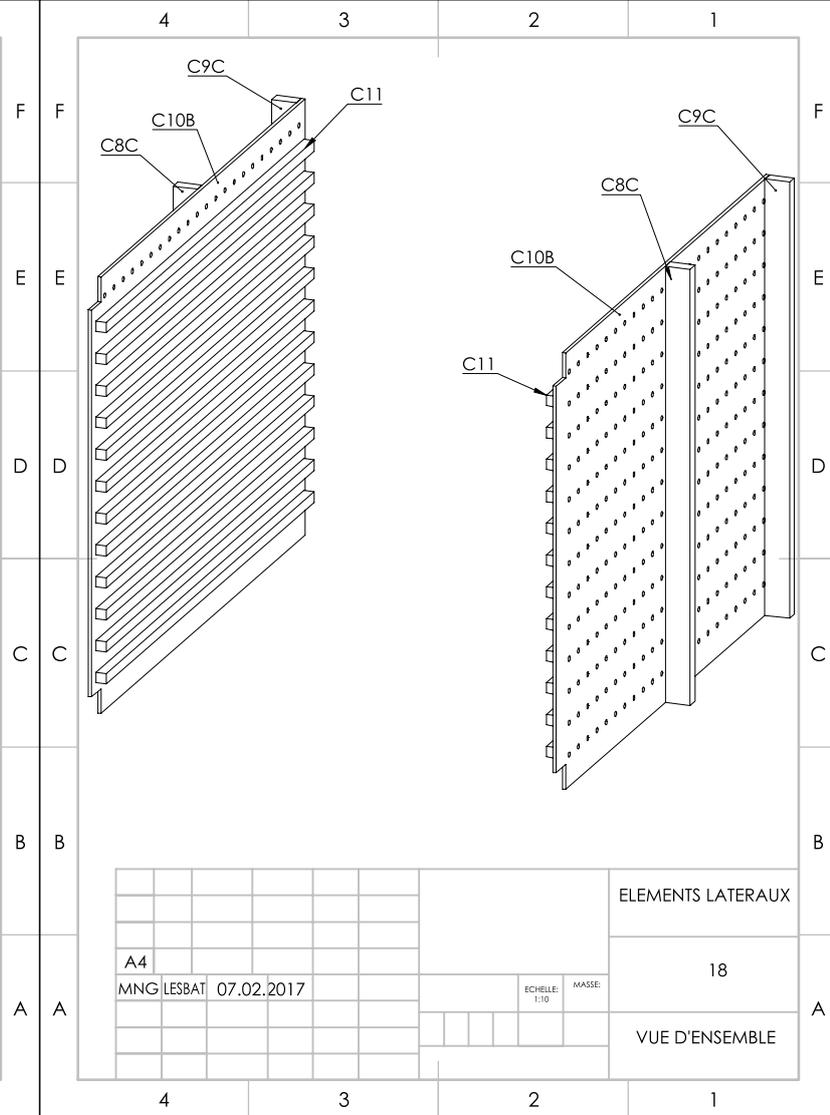
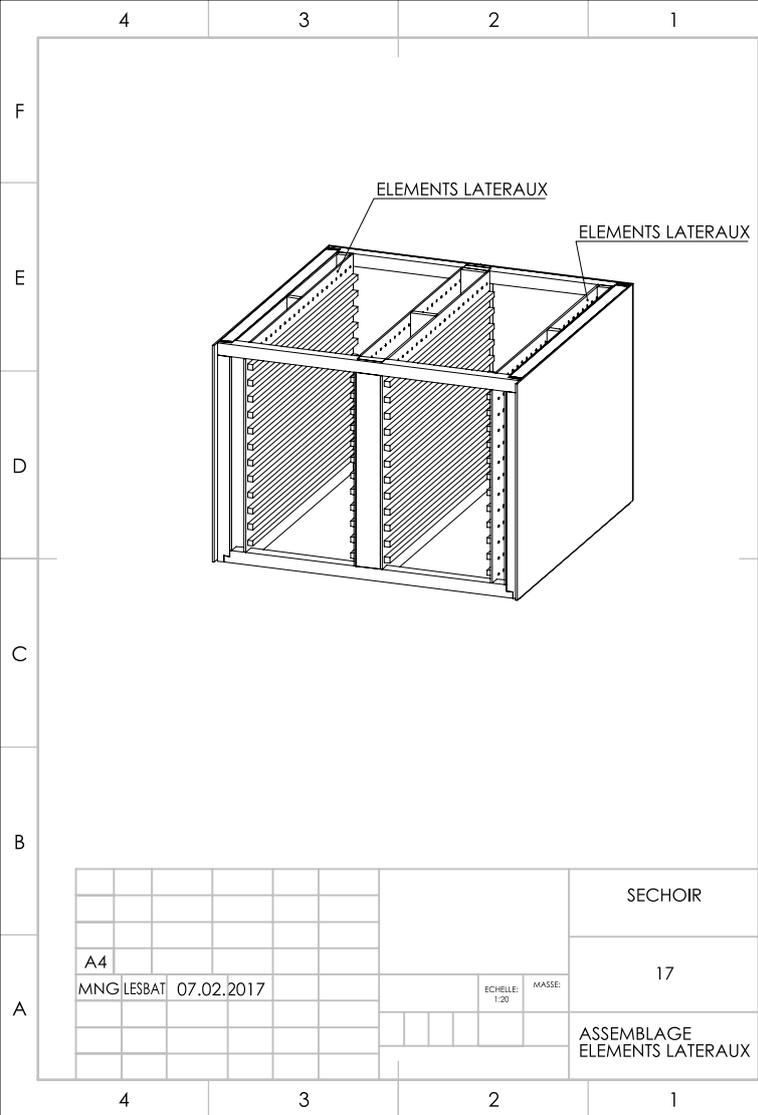


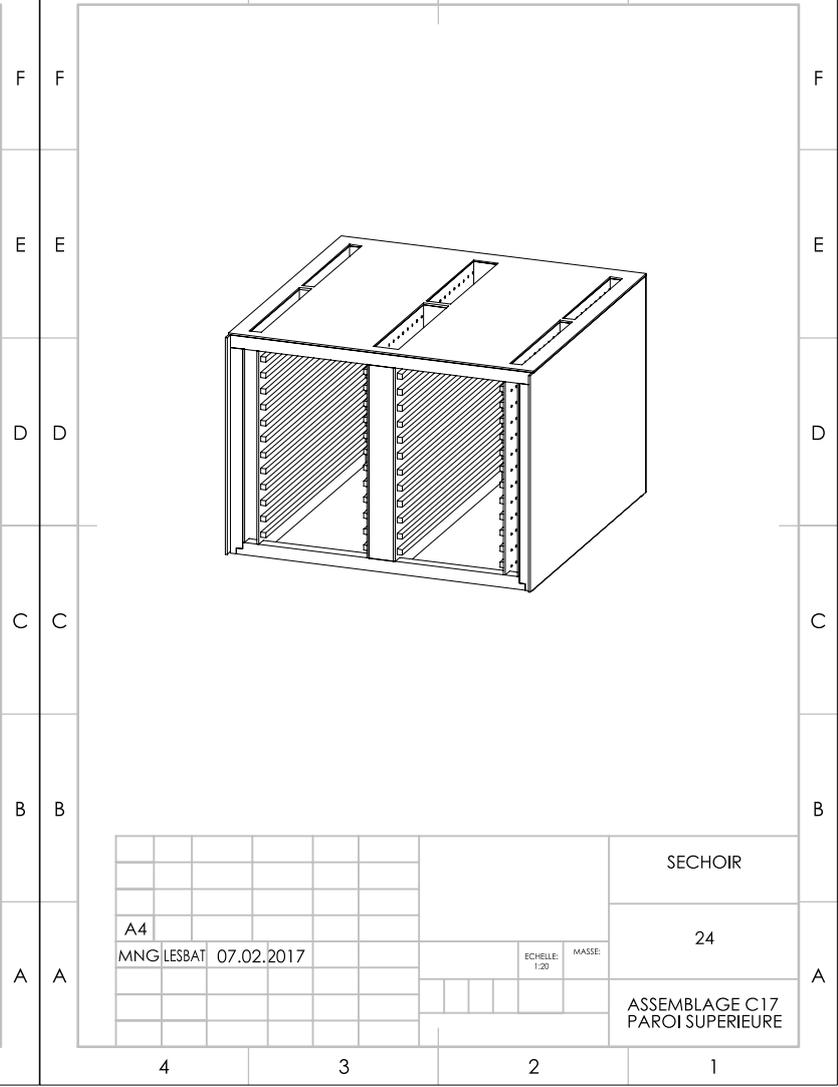
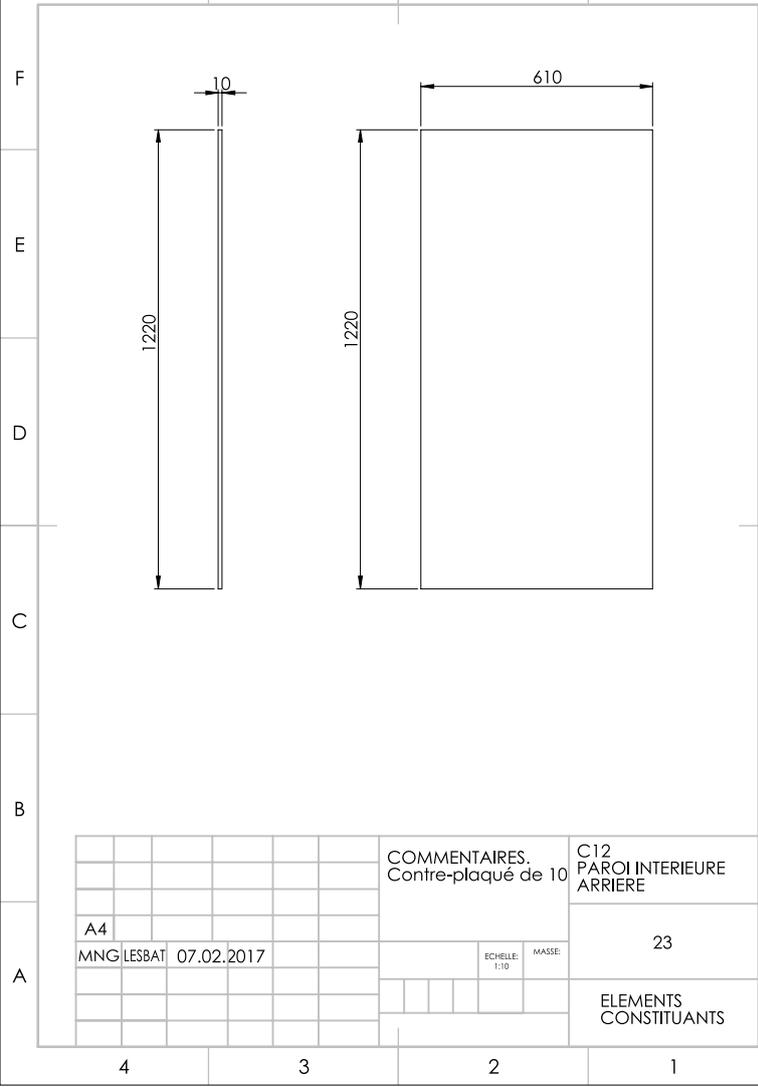
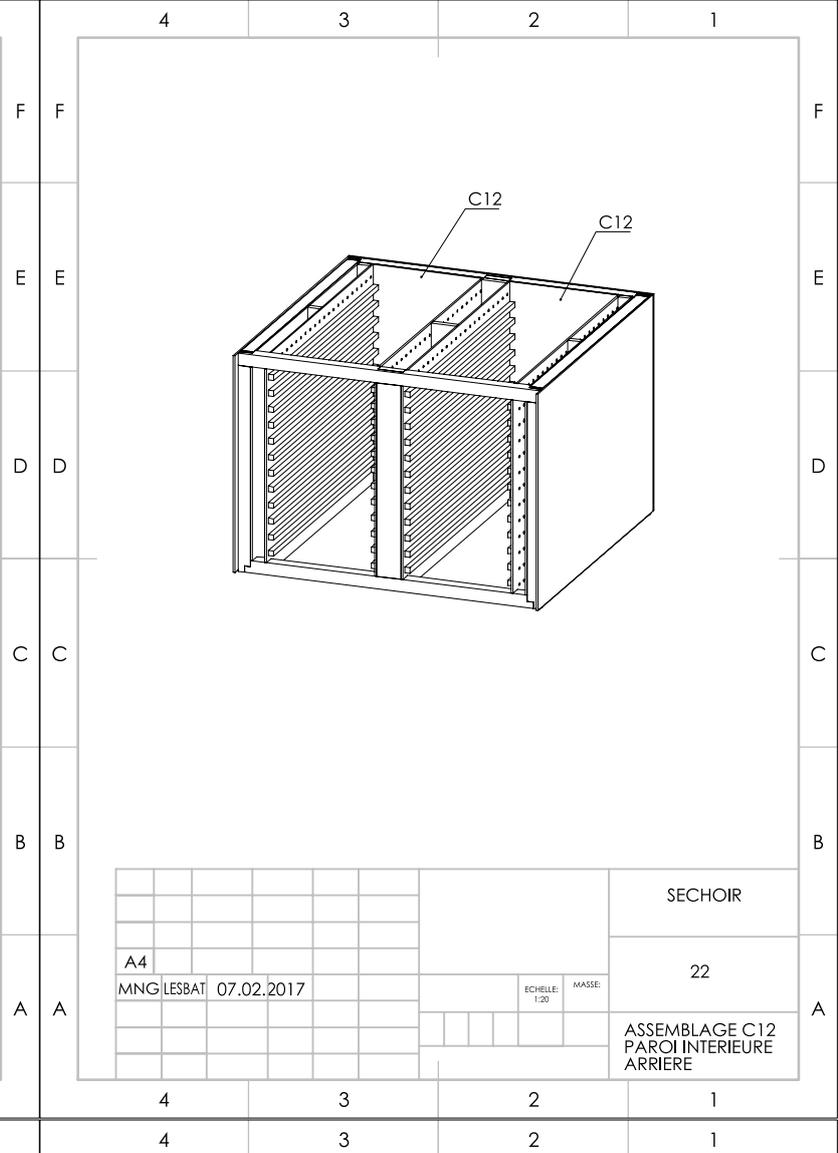
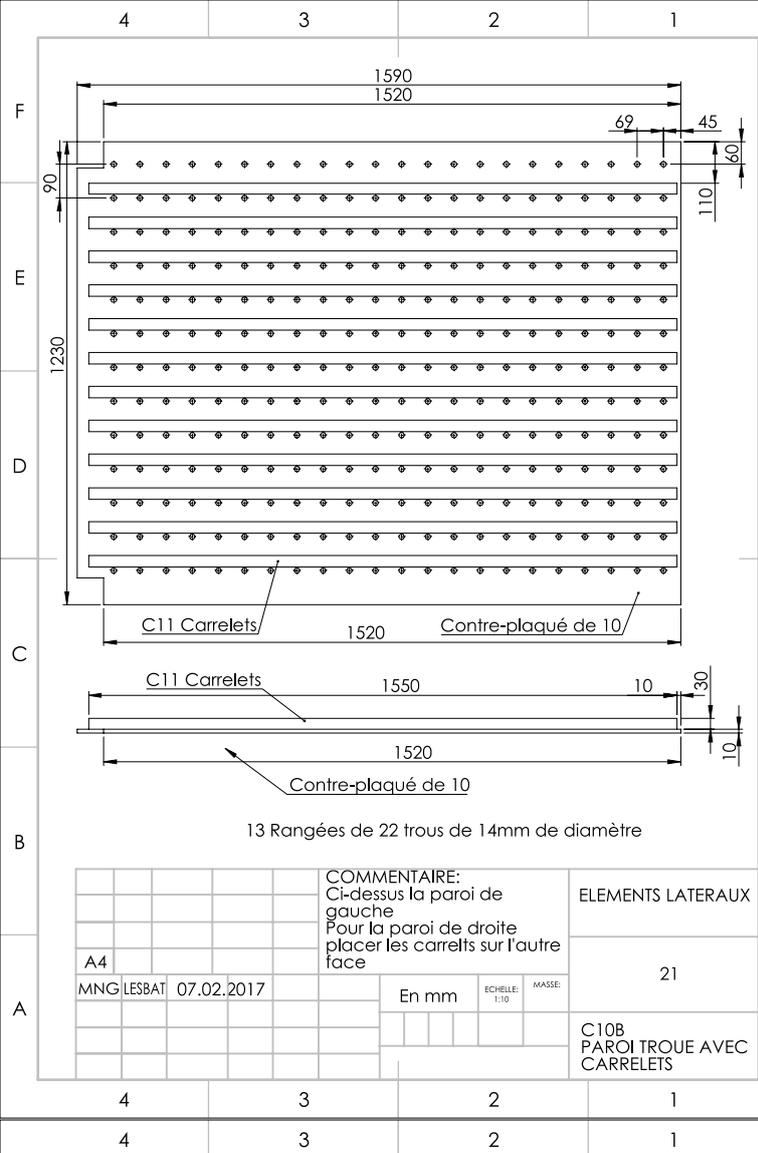
			SECHOIR
			11
			ASSEMBLAGE C1 TRAVERSE SUPERIEURE
A4			
MNG LESBAT 07.02.2017			
En mm			
ECHELLE: 1:20			
MASSE:			

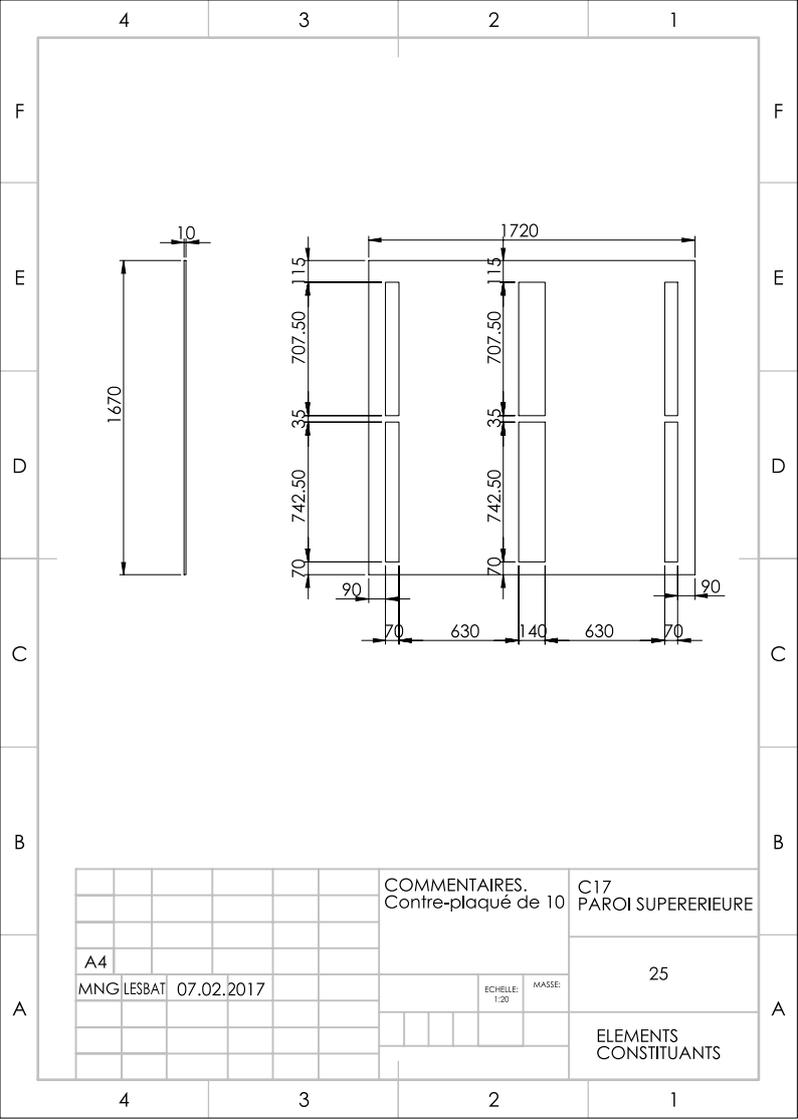


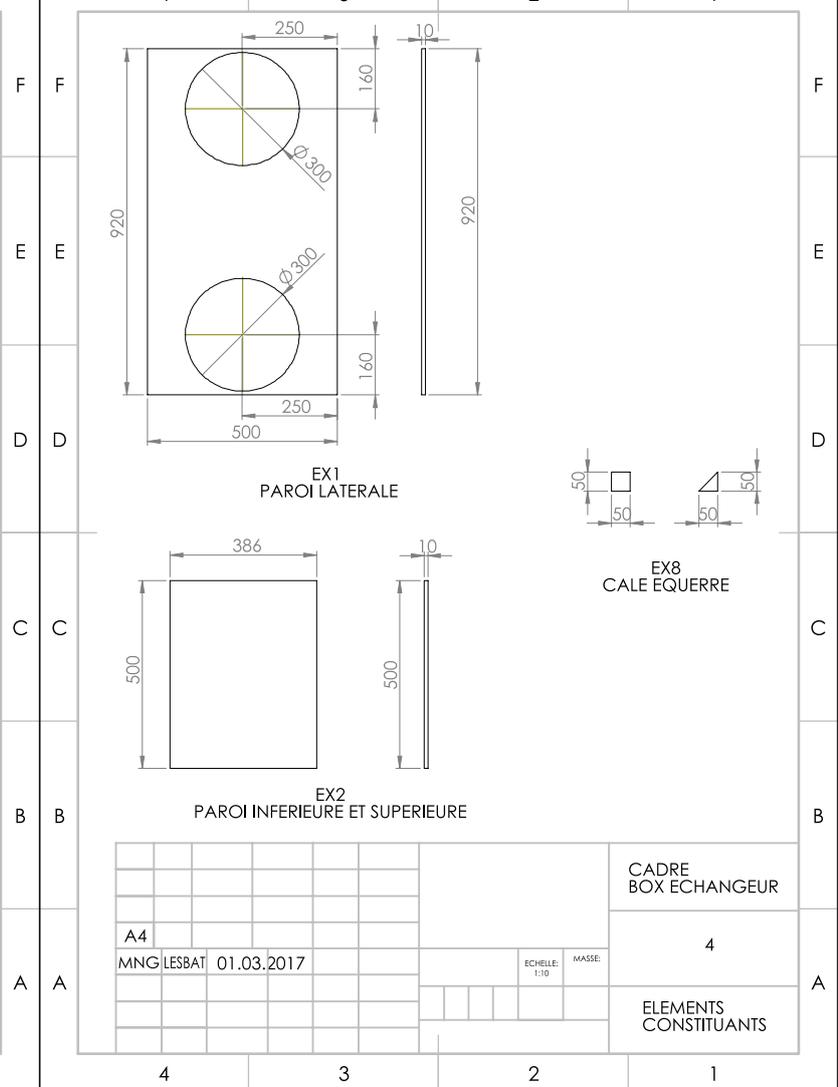
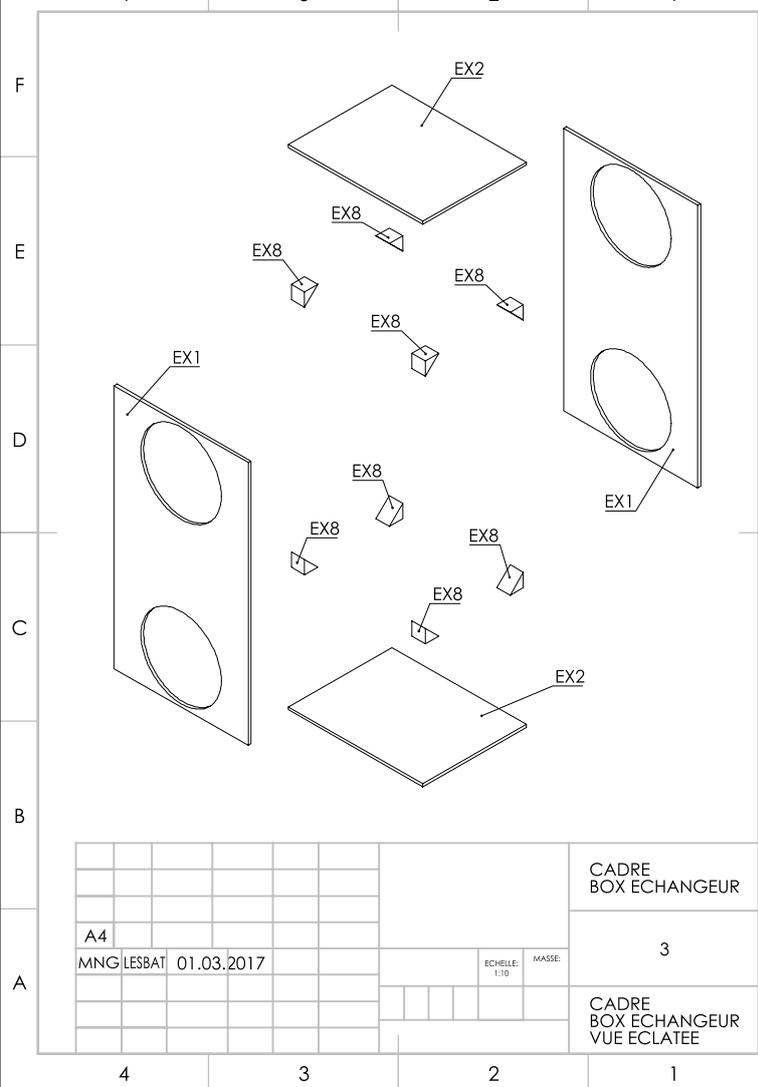
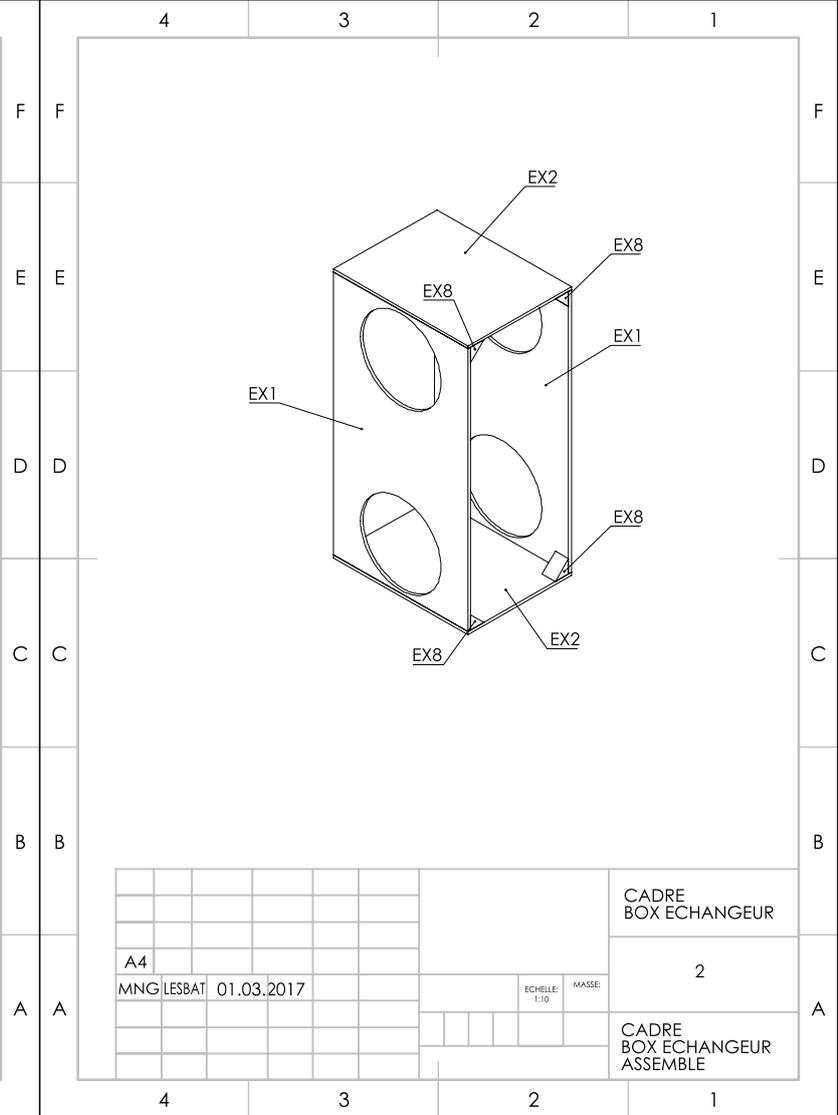
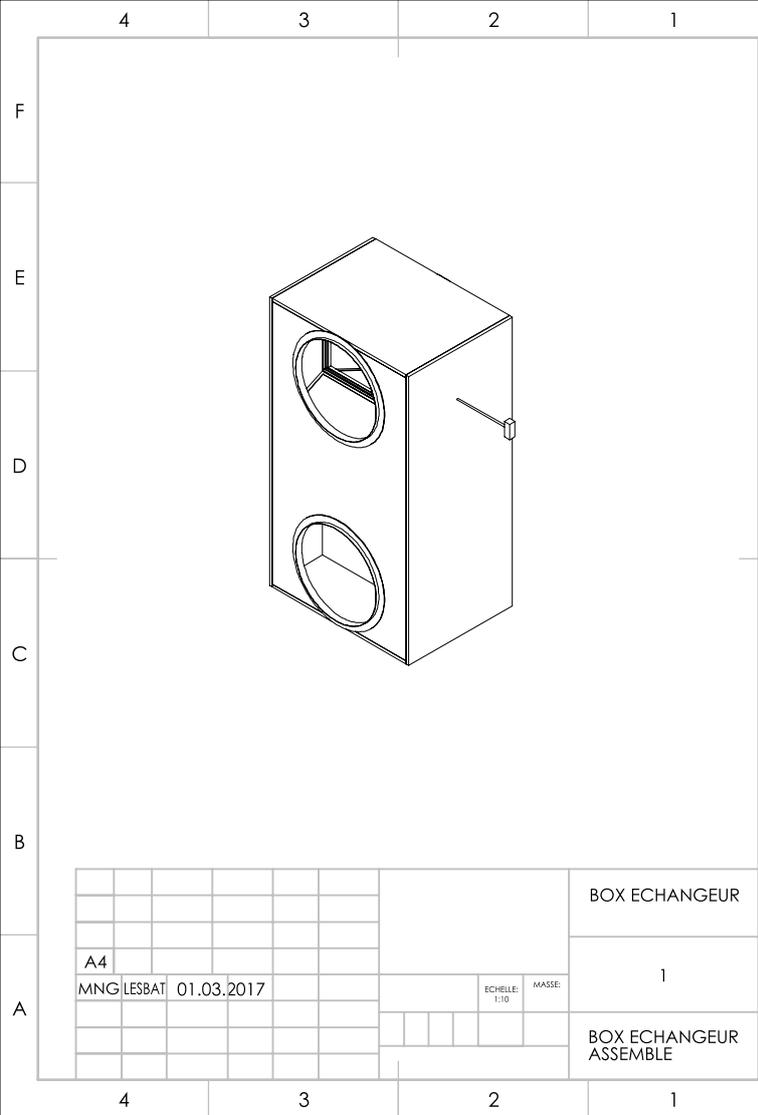
			C1 TRAVERSE SUPERIEURE
			12
			ELEMENTS CONSTITUANTS
A4			
MNG LESBAT 07.02.2017			
En mm			
ECHELLE: 1:10			
MASSE:			











4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE AVEC RAILS

EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE AVEC RAILS

VUE DE PROFIL

VUE DE FACE

			BOX ECHANGEUR
			5
A4			ASSEMBLAGE EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE AVEC RAILS
MNG LESBAT 01.03.2017			
		ECHELLE: 1:10	MASSE:

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

RAILS

EX3

Code Couleur:  
Gris  
EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE  
Marron  
RAILS

			COMMENTAIRES: Les rails sont fixés sur la pièce EX3 et servent pour la porte EX9	EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE AVEC RAILS
				6
A4			ASSEMBLAGE EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE AVEC RAILS	EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE AVEC RAILS ASSEMBLE
MNG LESBAT 01.03.2017				
		ECHELLE: 1:5	MASSE:	

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE

			EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE AVEC RAILS
			7
A4			ELEMENTS CONSTITUANTS
MNG LESBAT 01.03.2017			
		ECHELLE: 1:5	MASSE:

4 3 2 1

4 3 2 1

F F

E E

D D

C C

B B

A A

RAILS

			COMMENTAIRES: Rails servant pour la porte EX9 constituée d'un constre-plaqué de 10mm	EX3 CALE INTERMEDIAIRE HAUTE AVEC RAILS
				8
A4			ELEMENTS CONSTITUANTS	ELEMENTS CONSTITUANTS
MNG LESBAT 01.03.2017				
		ECHELLE: 1:5	MASSE:	

4 3 2 1

